

柴达木盆地晚更新世岩相古地理特征*

张金明¹ 潘彤² 宋泰忠¹ 柯学³
梁坤先¹ 杨文军¹ 张小瑾¹

1 青藏高原北部地质过程与矿产资源重点实验室, 青海省地质调查院, 青海西宁 810012

2 青海省地质矿产勘查开发局, 青海西宁 810001

3 中国地质大学(武汉)地质调查研究院, 湖北武汉 430074

摘 要 柴达木盆地地处古亚洲构造域和特提斯—喜马拉雅构造域的结合部, 具有特殊的盆-山构造格局, 盆地内新生代地层非常发育, 保存了从新生代早期至第四纪之间连续、完整的沉积记录。柴达木盆地晚更新世沉积物分为砾石层、砂层、黏土层和盐岩层 4 大类, 盆地边部以砾石层、砂层为主, 厚度 1~45 m; 盆地中心以黏土层、盐岩层为主, 厚度 150~300 m。本次工作在对比 56 个钻孔、露头剖面资料基础上, 对柴达木盆地晚更新世岩相古地理进行综合研究。结果表明: 柴达木盆地晚更新世发育冲积扇相、辫状河相、湖泊三角洲相、淡水湖相、咸水湖相 5 类沉积相和 15 类沉积亚相; 盆地边缘发育冲积扇相, 辫状河相主要分布于阿拉尔、乌图美仁、大格勒、夏日哈、怀头塔拉等地区, 辫状河相或河流三角洲相在盆地北缘面积变化明显, 南缘变化不大。受共运动和运动的影响, 柴达木古湖被完全肢解成彼此互不相连的多个小湖泊, 大浪滩、察汗斯拉图、昆特依和马海等孤立湖盆的湖水急剧浓缩, 为盐湖滨浅湖亚相沉积, 一里坪地区为盐湖滨浅湖亚相, 察尔汗、大柴旦地区主体仍为淡水—微咸水湖泊, 尕斯库勒湖、托素湖为一个统一的淡水湖。

关键词 岩相古地理 晚更新世 柴达木盆地

第一作者简介 张金明, 男, 1982 年生, 正高级工程师, 从事区域地质矿产调查。E-mail: 271883992@qq.com。

通讯作者简介 潘彤, 男, 1966 年生, 博士, 正高级工程师, 从事区域成矿规律方面的研究。E-mail: pant66@163.com。

中图分类号: P531 **文献标志码:** A

Lithofacies palaeogeography of the Late Pleistocene in Qaidam Basin

ZHANG Jinming¹ PAN Tong² SONG Taizhong¹ KE Xue³
LIANG Kunxian¹ YANG Wenjun¹ ZHANG Xiaojin¹1 Key Laboratory of the Northern Qinghai-Tibet Plateau Geological Processes and Mineral Resource,
Qinghai Geological Survey Institute, Xining 810012, China

2 Bureau of Geological Exploration and Development of Qinghai Province, Xining 810001, China

3 Institute of Geological Survey, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China

* 青海省地质矿产勘查开发局地质勘查项目(编号:青地矿科[2022]32号,青地矿[2025]9号)资助。[Financially supported by the Geological Exploration Project of Qinghai Province Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration and Development (Nos. Qingdi Mining Department [2022] 32, Qingdi Mine [2025] 9)]

收稿日期: 2024-05-17 改回日期: 2024-12-17

Abstract The Qaidam Basin, situated at the intersection of the Palaeo-Asian and Tethys-Himalaya tectonic domains, exhibits a unique basin-mountain structural pattern. Its well-developed Cenozoic strata preserve continuous sedimentary records spanning from the early Cenozoic to the Quaternary period. Late Pleistocene sediments comprise four lithofacies types: gravel, sand, clay, and evaporite layers. Gravel and sand layers dominate the basin's margins (1 to 45 m thick), while clay and evaporite layers (150 and 300 m thick) prevail in the basin center. Based on lithological, biological, climatic, event, and age classification and correlation, the late Pleistocene strata are subdivided into five genetic sedimentary types: diluvial, alluvial, fluvial, lacustrine, and chemical deposition. Through comprehensive analysis of 56 boreholes and outcrop profiles, the late Pleistocene sedimentary facies of the Qaidam Basin have been thoroughly studied. The results indicate five distinct sedimentary facies types: alluvial fan, braided river, lacustrine delta, freshwater lake, and saline lake. Braided river facies are primarily distributed in areas such as Alar, Utumeiren, Dagele, Xialiha, and Huaitoutala. Similarly, significant changes in braided river or river delta facies are observed along the northern margin of the basin, while minimal changes occur along the southern margin. Triggered by the Gonghe Movement, the unified Qaidam paleolake disintegrated into multiple isolated small lake basins. In these isolated basins, such as Dalangtan, Chahan Slatu, Kunteyi, and Mahai, rapid brine concentration led to the deposition of shore-shallow saline lake subfacies. The Yiliping area also exhibits shore-shallow saline lake subfacies, whereas the main bodies of the Qarhan and Da Qaidam areas maintained freshwater and brackish lacustrine environments. Gahai Lake, Keluk Lake, and Tuosu Lake formed a unified freshwater lake system.

Key words lithofacies palaeogeography, Late Pleistocene, Qaidam Basin

About the first author ZHANG Jinming, born in 1982, is a senior engineer. He is mainly engaged in regional geology and mineral resources survey. E-mail: 271883992@qq.com.

About the corresponding author PAN Tong, born in 1966, is a Ph.D. and senior engineer. He is mainly engaged in research on regional metallogenic patterns. E-mail: pant66@163.com.

1 概述

柴达木盆地位于青藏高原北部边缘的一个巨大的山间盆地,地处青海省西北部,南临昆仑山,北接祁连山,西北界为阿尔金山(图 1-a),介于东经 $90^{\circ}16' \sim 99^{\circ}16'$ 、北纬 $35^{\circ}00' \sim 39^{\circ}20'$ 之间,面积约为 $25.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。大地构造位置处于古亚洲构造域和特提斯—喜马拉雅构造域的结合部,具有特殊的盆—山构造格局。研究认为柴达木盆地的形成可以追溯到古生代晚期—中生代的大陆碰撞过程,在形成喜马拉雅山脉的同时也引发了柴达木盆地的形成;中生代晚期,板块运动导致盆地区域开始隆起,形成了一个相对较高的陆地,海相和湖相环境逐渐退去,取而代之的是陆相的沉积物;随着地壳板块的再次活动,柴达木盆地开始发生沉降,形成 4 个相对较低的凹陷地带;在新生代,印度板块和欧亚板块之间的构造运动仍在继续,导致盆地中的地壳继续隆起和沉降(王桂宏等, 2006; Meng and

Fang, 2008; Cheng *et al.*, 2015; 潘彤等, 2022)。经过近半个世纪的勘探,已在盆地北部侏罗系、西部第三系和东部第四系发现了丰富的油气资源,在新生界中发现大量盐类矿产(张彭熹, 1987; 张冰清和尹成明, 2005; 谭彦虎等, 2006; 潘彤等, 2024)。在第四纪期间,伴随高原强烈隆升,柴达木盆地发生剧烈的相对沉降,第四系最大厚度达 2800 m 以上,且多为连续沉积,构造变动较弱,地层保存完整。一些中外学者认为柴达木盆地第四纪沉积物所记录的地质事件是当前世界上最完整齐全的(张彭熹, 1987; 沈振枢等, 1993),是使用现代多学科综合研究方法研究第四系的理想场所,其研究成果对全球第四纪地层和古气候的研究也具有十分重要的意义。

盆地内已发现并探明储量和资源量的盐类矿产 12 种,氯化钾、氯化镁和氯化锂等资源储量居全国首位(张彭熹, 1987; 潘彤等, 2024);为保证

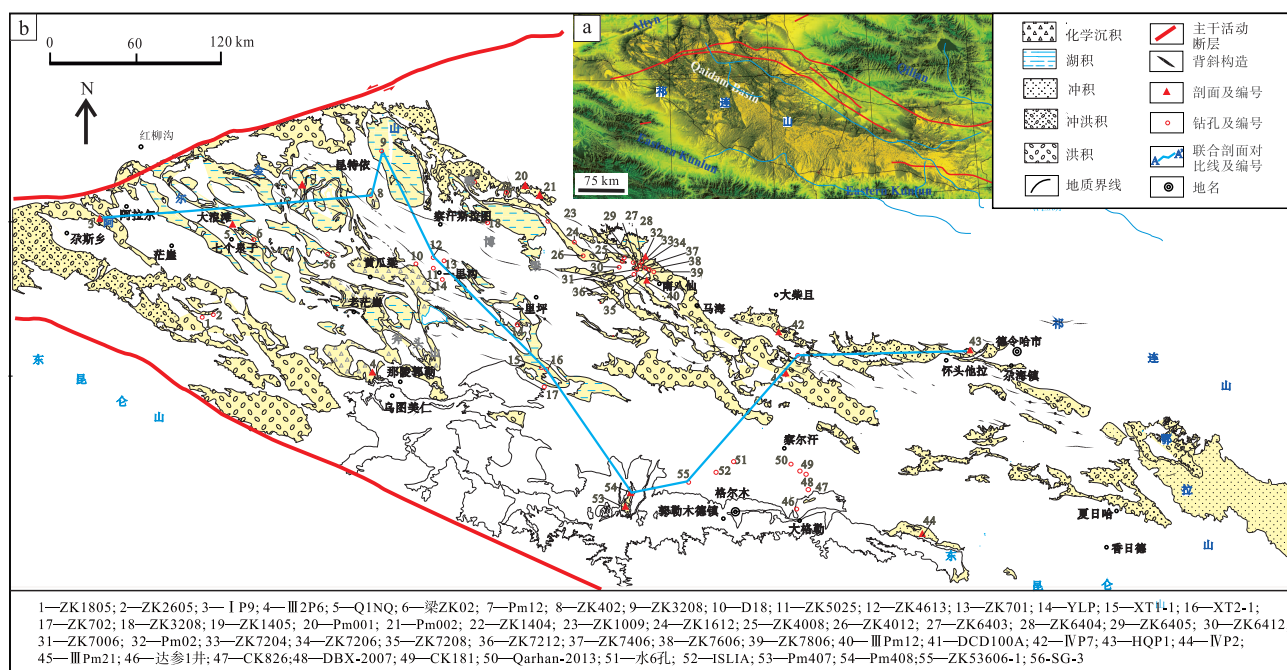


图 1 柴达木盆地遥感影像图 (a) 及地质简图 (b)

