

柴达木盆地新近纪—第四纪陆相盐湖钾盐成矿机理*

陈宗铭^{1,2}, 李江海^{1,2**}, 张永生³

(1: 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871)

(2: 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871)

(3: 中国地质科学院矿产资源研究所, 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室 / 自然资源部盐湖资源与环境重点实验室, 北京 100037)

摘要: 柴达木盆地位于青藏高原东北部, 其“高山深盆”构造格局和逾10km的新生代沉积厚度, 造就了中国最大的陆相盐湖型钾盐成矿带, 探明储量占全国总量的80%以上。新近纪以来, 盆地经历了多幕次构造变形, 在高原持续隆升和区域气候极端干旱化的共同背景下, 发育出察尔汗、大浪滩—黑北、昆特依与马海等次级凹陷, 构建了以卤水型为主、固—液共存的复合成矿体系, 其成矿过程由构造、气候、物源和沉积四维要素耦合控制。本文在系统梳理构造—沉积演化与古气候演变的基础上, 揭示了钾盐成矿的时空分布格局与控制机制。研究表明, 构造分异是决定卤水汇聚与储集格局的主导因素, 气候是驱动蒸发浓缩与矿化节律的关键动力, 物源供给通过“深—浅耦合”二元机制持续富集钾。结合岩相古地理分异, 更新世期间, 盆地沉积中心多次迁移, 柴达木盆地西北部不断干旱成盐。在系统分析成矿要素的基础上, 将钾盐成矿演化划分为五个阶段: 统一古湖沉降期、多级凹陷分化期、极端干旱浓缩期、断控承袭成矿鼎盛期及现代盐湖群阶段, 并可总结为三大成矿模式: 中部沉积中心型、前陆冲断带控矿型和西北部构造控矿型。该演化序列与模式不仅揭示了青藏高原隆升背景下盐湖成矿的动力学本质, 而且为我国深层卤水钾盐资源的找矿勘探与成矿模式创新提供了理论框架与实践指引。

关键词: 柴达木盆地; 盐湖; 钾盐矿床; 成矿机理; 富集成因;

Metallogenic Mechanism of Neogene-Quaternary Continental Salt Lake Potash in the Qaidam Basin

Chen Zongming^{1,2}, Li Jianghai^{1,2**} & Zhang Yongsheng³

(1: School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, P.R.China)

(2: Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing, 100871, P.R.China)

(3: MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment/MNR Key Laboratory of Saline Lake Resources and Environments, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, P.R.China)

Abstract: The Qaidam Basin, located on the northeastern margin of the Tibetan Plateau, is characterized by a “mountain-deep basin” structural framework and Cenozoic sedimentary fill exceeding 10 km, which has given rise to China’s largest continental saline-lake potash metallogenic belt, containing over 80% of the nation’s proven reserves. Since the Neogene, the basin has experienced multiple phases of tectonic deformation. Under the combined influence of plateau uplift and extreme regional aridification, secondary depressions such as Qarhan, Dalangtan-Heibei, Kuntayi, and Mahai have developed, forming a composite mineralization system dominated by brine-type deposits with the coexistence of solid-liquid mineralization. The potash-forming

* 2025-07-12 收稿; 2025-12-18 收修改稿。

国家重点研发计划项目(2023YFC2906501)资助。

** 通信作者; E-mail: jhli@pku.edu.cn。

process is jointly controlled by four-dimensional factors: tectonics, climate, provenance, and sedimentation. Based on a systematic review of tectono-sedimentary evolution and paleoclimate changes, this study reconstructs the spatiotemporal distribution and controlling mechanisms of potash mineralization. The results indicate that tectonic differentiation determined the framework of brine accumulation and storage, climate drove evaporation concentration and mineralization rhythms, while provenance supply promotes continuous potassium enrichment through a "deep-shallow coupling" binary mechanism. Combined with lithofacies-palaeogeographic differentiation, depositional centers migrated multiple times during the Pleistocene, leading to progressive aridification and salinization in the northwestern Qaidam Basin. Based on the comprehensive analysis of metallogenic factors, the evolution of potash mineralization in the Qaidam Basin can be divided into five stages: unified paleolake subsidence, multi-depression differentiation, extreme aridification and concentration, fault-controlled inheritance and metallogenic climax, and modern saline-lake cluster. Furthermore, three metallogenic models are identified: central sedimentary-center type, foreland thrust-belt-controlled type, and northwestern tectonically controlled type. This evolutionary sequence and model framework not only reveal the dynamic essence of saline-lake potash mineralization under the uplift of the Tibetan Plateau, but also provide a theoretical basis and practical guidance for deep brine exploration and the refinement of metallogenic models in China.

Keywords: Qaidam Basin; Salt Lake; Potash Deposit; Metallogenic Mechanism; Enrichment Genesis

柴达木盆地位于青藏高原东北部,是由板块汇聚形成的大型山间盆地。其独特的“高山深盆”构造格局孕育了中国最大的陆相盐湖型钾盐成矿带,钾盐探明储量占全国总量的80%以上^[1]。盆地内堆积了逾10 km厚的新生代沉积物,经历了多阶段构造演化^{[2][3]}。自新近纪以来,盆地内湖相与盐湖相交替演化,在次级凹陷富集盐类矿物。钾盐凹陷的形成促使盐类持续浓缩,高钾卤水富集,最终形成丰富的钾盐矿化系统^[4]。中国钾盐开发集中于柴达木和塔里木盆地,KCl储量为33,200.80万吨,2024年K₂O年产量为630万吨^[5]。柴达木盆地因特大型卤水钾矿资源和优良开采条件,现成为我国最大的钾盐产区^[6]。盆地钾盐储量丰富,以液态卤水钾盐矿为主,固体钾盐矿相对较少^[7]。

钾盐资源在空间上集中分布于盆地西部与南部,主要包括包括察尔汗、大浪滩-黑北凹地、昆特依和马海等;其次则分布于如一里坪、台吉乃尔湖、察汗斯拉图等等伴生钾矿区。结合我国的地质特征以及钾盐分布规律,国内学者提出了一系列成盐成钾理论,主要有“高山深盆”(袁见齐)^