Fig. 1 Remote sensing image map (a) and geological sketch map (b) of Qaidam Basin

中国对钾盐的急需，尽快查明该盆地以钾为主的盐矿资源，急需加强钾盐矿床形成条件及找矿预测研究。但是，以往对盐类矿床、特别是钾盐矿床的赋存层位第四纪地层的研究程度甚差，难以满足钾盐矿床形成条件及找矿预测研究的要求。沈振枢等（1993）对柴达木盆地第四纪含盐地层进行了地层学、沉积学和年代学等方面的详尽研究，为柴达木盆地第四纪地质研究奠定了坚实的基础；早在1984年杨治林对柴达木盆地新生代岩相古地理及其演化做了初步分析，对寻找油气具有重要的意义（杨治林，1984）；后期众多学者运用地质露头、钻井、测井和地震资料对盆地内油气和盐类矿产勘探区的沉积相类型、展布及物源等方面进行了研究（党玉琪等，2004；张克信等，2010；Zhang *et al.*, 2013；苏妮娜等，2014；张金明等，2021）。截至目前研究工作大多以油气为对象主要集中在柴北缘等局部地区，而将柴达木全盆地作为一个整体的岩相古地理研究程度较低，沉积相划分较粗。晚更新世作为柴达木盆地最主要的盐类形成时期之一（张彭熹，1987；潘彤等，2024），对柴达木盆地晚更新世沉积相进行综合研究，明确全盆地晚更新世沉积相发育的类型和空间展布特征，分析沉积相演化历史，研究结果对柴达木盆地盐类矿产勘探

取得新突破具有一定的理论和现实意义。

利用普查深孔剖面,采用磁性地层学、同位素年代学、孢粉气候地层学、沉积岩石学等方法进行综合研究,划分了柴达木盆地上更新统成因类型,并结合沉积物的组成与结构构造的研究,查明沉积相和沉积环境的演化与成盐作用的关系。对于明确晚更新世含盐地层层位和储集层的空间分布规律、寻找有利勘探方向具有重要意义。

2 区域地质概况

柴达木盆地属秦祁昆地层大区、东昆仑—柴达木地层区、柴达木盆地地层分区（青海省地质调查院，2023）；盆地的基底主要由前寒武纪—三叠纪的变质岩、岩浆岩、浅变质沉积岩组成。印支运动后，柴达木盆地全面进入陆相盆地发展阶段，在基底之上沉积了巨厚的中、新生界地层，地层分布严格受盆地构造演化控制，具有明显的分区性，即中生界主要分布于柴北缘，古近系、新近系主要分布于西部，第四系主要分布于东部。其中古近纪—新近纪地层研究比较深入，认识较为统一，划分为：始新统路乐河组、晚始新统下干柴沟组、渐新统上干柴沟组、中新统下油砂山组、中新统上油砂山组、上新统狮子沟组（Zhang *et al.*, 2010；张克

信等, 2010; 姜营海等, 2013; Ji *et al.*, 2017; 李莎等, 2019)。针对第四系划分, 目前尚未达成广泛共识, 部分学者将第四系划分为下更新统一中更新统七个泉组、上更新统达布逊组和全新统盐桥组(顾树松等, 1990; 刘泽纯等, 1990; 朱筱敏等, 2002; 付锁堂等, 2013); 部分学者将盆地中心以湖相为主的地层划分为下更新统阿尔拉组、中更新统尕斯库勒组、上更新统察尔汗组和全新统达布逊组(沈振枢等, 1993; 潘彤等, 2022, 2024), 主体为 1 套细碎屑岩夹盐类沉积组合, 其中上更新统察尔汗组和全新统达布逊组为盆地内最主要的含盐地层(沈振枢等, 1993; 潘彤等, 2022)。

柴达木盆地四周均以深大断裂与相邻构造单元相隔, 阿尔金南缘断裂、土尔根大坂—宗务隆山南缘断裂和昆北断裂边界断裂(图 1-b)对柴达木盆地的形成与演化过程具有重要的控制作用。部分学者通过研究将盆地内断裂分为北西向、北东向和北北西向 3 组(戴俊生和曹代勇, 2000; 余一欣等, 2005; Mao *et al.*, 2014; 付锁堂等, 2015; Nie *et al.*, 2020), 其中北西向断裂以分布广、规模大、活动时间长为特点在盆地内占主体地位, 该断裂不但控制了盆地内的地层展布特征, 对构造形成也有明显的控制作用; 北东向断裂主要分布于阿尔金山前等地区, 该组断裂的形成演化主要受控于阿尔金走滑断裂带; 北北西向断裂主要分布于盆地西南部的尕斯断陷内, 该组断裂被夹于北西向断层之间, 主要形成于北西向断层的扭动作用机制下。

昆仑山对盆地方向的推挤和阿尔金断裂的左旋走滑, 使盆地整体处于挤压扭张的应力环境, 形成了一系列北西西向的褶皱, 表现为背、向斜构造相间排列, 成群成带出现的构造格局(Yin *et al.*, 2002; 高先志等, 2003; 曹国强等, 2005; 吴光大等, 2006)。盆地内褶皱构造共 248 个, 其中背斜 215 个, 向斜 33 个(图 1-b), 目前已验证蕴含卤水矿的背斜构造有南翼山、狮子沟等 27 个(潘彤等, 2024)。以小柴旦—甘森为界, 以西褶皱构造较发育, 以东褶皱构造不发育。戴俊生和曹代勇通过研究认为褶皱构造主要与断裂带的持续活动和断块的持续隆升活动相关, 具有同生褶皱的形成过程(戴俊生和曹代勇, 2000; 曹国强等, 2005; 吴光大等, 2006; Zhou *et al.*, 2006; 李兰斌等, 2012)。

3 沉积相类型及特征

3.1 沉积相类型

柴达木盆地上更新统组成比较复杂, 沉积物大致分为砾石层、砂层、黏土层和盐岩层 4 大类; 盆地边部以砾石层、砂层为主, 沉积厚度 1~45 m 不等; 盆地中心以黏土层、盐岩层为主, 沉积厚度 150~300 m。系统收集和分析了柴达木盆地晚更新世 56 个钻孔、露头剖面资料(图 1), 通过对钻井、剖面中岩石的颜色、结构、构造、成分、含矿性及动植物化石等研究, 明确了柴达木盆地晚更新世的沉积相类型为冲积扇相、辫状河相、湖泊三角洲相、淡水湖相、咸水湖相 5 类沉积相和 15 类沉积亚相(表 1)。

3.2 沉积相特征

3.2.1 冲积扇相

冲积扇相在谷口处形成从山地向盆地倾斜的扇形堆积体, 主体由砾岩、粗砂岩等组成, 通过对那棱郭勒河阶地剖面(Pm407)、尕斯乡东沟沟口阶地剖面(I P9)分析, 厚数米至百余米, 呈明显冲积扇地貌, 经后期改造成大片戈壁滩, 在沟口及沟谷地带, 多分布于阶地之上, 由于风化与剥蚀作用常以角度不整合覆盖于古一新近系或下、中更新统之上, 其上多被全新统冲洪积分割并覆盖。可进一步划分为扇根亚相、扇中亚相和扇端亚相 3 类。

茫崖县尕斯乡东沟沟口剖面(I P9)(图 2)总厚度为 96.1 m, 由灰色半固结的砾岩(石)层夹透镜状砂岩层组成, 砾石略显磨圆及定向性, 砾径 5~20 cm, 泥砂质胶结; 砂岩呈透镜状, 显示层理, 该套堆积物中未见化石, 获得热释光年龄分别为 34.0 ka、38.1 ka。

Ⅲ级阶地: 晚更新世洪积砾石层, 砾石扁平面顺层或略呈叠瓦状排列, 古水流方位为 65°(图 3-a)(43.5 m)

Ⅱ级阶地: 晚更新世洪积砾石层。见有 0.5~1.5 m 厚的粗砂岩呈透镜状产出(图 3-b)(52.6 m)

——侵蚀接触——

I 级阶地: 全新世冲积砂砾石层

1) 扇根亚相。分布于冲积扇体根部, 顶端靠近山口, 沉积坡度较大, 常发育有直而深的主河道。尕斯乡东沟沟口剖面(I P9)(图 2)上部为扇根亚相, 由泥质砾岩、砂质砾岩、砂砾岩和含砾

表 1 柴达木盆地上更新统沉积相划分

Table 1 Sedimentary facies division of the Upper Pleistocene of Qaidam Basin

沉积相	亚相	主要分布地区	岩性组合	沉积构造	古生物特征
冲积扇	扇根	昆仑山、祁连山和阿尔金山的山前地带	灰红色砾岩为主，分选中等，砾石呈次棱角状—浑圆状，单层厚度大	板状交错层理、波状交错层理、槽状交错层理	极少植物碎片化石
	扇中		红色、棕红色砂岩、砾状砂岩为主	叠瓦状构造、递变层理、交错层理	极少植物碎片化石
	扇端		红色、棕红色中、粗砂岩夹粉砂岩、泥岩	平行层理、沙纹层理及小型板状层理、冲刷—充填构造	极少植物碎片化石
辫状河	河道	茫崖、乌图美仁、大格勒、夏日哈地区	棕红—灰色含砾砂岩，中细砂岩夹同色泥岩	流水波痕、板状交错层理、波状交错层理、槽状交错层理、叠瓦状组构	小玻璃介、球星介和少量轮藻化石
湖泊三角洲	平原	阿拉尔、大柴旦、怀头塔拉、尕海、团结湖、东台吉乃尔等地	灰—灰红色粉砂岩、泥岩和少量泥灰岩，局部发育细砂岩；胶结物有泥、铁质及碳酸盐质	水平层理、板状交错层理、波状交错层理，虫孔等沉积构造	少量植物碎片化石
	前缘		灰色—紫红色粉砂岩、泥岩和泥灰岩，偶见鲕粒灰岩、生物碎屑灰岩	楔形交错层理、波状交错层理，水平层理	少量植物碎片化石
	前三角洲		黄绿、灰绿色细砂岩、粉砂岩与泥岩，夹粗砂岩、细砾岩，偶见棕红色泥岩层	发育小型板状交错层理、平行层理	大量植物屑化石
淡水湖	滨湖	西台吉乃尔湖—乌拉斯台一带、怀头塔拉—尕海一带	浅灰—黄灰色泥岩、砂质泥岩、泥灰岩，夹薄层状粉砂岩	双向交错层理、脉状、透镜状层理	见柳水桥螺及介形类化石，生物潜穴和生物扰动构造
	浅湖	涩聂湖—霍布逊湖一带、可鲁克湖	灰—灰黑色碳酸盐岩、泥岩，夹少量薄层状或透镜状粉砂岩	缓波状层理、平行沙纹层理、微斜沙纹层理	含轮藻化石、介形类化石，少见生物潜穴
	深湖	别勒滩、可鲁克湖、尕海	暗色泥岩建造，夹泥灰岩、钙质泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩	水平层理，缓波状层理	见少量介形类化石，常见生物钻孔和生物扰动构造
咸水湖	滨湖	马海、昆特依、大浪滩、察汗斯拉图、茫崖湖、尕斯库勒湖、甘森—一里坪、大柴旦湖	盐类为主，夹粉砂层及黏土层	微细水平层理发育，盐岩可有揉皱构造	仅见介形碎片
	浅湖	宗马海湖、昆特依、大浪滩、尕斯库勒湖、大柴旦湖	以盐、泥互层为主，夹薄层粗碎屑	水平层理	未见生物化石
	深湖	昆特依	沉积物以盐类矿物为主，盐层较纯，局部含淤泥等	纹层与交替纹层构造	未见生物化石
	盐泥坪	油沙山	以粉砂黏土为主，表面有盐壳或盐霜	波状弯曲的层理	少量植物化石、生物钻孔和动物脚印
	干盐滩	大熊滩、大风山—一里坪、盐滩、南里滩、伊克雅乌汝、油沙山	主要沉积物是石盐，有时有石膏，碎屑物较少	干缩裂纹	少量生物钻孔和动物脚印

粗砂岩、砾石质砂泥岩组成，亦可见角砾岩。沉积物粒度粗，分选和磨圆较差，显杂基支撑结构和碎屑支撑结构，呈杂乱块状堆积，单层厚度大，可见多个洪积砂砾岩透镜体叠置而形成的巨厚层堆积（图 3-a），主要为泥石流和辫状砾质河道沉积，在平面上呈向扇顶收缩状。

2) 扇中亚相。位于冲积扇的中部，I P9（图 2）中部为扇中亚相，以砂岩和含砾砂岩为主，沉积厚度大，砾岩的单层厚度可达 10 m，往盆地

内部由于碎屑物搬运距离加长，其磨圆度、分选型变好，具叠瓦状构造，不明显平行层理、交错层理和冲刷—充填构造（图 3-b），与下伏层呈冲刷接触。

3) 扇端亚相。出现于冲积扇的下部至外缘，地形平缓，沉积坡度角小，沉积物以漫流沉积为主。扇缘及扇侧缘主要为河流及洪水漫流沉积，I P9（图 2）下部为扇端亚相，以中、粗砂岩夹粉砂岩、泥岩为主，泥岩以红色、棕红色及紫红色为主

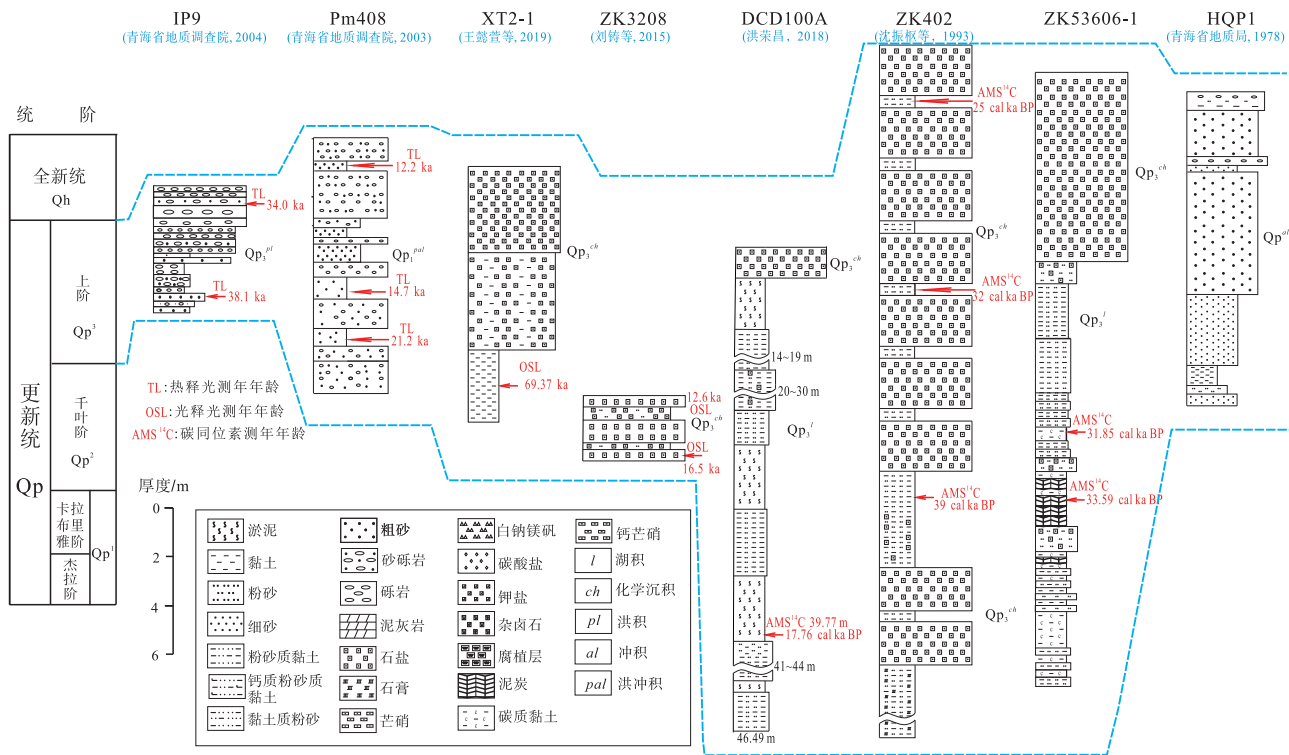


图 2 柴达木盆地上更新统联合柱状剖面图

Fig. 2 Joint column profile of the Upper Pleistocene of Qaidam Basin

(图 3-b)。沉积物分选较好，具平行层理、沙纹层理及小型板状层理、冲刷—充填构造等。粉砂岩、黏土岩可见显示块状层理、水平层理和变形构造以及干裂、雨痕等暴露构造。

3.2.2 辫状河相

地貌上构成山前大型洪冲积扇及山前倾斜平原，由砾石及粗砂组成，砾石成分与物源有关，较为复杂，磨圆度一般，为次棱角状，具有一定的分选性，表现为离物源区近，砾石较大；离物源区远，砾径变小的趋势，具有水平层理及砂质透镜体。格尔木市郭勒木德镇南沟中游剖面（Pm408）（图 2），地貌上形成 4 级阶地（图 3-c），岩性由砂砾岩、中粗砂岩等组成，粗粒的河道充填沉积在横向上不稳定，尖灭较快，多呈透镜状分布，砾石具叠瓦状构造，向上逐渐变为中、细砂岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩及薄层泥岩，组成向上变薄变细层序，砾石次圆—磨圆状，砂质充填；可见大、中型槽状交错层理、板状交错层理及平行层理，以及各种小型的交错层理和冲刷—充填构造等（图 3-d，

3-e，3-f）。

格尔木市郭勒木德镇南沟中游剖面（Pm408）（图 2）分为 18 层，总厚度为 106.32 m，在 3 层、11 层、16 层中分别获得热释光年龄为 21.2 ka、14.7 ka、12.2 ka^①。

（未见顶）

18 层：中砾砾石层（2 m）

17 层：灰褐色含砾粗砂层，局部夹有细砂透镜，发育交错层理（图 3-d）（13 m）

16 层：灰褐色含砾粗砂层夹细砂层，细砂层中发育斜层理（7 m）

15 层：灰褐色含砾粗砂层夹细砂层，细砂层发育斜层理，古水流方位 40°（图 3-e）（8 m）

14 层：灰褐色细砾石层与粗砂层互层，发育斜层理（6 m）

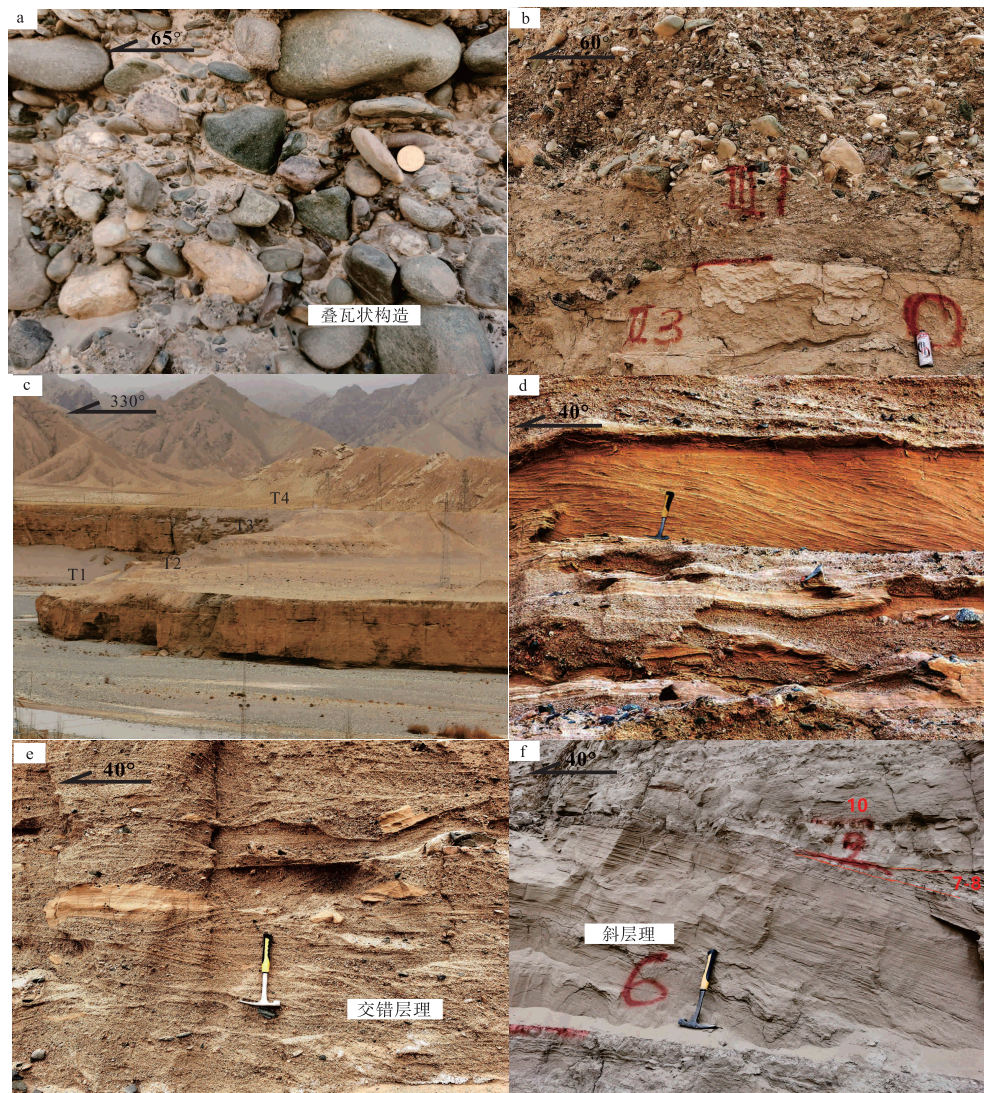
13 层：灰褐色粗砾石层夹粗砂透镜体（3 m）

12 层：灰褐色细砾石层夹粗砂层（2 m）

11 层：灰色细砂层，发育交错层理（5 m）

10 层：灰褐色中粗砂层，发育斜层理，古水

① 青海省地质调查院. 2003. 水泥厂幅、忠阳山幅、黑刺沟幅 1:5 万区域地质调查报告.



a—冲积扇相：砾石层堆积为扇根亚相，尕斯乡东沟；b—冲积扇相：下部砂—粉砂层为扇端亚相，上部具叠瓦状构造的砾岩和含砾粗砂层，底部具冲刷面为扇中亚相，尕斯乡东沟；c—辫状河相阶地地貌，郭勒木德乡南沟；d—辫状河相：下部和上部的砾—粗砂层，中部具板状交错层理砂层，郭勒木德乡南沟；e—含砾粗砂夹细砂透镜为辫状河相，郭勒木德乡南沟；f—粗砂与细砂互层，郭勒木德乡南沟

图 3 柴达木盆地上更新统冲积扇相、辫状河相典型特征

Fig. 3 Typical facies characteristics of the Upper Pleistocene of Qaidam Basin

流方向 40°(图 3-f)(3 m)

9 层：灰褐色砾石层，砾石呈叠瓦状排列 (2 m)

8 层：灰褐色粗砂层与砾石层互层，正粒序层理 (8 m)

7 层：灰褐色粗砂层与砾石层互层，韵律层理，分选一般 (7 m)

6 层：灰色中砾层夹粗砂岩，粗砂岩中发育交错层理 (2 m)

5 层：灰色粗砂层与砾石层，砾石呈叠瓦状排

(1 m)

4 层：灰色中砾砾石层，砾石呈叠瓦状排列 (2 m)

3 层：粗砂层夹砾石层，砾石定向排列，正粒序层理，水平韵律层理 (1 m)

2 层：中砾石夹粗砂岩层 (3 m)

1 层：灰色中砾砾石层 (2 m)

3.2.3 湖泊三角洲相

是辫状河相将陡坡或较缓坡的碎屑物质推进到滨浅湖地区形成的扇形堆积体，组成山前及山间冲

积平原。沉积物以粗碎屑为主,而在远离山前的滩面上,其粒度变细,地貌上往往以地台形式出现。在垂向序列上多具有自下而上变粗的特征。德令哈市尕海东剖面(HQP1)中岩性由砂砾石夹黄灰色粉砂与黏土透镜层,上覆有黄土状粉砂、亚砂层组成,交错层理发育,分选性不好。分为湖泊三角洲平原、湖泊三角洲前缘、前三角洲 3 个亚相。

德令哈市尕海东剖面(HQP1)(图 2)分为 4 层,总厚 117.3 m。剖面中缺乏年龄依据,虽然上更新统和全新统两者岩性上很相似,但是,上更新统以高级阶地形式产出,而全新统则呈低阶地、河漫滩产出^①。

(全新统风成砂)

——覆盖——

4 层:灰绿色细砂层,发育平行层理(图 4-a)(9.2 m)

3 层:灰绿色厚层细砂层及土黄色厚层粉砂泥(23.4 m)

2 层:灰绿色厚层砂砾岩夹细砂岩层,发育水平层理(图 4-b)(9.6 m)

1 层:杂色厚层—巨厚层含细砾砂砾层(77.1 m)

(未见底,为全新统冲洪积层覆盖)

1) 三角洲平原亚相:德令哈市尕海东剖面(HQP1)(图 2)下部为三角洲平原亚相,以杂色砾岩、砂砾岩、砂岩为主,顶部可见薄层粉砂岩。砂岩的成分成熟度低,杂基含量高,一般为岩屑杂砂岩和长石杂砂岩类,砾石成分复杂,磨圆度以次圆—次棱角状为主,分选较差,混杂结构,碎屑支撑,具有物源较近、坡度较大、快速堆积的特点。砂砾岩常见底部冲刷现象,冲刷面上见泥砾,向上依次发育粒序层理、块状层理、大型交错层理、平行层理;粉砂岩发育波状层理,含砂质团块。

2) 三角洲前缘亚相:HQP1(图 2)中部为三角洲前缘亚相,以大套灰色、灰绿色砾状砂岩、含砾砂岩、中粗砂岩、中细砂岩为主,顶部有薄层粉砂岩。砂砾岩结构成熟度低,一般为杂基支撑,颗粒多为次棱角状,分选较差—中等,砾状砂岩、含砾砂岩中的砾石呈次棱角状。砂砾岩底部具有冲刷面,冲刷面附近有泥砾和灰绿色砂砾,向上为粒序

层理,并常见叠覆冲刷构造。砂岩中可见斜层理和平行层理(图 4-b),见大量植物屑。

3) 前三角洲亚相:为三角洲相在湖盆中延伸最远的部分,HQP1(图 2)上部为前三角洲亚相,以灰绿色、浅灰色泥岩、粉砂质泥岩为主,夹少量薄层的粉砂岩、细砂岩;可见块状层理、水平层理、波纹层理、隐水平层理及生物扰动构造(图 4-a)。有机质含量高,含较多介形虫和菱铁矿。

3.2.4 淡水湖相

淡水湖相是柴达木盆地晚更新世期间最为发育的沉积相类型。大部分由钻孔揭示,通过对 DCD100A 钻孔、ZK53606-1 钻孔分析,岩性为褐灰色、灰色、褐黄色粉砂黏土、黏土粉砂及粉砂淤泥、黑色淤泥、局部出现含石盐粉砂淤泥和黏土粉砂夹薄盐层,出露厚度 3~5 m(图 4-c)。可进一步划分为淡水滨湖、淡水浅湖、淡水深湖 3 个亚相。

DCD100A 钻孔(图 2)岩心中自下而上共分 13 层,总厚 46.49 m。其中 1-10 层为淡水湖相沉积,11-13 层为化学沉积;厚 37.96 m,在 3 层中获得 ¹⁴C 年龄为 17.76 ka(洪荣昌,2018)。

(全新统化学沉积石盐层)

——整合——

13 层:顶部为坚硬盐壳,以下为松散盐晶,下层石盐较为致密坚硬(3.76 m)

12 层:石盐与黄色淤泥互层,在 3.76 m 和 3.98~4.0 m 处为黄色淤泥层(0.24 m)

11 层:石盐层,主要以细粒盐晶为主,局部夹有泥质石膏层(4.53 m)

10 层:黑色淤泥层,底部为黄泥层,伴有较多细粒状盐晶(0.74 m)

9 层:上部为较均匀粗中盐晶,10.5 m 处含较多灰白色泥质石膏(3.56 m)

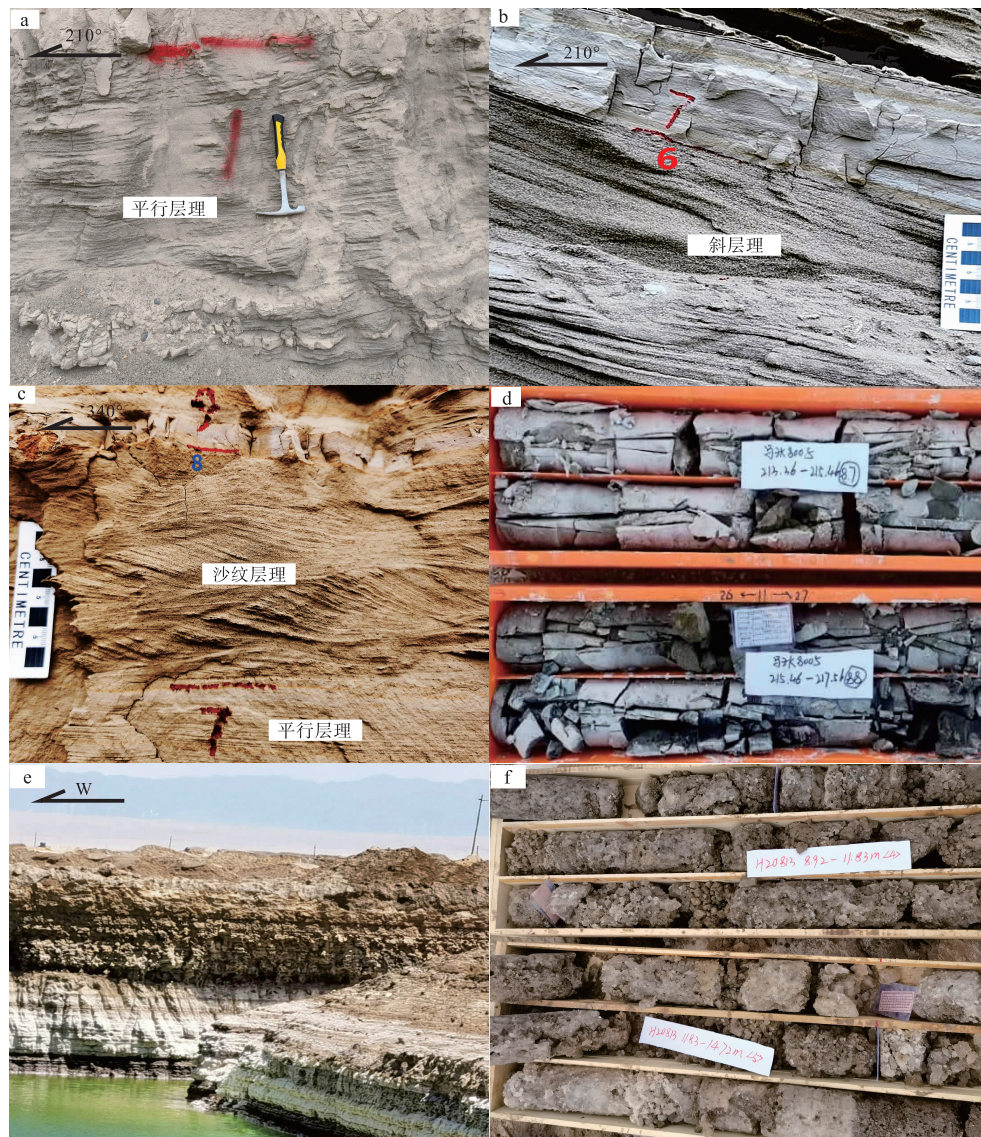
8 层:黄色粉砂质泥夹粗砂、细砂,中部含有结核,底部含有块状结核,疑似石膏(3.41 m)

7 层:灰色粉砂质泥和淤泥,向下逐渐过渡为黄色、灰色粉砂质泥,零星夹有盐晶(13.35 m)

6 层:灰色泥质粉砂层夹灰色泥层,发育水平层理(0.76 m)

5 层:黑色淤泥层,32.58~32.89 m 和 33.16~

① 青海省地质局. 1978. 德令哈旧址幅 1:20 万区调报告.



a—灰绿色细砂层为前三角洲亚相，德令哈尕斯海东；b—灰绿色砂砾岩夹细砂岩层为三角洲前缘亚相，德令哈尕斯海东；c—下部为具平行层理砂层为淡水滨湖亚相，中部具沙纹层理细—中砂层为淡水浅湖亚相，上部钙质泥岩为淡水浅湖亚相，都兰县西滩村；d—灰黑色淤泥层为淡水浅湖亚相，DCD100A 钻孔；e—盐类化学沉积层为咸水湖相，达布逊；f—灰白色石盐层为咸水深湖亚相，ZK3208 钻孔

图 4 柴达木盆地上更新统湖泊相和三角洲相典型特征

Fig. 4 Typical facies characteristics lacustrine and delta facies of the Upper Pleistocene of Qaidam Basin

32.89 m 有机质含量丰富 (3.41 m)

4 层：上部为灰色粉砂质泥，中下部为黄色淤泥和灰色粉砂质泥；其中 36.34~36.39 m 为石膏结核 (2.62 m)

3 层：灰色、黑色淤泥互层；39.26~39.36 m 和 39.72~39.86 m 处有机质含量丰富 (图 4-d) (2.63 m)

2 层：上部含一层粉砂，中下部为灰色泥质粉砂、细砂及黑色淤泥层 (4.5 m)

1 层：上部为灰色淤泥层，中下部为灰色粉砂

质泥，底部为青灰色淤泥 (2.18 m)

整合

(中更新统湖相沉积)

1) 淡水滨湖亚相：分布于湖盆边缘，为洪水期与枯水期水面之间的地带。其沉积环境特点是距岸最近，接受来自湖岸的粗碎屑物质；水动力条件复杂，水位较浅，沉积物接近水面，有时出露水面，氧化作用强烈。ZK53606-1 钻孔 (图 2) 下部为淡水滨湖亚相，以棕灰、杂色、绿、灰绿、浅灰色砂岩、泥岩、砂质泥岩为主，夹深色碳质粉砂

岩、灰绿的泥质粉砂岩、粉砂质泥岩为常见。沉积构造丰富,常见小型平行层理、交错层理、波状纹层、上攀纹层、生物扰动等沉积构造(图 4-c);滨湖各种生物都很繁茂,底栖生物尤为发育。

2) 淡水浅湖亚相:位于枯水期水面至浪基面之间的浅水地带,处于弱氧化—弱还原环境,水动力中等到弱,沉积物受波浪和湖流作用的影响明显。分布于涩聂湖—霍布逊湖一带、可鲁克湖地区,陆源碎屑物质供应不足,主要发育泥质浅湖,ZK53606-1 钻孔(图 2)上部为淡水浅湖亚相,岩石类型以黏土岩和粉砂岩为主,可夹有少量砂岩薄层或砂岩透镜体,陆源碎屑供应充分时可出现较多的细砂岩、砂岩胶结物以泥质、钙质为主,分选和圆度较好。层理类型多以水平、波状层理为主,水动力强度较大的浅湖区具小型沙纹层理(图 4-c),砂泥岩交互沉积时,可形成透镜状层理,有时层面可见对称浪成波痕;见有植物化石碎片、介壳化石和黄铁矿集合体,厚度可达数十米。

3) 淡水深湖亚相:位于浪基面之下的深水地带,水体最深,波浪作用已完全停止,水体安静,处于缺氧的还原环境,底栖生物完全不能共存,沉积物粒度细、颜色深、有机质含量高。分布于别勒滩、可鲁克湖、尕斯库勒湖地区。DCD100A 钻孔(图 2)为淡水深湖亚相,岩性主要为黑灰色、深灰色泥岩为主(图 4-d),并见石灰岩及泥灰岩,偶见粉砂岩薄夹层或砂岩透镜体,沉积构造单调,以水平层理为主,生物繁茂,多介形虫和生物介屑薄层,并偶见遗迹化石。

3.2.5 咸水湖相

由于湖泊水体矿化度的增高,在地层中出现大量盐类矿物,如石膏、芒硝、岩盐等,从而形成咸化湖泊或盐湖相沉积,通过对 XT2-1、ZK3208、ZK402 钻孔分析,岩性为灰黑色、深灰色、灰绿、棕黄、灰白色含石膏粉砂泥岩、泥岩或含石膏石盐粉砂泥岩夹灰白色含芒硝石盐、含钠镁矾、含杂卤石石盐,厚约 23~50 m(图 4-e)。昆特依地表出露为灰白色白色含芒硝、白钠镁矾、杂卤石粉砂石盐层夹含石膏淤泥、黏土和碳质淤泥层,厚约 53 m,其余地区地表大部分为盐渍化的岩石碎片、黏土粉砂组成的硬盐壳掩盖。可进一步划分为咸水滨湖、咸水浅湖、咸水深湖、盐泥坪、干盐滩 5 个亚相。

ZK402 钻孔(图 2)岩心中共分为 5 层,总厚 72.4 m。在 3、4、5 层中分别获得¹⁴C 年龄为 39.9 ka、32.5 ka、25 ka;该层中采集古地磁样品共计 18 件,平均每 4 m 采集 1 件,经测定后极性柱、磁倾角和磁偏角,整个层中均为正极性,相当于布容正极性时(沈振枢等,1993)。

(未见顶)

5 层:灰白色含黏土粉砂的石盐,顶底部含芒硝(10.22 m)

4 层:灰白色含石盐芒硝夹黑灰、灰绿色含粉砂淤泥(6.58 m)

3 层:灰白色石盐、含粉砂黏土的石盐,中部及底部含芒硝及白钠镁矾,32.00~35.54 m 为灰黑色淤泥夹层(25.58 m)

2 层:乳白色石盐芒硝、灰白色芒硝石盐夹灰绿色含粉砂淤泥(12.11 m)

1 层:灰黑、灰绿、灰褐色含石膏石盐的粉砂淤泥夹灰白色石盐(17.91 m)

整合

(中更新统化学沉积)

1) 咸水滨湖亚相:ZK402 钻孔(图 2)下部为盐湖滨湖亚相,岩性为灰褐色、青灰色、深灰色、灰黄色含石膏的粉砂黏土夹石盐层,灰黑色含石膏粉砂的淤泥、含粉砂淤泥;呈块层状或纹层状构造,处于富含有机质冲洪积扇前缘沼泽相沉积,为枯水期的产物;青灰色黏土粉砂呈厚层状或薄层状构造,为冲积扇前缘的河漫滩沉积,属丰水期的产物。该剖面基本处于盆地边缘,受淡水影响较大。盐岩层属干旱蒸发作用的产物。

2) 咸水浅湖亚相:ZK402 钻孔(图 2)上部为盐湖浅湖亚相,以盐泥互层为主要特征,可夹薄层粗碎屑。单层泥或盐厚 1~3 m,也常见 5~10 m 的泥盐交互厚层,均表明咸化与淡化交替,粗碎屑层为洪水期产物。盐层不纯,多含粉砂和黏土。

3) 咸水深湖亚相:ZK3208 钻孔(图 2)为盐湖深湖亚相,沉积物为盐类矿物,盐层较纯,局部含淤泥等,这是因反复淡化,致使盐类矿物结晶仅为石膏、石盐(图 4-f)。蒸发盐常见纹层与交替纹层构造,深水斜坡有滑塌重力流、块体流和浊积发育,标志有盐层扭曲、滑塌/破裂,以及角砾岩堆积,软沉积变形、侵蚀与冲刷痕。

4) 盐泥坪:盐泥坪是在冲积扇底以下至盐湖

滨岸或盐坪之间的环湖平原地带。主要特点是地势平坦,无明显的小河道和冲沟,地下水埋藏浅。岩性组合以浅灰色、灰黑色膏质泥岩、含膏泥岩与紫色、紫红色泥岩互层为特征,其沉积作用发生在风暴洪水期,洪水在广阔泥坪上的中央低洼处积水,形成小型的暂时性的盐沼沉积;黑色泥岩及块状泥岩夹粉砂岩条带中见水平层理,硬石膏沿灰色含膏泥岩层面、裂缝或呈云雾状分布;表面有盐壳或盐霜,见少量植物化石、沉积物中有时可见生物钻孔和动物脚印。

5) 干盐滩:沿湖岸发育、表面具坚硬盐壳的坪地,其地势较低,距湖水面的最大高度一般不超过 2 m,大多是原来石盐质的湖底因湖水退缩出露地表而成,只有小部分是地下咸潜水经毛细管蒸发沉积而成。盐坪上无植物生长。主要沉积物是石盐,有时有石膏,碎屑物较少,粉砂、泥质等碎屑物不规则地充填于石盐等蒸发盐矿物的晶间孔隙中,或在表面富集成不规则的薄层。盐坪表面的盐壳广泛发育多边形的干缩裂纹,形成时间较长的盐坪因受雨水反复溶解及风蚀、风积和毛细管蒸发再沉积作用的影响,表面坑洼不平,呈刀锋状,蜂窝状、蠕虫状小地貌。

4 岩相古地理特征

柴达木盆地在晚更新世因构造、气候的影响,盆地内的沉积相继续发生了演变,主要发育盐湖相、冲积扇相,辫状河相、湖泊三角洲相和淡水湖相沉积(图 5)。盐湖沉积相主要分布于盆地西北部,阿拉尔、大浪滩、察汗斯拉图、昆特依和马海地区;尕斯库勒湖盆进一步浓缩,由中心向外围依次发育盐湖浅湖亚相—盐湖滨湖亚相—干盐滩亚相—盐泥坪亚相沉积;大浪滩地区中部为盐湖滨湖亚相,在南翼山、尖顶山、小梁山形成独立的干盐滩,昆特依地区形成典型的同心环带状分布的盐湖深湖、浅湖、滨湖亚相;大柴旦、马海、一里坪地区形成了规模不等的盐湖滨湖浅湖沉积,晚更新世的盐湖相基本奠定了现今盐湖的雏形。淡水湖相沉积分布在一里坪—诺木洪一带,沉积中心位于达布逊湖地区为深湖亚相;涩聂湖—霍布逊湖一带为浅湖亚相;浅湖亚相外围大面积分布淡水湖滨湖亚相。德令哈盆地为一个统一的淡水湖,分别在可鲁克湖和尕斯库勒湖地区有 2 个沉积中心,可鲁克湖地区湖水

更深,形成深湖、浅湖、滨湖亚相的同心圆,尕斯库勒湖地区水深较浅,主要为滨湖亚相。冲积扇相大量分布于柴达木盆地周缘,形成冲洪积扇面,未形成扇三角洲,盆地北缘冲积扇面积缩小明显,南缘面积变化不大;由盆地周缘向盆地中心依次发育冲积扇扇根、扇中、扇端亚相。根据柴达木盆地晚更新世古水系的分布特点,盆地周缘发育数条河流,为辫状河相,分布于阿拉尔、乌图美仁、大格勒、夏日哈、怀头塔拉等地区,同样辫状河相在盆地北缘面积变化明显,南缘变化不大。河流入湖后形成湖泊三角洲相沉积,由边缘向中心依次发育湖泊三角洲平原、湖泊三角洲前缘、前三三角洲亚相。

5 沉积古地理演化

晚更新世,在构造运动的影响下,柴达木盆地周边山体及内部隆起区范围迅速扩大,冷湖构造、鄂博梁、红三旱、碱石山等构造再度隆升,柴达木古湖被完全肢解,大浪滩、察汗斯拉图、昆特依和马海等分割成彼此互不相连的多个小湖泊,孤立湖盆的湖水急剧浓缩;尕斯库勒湖盆进一步浓缩,晚更新世出现较多芒硝和白钠镁矾,并可见杂卤石等,夹粉砂淤泥等碎屑薄层,受来自阿尔金山的淡水输入,湖盆周缘发育盐泥坪;大浪滩被南翼山—红沟子—黄瓜梁、尖顶山—黑梁子—长尾梁、小梁山等进一步分隔,形成 3 块独立的干盐滩,在大浪滩中部的盐类沉积为石盐、石膏、钙芒硝和白钠镁矾,夹含粉砂淤泥等碎屑沉积(如 ZK402 钻孔和 ZK336 钻孔);察汗斯拉图与大浪滩完全隔离,其以石盐沉积为主,夹含石膏的黏土或淤泥(如 ZK3208 钻孔和 ZK4613 钻孔),也处于盐湖滨湖浅湖环境;昆特依盆地晚更新世接受来自北北西方向的物源和淡水输入,但仍处于盐湖环境,水深较深;马海盆地由于赛什腾山前断裂活动及冷湖构造的再度隆起,盆地更为狭长,其间除石盐外,还含有一定量的芒硝、杂卤石、钾石盐、白钠镁矾等矿物(如 ZK7204 钻孔)(魏新俊等,1993);盆地东南部接受来自南西、南东和西向物源输入,在盆地中相对水量丰富,一里坪地区,岩性以含粉砂淤泥和含粉砂黏土为主,顶部出现石盐和少量石膏(如 ZK701 钻孔、YLP),察尔汗地区的上更新统岩性为粉砂、含黏土粉砂、黏土质粉砂与粉砂质

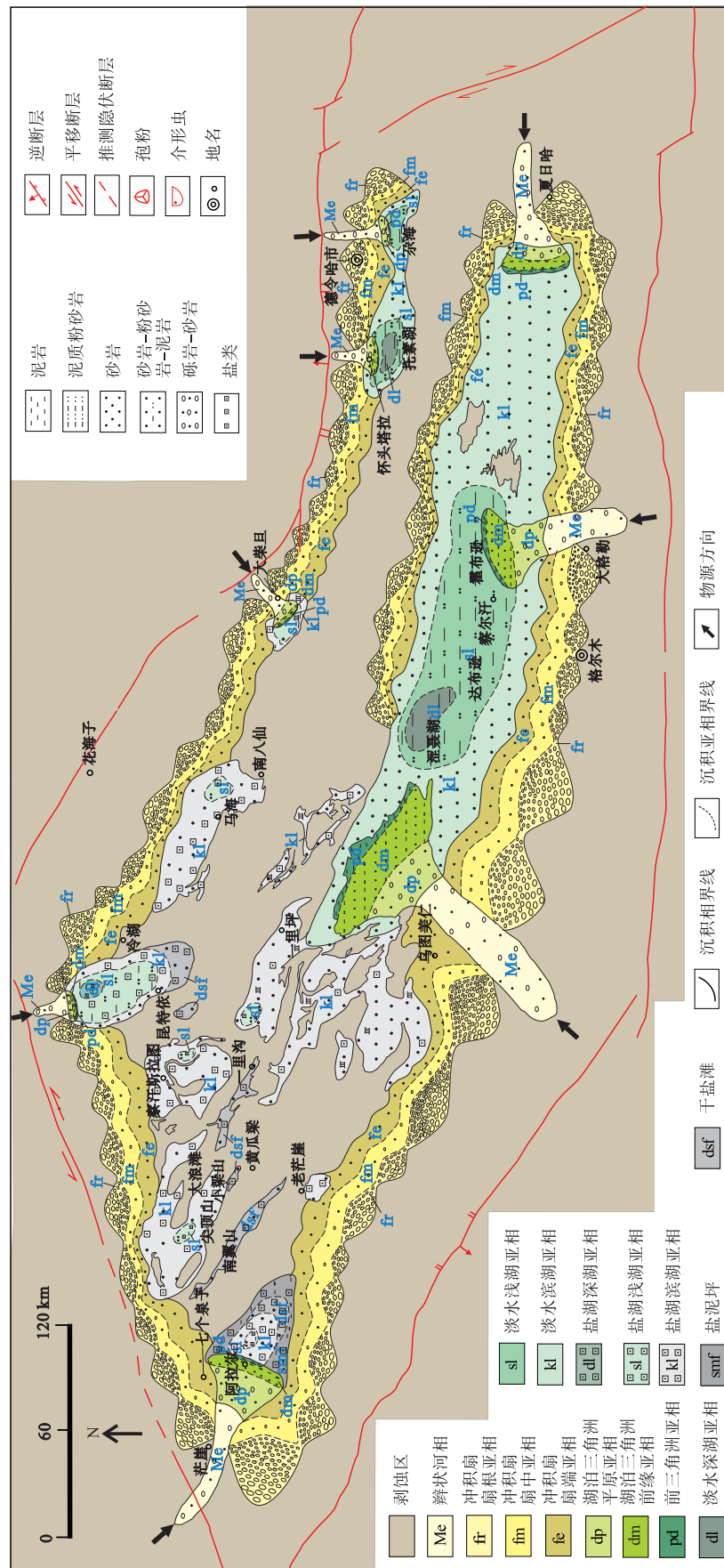


图 5 柴达木盆地晚更新世岩相古地理图

黏土互层,中部偶夹腐殖质层,上部为含粉砂石盐和含石盐、石膏的粉砂。在察尔汗盐湖别勒滩地区详细研究了 2 个晚更新世钻孔剖面(ZK53606—1 钻孔和 ZK53630—1 钻孔),主要发育晚更新世湖积。其中 ZK53630—1 钻孔中下部以泥炭为主,夹黏土和粉砂泥质团块,上部为含粉砂黏土和黏土质粉砂,含石膏等盐类矿物;ZK53606—1 钻孔下部主要为碳质黏土与含黏土粉砂,夹泥炭含粉砂石盐层,中部为含黏土粉砂和粉砂质黏土,上部为石盐层。对 ZK53630—1 钻孔中的介形类及其伴生化石的研究显示察尔汗地区在晚更新世晚期(MIS3a)主体仍为淡水—微咸水湖泊(宋博文等,2023),MIS2 之后,随着柴达木盆地的干旱化显著加剧(陈安东等,2020),察尔汗地区发育石盐层(Chen and Bowler,1986;孙镇城等,2003)。柴北缘大柴旦盐湖的 DCD100A 钻孔的上更新统以淤泥、粉砂和泥质粉砂等碎屑沉积为主,上部含石盐晶粒,说明大柴旦盐湖自晚更新世晚期至全新世经历了淡水湖—微咸水湖—半咸水湖—盐湖的演化阶段。值得注意的是,大柴旦盐湖的这一演化阶段较之察尔汗盐湖咸化时间更晚,并且其盐类矿物以硼酸盐为主(高春亮等,2015)。说明由于马海—大红沟凸起的隆升阻隔了本小区与昆北逆冲带地层分区东部地层小区的物质交流,该地区的气候环境演化与柴东南地区有显著区别。德令哈盆地的汇水中心,主要接受来自北部南祁连的物源和淡水输入。

6 结论

1) 柴达木盆地晚更新世发育冲积扇相、辫状河相、湖泊三角洲相、淡水湖相、咸水湖相 5 类沉积相和 15 类沉积亚相;盆地边缘发育冲积扇相,辫状河相主要分布于阿拉尔、乌图美仁、大格勒、夏日哈、怀头塔拉等地区,大浪滩、察汗斯拉图、昆特依、马海、一里坪地区为盐湖相,察尔汗、大柴旦地区主体仍为淡水—微咸水湖泊相,尕斯库勒湖、托素湖为一个统一的淡水湖。

2) 晚更新世柴达木盆盐类沉积主要形成于盆地西、北部大浪滩、察汗斯拉图、昆特依、马海、尕斯库勒湖地区,东部的察尔汗地区在晚更新世后期干旱化加剧,上部地层中发育少量石盐层。

参考文献 (References)

- 曹国强,陈世悦,徐凤银,彭德华,袁文芳. 2005. 柴达木盆地西部中—新生代沉积构造演化. 中国地质,32(1): 33–39. [Cao G Q, Chen S Y, Xu F Y, Peng D H, Yuan W F. 2005. Ceno-Mesozoic sedimentary and tectonic evolution in the western Qaidam Basin. *Geology in China*, 32(1): 33–39]
- 陈安东,郑绵平,宋高,王学锋,李洪普,韩光,袁文虎. 2020. 晚第四纪 MIS6 以来柴达木盆地成盐作用对冰期气候的响应. 地质论评,66(3): 611–624. [Chen A D, Zheng M P, Song G, Wang X F, Li H P, Han G, Yuan W H. 2020. Evaporite deposits in the Qaidam Basin and their response to Quaternary glacial climates since marine oxygen isotope stage 6 (MIS6). *Geological Review*, 66(3): 611–624]
- 戴俊生,曹代勇. 2000. 柴达木盆地构造样式的类型和展布. 西北地质科学,21(2): 57–63. [Dai J S, Cao D Y. 2000. The type and distribution of structural style in Qaidam Basin. *Northwest Geoscience*, 21(2): 57–63]
- 党玉琪,尹成明,赵东升. 2004. 柴达木盆地西部地区古近纪与新近纪沉积相. 古地理学报,6(3): 297–306. [Dang Y Q, Yin C M, Zhao D S. 2004. Sedimentary facies of the Paleogene and Neogene in western Qaidam Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 6(3): 297–306]
- 付锁堂,张道伟,薛建勤,张晓宝. 2013. 柴达木盆地致密油形成的地质条件及勘探潜力分析. 沉积学报,31(4): 672–682. [Fu S T, Zhang D W, Xue J Q, Zhang X B. 2013. Exploration potential and geological conditions of tight oil in the Qaidam Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 31(4): 672–682]
- 付锁堂,马达德,郭召杰,程丰. 2015. 柴达木走滑叠合盆地及其控油气作用. 石油勘探与开发,42(6): 712–722. [Fu S T, Ma D D, Guo Z J, Cheng F. 2015. Strike-slip superimposed Qaidam Basin and its control on oil and gas accumulation, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 42(6): 712–722]
- 高春亮,余俊清,闵秀云,何先虎,成艾颖,辛首臻,洪荣昌,刘永,张丽莎. 2015. 大柴旦盐湖化学沉积特征及其控制因素. 盐湖研究,23(1): 22–29. [Gao C L, Yu J Q, Min X Y, He X H, Cheng A Y, Xin S Z, Hong R C, Liu Y, Zhang L S. 2015. Chemical sedimentary sequence from subbottom sediment profiles of da Qaidam salt lake in Qaidam Basin and its controlling factors. *Journal of Salt Lake Research*, 23(1): 22–29]
- 高先志,陈发景,马达德,汪立群,刘震. 2003. 中、新生代柴达木北缘的盆地类型与构造演化. 西北地质,36(4): 16–24. [Gao X Z, Chen F J, Ma D D, Wang L Q, Liu Z. 2003. Tectonic evolution of the Northern Qaidam Basin during Mesozoic and Cenozoic eras. *Northwestern Geology*, 36(4): 16–24]
- 顾树松,徐旺,薛超,邸世祺,杨蓬,狄恒恕,赵大年. 1990. 中国石油地质志(青藏油气区). 北京: 石油工业出版社,260. [Gu S S, Xu W, Xue C, Di S Q, Yang P, Di H S, Zhao D N. 1990. *Petroleum Geology of China (Qinghai-Tibet Oil and Gas Region)*. Beijing: Petroleum Industry Press, 260]

- 洪荣昌. 2018. 大柴旦盐湖沉积演化: 西风带古气候记录及镁硼酸盐矿床成因. 中国科学院大学博士学位论文. [Hong R C. 2018. Sedimentary evolution of da oaidam salt lake associated with westernlies paleoclimate change and constraints on the Mg-borate deposit formation. Doctoral dissertation of University of Chinese Academy of Sciences]
- 姜营海, 任世霞, 王鹏, 杨书逸, 吕宗伦. 2013. 柴达木盆地西南区第三纪地层对比与划分. 地层学杂志, 37(1): 58–61. [Jiang Y H, Ren S X, Wang P, Yang S Y, Lü Z L. 2013. Tertiary stratigraphic correlation and subdivision in the southwestern Qaidam Basin. Journal of Stratigraphy, 37(1): 58–61]
- 李兰斌, 孙家振, 夏晓燕, 蒋武明, 吴光大. 2012. 柴达木盆地西南地区褶皱构造样式. 石油实验地质, 34(1): 30–35. [Li L B, Sun J Z, Xia X Y, Jiang W M, Wu G D. 2012. Fold structure pattern in southwestern Qaidam Basin. Petroleum Geology & Experiment, 34(1): 30–35]
- 李莎, 王贺, 崔庆岗, 张树淇, 王启飞, 张海春. 2019. 柴达木盆地宗马海湖地区中新统上油砂山组轮藻植物群. 地层学杂志, 43(4): 343–351. [Li S, Wang H, Cui Q G, Zhang S Q, Wang Q F, Zhang H C. 2019. Miocene charophyte flora from the shangyoushashan formation in Zongmahaihu area, Qaidam Basin, Northwest China. Journal of Stratigraphy, 43(4): 343–351]
- 刘泽纯, 孙世英, 杨藩, 周翥虹. 1990. 柴达木盆地三湖地区第四纪地层学和其年代学分析. 中国科学(B辑), 20(11): 1202–1212. [Liu Z C, Sun S Y, Yang F, Zhou Z H. 1990. Analysis of Quaternary stratigraphy and chronology in Sanhu area, Qaidam Basin, China, Science in China(Series B), 20(11): 1202–1212]
- 刘铸, 高东林, 李斌凯, 袁小龙, 张岩, 李宝兰. 2015. 柴达木盆地昆特依盐湖大盐滩矿区杂卤石沉积特征及成因浅论. 盐湖研究, 23(1): 30–37. [Liu Z, Gao D L, Li B K, Yuan X L, Zhang Y, Li B L. 2015. Sedimentary characteristics and origin of polyhalite of Kuntay salt lake mine in Qaidam Basin. Journal of Salt Lake Research, 23(1): 30–37]
- 潘彤, 张金明, 李洪普, 李东生, 韩光, 贾建团, 袁文虎. 2022. 柴达木盆地盐类矿产成矿单元划分. 吉林大学学报(地球科学版), 52(5): 1446–1460. [Pan T, Zhang J M, Li H P, Li D S, Han G, Jia J T, Yuan W H. 2022. Division of salt minerals metallogenic units in Qaidam Basin. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 52(5): 1446–1460]
- 潘彤, 王贵仁, 薛万文. 2024. 中国矿产地质志·青海卷. 北京: 地质出版社. [Pan T, Wang G R, Xue W W. 2024. Geology of Mineral Resources in China (Qinghai Volume). Beijing: Geological Publishing House]
- 青海省地质调查院. 2023. 中国区域地质志·青海志. 北京: 地质出版社. [Qinghai Provincial Geological Survey Institute. 2023. Regional Geology of China, Qinghai. Beijing: Geological Publishing House]
- 沈振枢, 程果, 乐昌硕, 刘淑琴. 1993. 柴达木盆地第四纪含盐地层划分及沉积环境. 北京: 地质出版社. [Shen Z S, Cheng G, Le C S, Liu S Q. 1993. The Division and Sedimentary Environment of Quaternary Salt-bearing Strata in Qaidam Basin. Beijing: Geological Publishing House]
- 宋博文, 柯学, 宋泰忠, 张克信, 杨文军, 张金明, 张小瑾. 2023. 察尔汗钻孔介形类记录及其对察尔汗古湖晚更新世高湖面的指示. 地质学报, 97(10): 3168–3179. [Song B W, Ke X, Song T Z, Zhang K X, Yang W J, Zhang J M, Zhang X J. 2023. Ostracod records from a drill core in the Qarhan and its implications for Late Pleistocene high lake level in paleo-lake Qarhan. Acta Geologica Sinica, 97(10): 3168–3179]
- 苏妮娜, 金振奎, 宋璠, 顾军锋, 陈英, 张卫丹. 2014. 柴达木盆地古近系沉积相研究. 中国石油大学学报(自然科学版), 38(3): 1–9. [Su N N, Jin Z K, Song F, Gu J F, Chen Y, Zhang W D. 2014. Sedimentary facies of the Paleogene in Qaidam Basin. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 38(3): 1–9]
- 孙镇城, 曹丽, 张海泉, 张永华, 董宁, 乔子真, 孙乃达, 袁秀君, 路艳丽, 张宏欣. 2003. 柴达木盆地全球末次冰期介形类动物群的演变. 古地理学报, 5(3): 365–377. [Sun Z C, Cao L, Zhang H Q, Zhang Y H, Dong N, Qiao Z Z, Sun N D, Yuan X J, Lu Y L, Zhang H X. 2003. Evolution of Ostracoda of the great ice age of last glacial stage in Qaidam Basin. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 5(3): 365–377]
- 谭彦虎, 彭德华, 潘洪峰, 张冰清, 张晓峰, 张继红. 2006. 柴达木盆地天然气资源潜力及勘探方向. 中国石油勘探, 11(6): 42–44, 130. [Tan Y H, Peng D H, Pan H F, Zhang B Q, Zhang X F, Zhang J H. 2006. Potential of natural gas resource and its exploration direction in Qaidam Basin. China Petroleum Exploration, 11(6): 42–44, 130]
- 王桂宏, 谭彦虎, 陈新领, 马立协, 苏爱国, 张水昌, 张斌. 2006. 新生代柴达木盆地构造演化与油气勘探领域. 中国石油勘探, 11(1): 80–84, 8. [Wang G H, Tan Y H, Chen X L, Ma L X, Su A G, Zhang S C, Zhang B. 2006. Cenozoic tectonic evolution and oil/gas exploration field in Qaidam Basin. China Petroleum Exploration, 11(1): 80–84, 8]
- 魏新俊, 邵长铎, 王弭力, 赵德钧, 蔡克勤, 姜继学, 何国权, 胡文瑄. 1993. 柴达木盆地西部富钾盐湖物质成分、沉积特征及形成条件研究. 北京: 地质出版社. [Wei X J, Shao C F, Wang M L, Zhao D J, Cai K Q, Jiang J X, He G Q, Hu W X. 1993. Study on Material Composition, Sedimentary Characteristics and Formation Conditions of Potassium Rich Lake in Western Qaidam Basin. Beijing: Geological Publishing House]
- 王懿萱, 陈天源, 吴蝉, 赖忠平, 郭守栋, 丛禄. 2019. 柴达木盆地西台吉乃尔盐湖沉积的年代学研究. 干旱区地理, 42(4): 876–884. [Wang Y X, Chen T Y, Wu C, Lai Z P, Guo S D, Cong L. 2019. Chronological study on the sediment of Xitaijinar Salt Lake in the Qaidam Basin. Arid Land Geography, 42(4): 876–884]
- 吴光大, 葛肖虹, 刘永江, 袁四化, 巩庆林, 陈言忠, 沈亚. 2006. 柴达木盆地中、新生代构造演化及其对油气的控制. 世界地质, 25(4): 411–417. [Wu G D, Ge X H, Liu Y J, Yuan S H, Gong Q L, Chen Y Z, Shen Y. 2006. Mesozoic-Cenozoic structural evolution in Qaidam Basin and its control on hydrocarbon occurrence. Global

- Geology, 25(4): 411–417]
- 余一欣, 汤良杰, 马达德, 张跃中, 张启全, 谭万金. 2005. 柴达木盆地断裂特征研究. 西安石油大学学报(自然科学版), 20(3): 11–14, 87. [Yu Y X, Tang L J, Ma D D, Zhang Y Z, Zhang Q Q, Tan W J. 2005. Study on the features of the faults in Qaidam Basin. Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition), 20(3): 11–14, 87]
- 杨治林. 1984. 柴达木盆地一里平凹陷沉积环境探讨. 石油勘探与开发, 11(4): 31–38. [Yang Z L. 1984. Prospect for petroleum in Yiliping Depression in Qaidam Basin. Petroleum Exploration and Development, 11(4): 31–38]
- 张冰清, 尹成明. 2005. 柴达木盆地天然气资源潜力及发展战略. 中国工程科学, 7(S1): 83–86. [Zhang B Q, Yin C M. 2005. Natural gas resource potential and development strategy in Qaidam Basin. Engineering Science. (7)(S1): 83–85]
- 张彭熹. 1987. 柴达木盆地盐湖. 北京: 科学出版社. [Zhang P X. 1987. Salt Lake in Qaidam Basin. Beijing: Science Press]
- 张金明, 付彦文, 田成秀, 雷晓清. 2021. 柴达木盆地西部始新世晚期岩相古地理特征及盐岩成因. 地层学杂志, 45(4): 545–553. [Zhang J M, Fu Y W, Tian C X, Lei X Q. 2021. Lithofacies paleogeography and genesis of salt rock in the late Eocene of western Qaidam Basin. Journal of Stratigraphy, 45(4): 545–553]
- 张克信, 王国灿, 骆满生, 季军良, 徐亚东, 陈锐明, 陈奋宁, 宋博文, 梁银平, 张樵钰, 杨永锋. 2010. 青藏高原新生代构造岩相古地理演化及其对构造隆升的响应. 地球科学, 35(5): 697–712. [Zhang K X, Wang G C, Luo M S, Ji J L, Xu Y D, Chen R M, Chen F N, Song B W, Liang Y P, Zhang J Y, Yang Y F. 2010. Evolution of tectonic lithofacies paleogeography of Cenozoic of Qinghai-Tibet Plateau and its response to uplift of the plateau. Earth Science, 35(5): 697–712]
- 朱筱敏, 康安, 胡宗全, 徐子远. 2002. 柴达木盆地第四系层序地层特征与油气评价. 石油勘探与开发, 29(1): 56–60. [Zhu X M, Kang A, Hu Z Q, Xu Z Y. 2002. Quaternary sequence stratigraphy and hydrocarbon evaluation in Qaidam Basin. Petroleum Exploration and Development, 29(1): 56–60]
- Chen K Z, Bowler J M. 1986. Late Pleistocene evolution of salt lakes in the Qaidam Basin, Qinghai Province, China. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 54: 87–104.
- Cheng F, Jolivet M, Dupont-Nivet G, Wang L, Yu X J, Guo Z J. 2015. Lateral extrusion along the Altyn Tagh Fault, Qilian Shan (NE Tibet): insight from a 3D crustal budget. Terra Nova, 27: 416–425.
- Ji J L, Zhang K X, Clift P D, Zhuang G S, Song B W, Ke X, Xu Y D. 2017. High-resolution magnetostratigraphic study of the Paleogene–Neogene strata in the Northern Qaidam Basin: implications for the growth of the Northeastern Tibetan Plateau. Gondwana Research, 46: 141–155.
- Mao L G, Xiao A C, Wu L, Li B L, Wang L Q, Lou Q Q, Dong Y P, Qin S H. 2014. Cenozoic tectonic and sedimentary evolution of southern Qaidam Basin, NE Tibetan Plateau and its implication for the rejuvenation of Eastern Kunlun Mountains. Science China Earth Sciences, 57(9): 2726–2739.
- Meng Q R, Fang X. 2008. Cenozoic tectonic development of the Qaidam Basin in the northeastern Tibetan Plateau. The Geological Society of America Special Papers, 444: 1–24.
- Nie J S, Ren X P, Saylor J E, Su Q D, Horton B K, Bush M A, Chen W H, Pfaff K. 2020. Magnetic polarity stratigraphy, provenance, and paleoclimate analysis of Cenozoic strata in the Qaidam Basin, NE Tibetan Plateau. GSA Bulletin, 132: 310–320.
- Yin A, Rumelhart P E, Butler R, Cowgill E, Harrison T M, Foster D A, Ingersoll R V, Zhang Q, Zhou X Q, Wang X F, Hanson A, Raza A. 2002. Tectonic history of the Altyn Tagh fault system in northern Tibet inferred from Cenozoic sedimentation. GSA Bulletin, 114: 1257–1295.
- Zhang K X, Wang G C, Ji J L, Luo M S, Kou X H, Wang Y M, Xu Y D, Chen F N, Chen R M, Song B W, Zhang J Y, Liang Y P. 2010. Paleogene-Neogene stratigraphic realm and sedimentary sequence of the Qinghai-Tibet Plateau and their response to uplift of the plateau. Science China Earth Sciences, 53(9): 1271–1294.
- Zhang W L, Fang X M, Song C H, Appel E, Yan M D, Wang Y D. 2013. Late Neogene magnetostratigraphy in the western Qaidam Basin (NE Tibetan Plateau) and its constraints on active tectonic uplift and progressive evolution of growth strata. Tectonophysics, 599: 107–116.
- Zhou J X, Xu F Y, Wang T C, Cao A F, Yin C M. 2006. Cenozoic deformation history of the Qaidam Basin, NW China: results from cross-section restoration and implications for Qinghai-Tibet Plateau tectonics. Earth and Planetary Science Letters, 243(1–2): 195–210.

(责任编辑 王绍华 李新坡; 英文审校 李 攀)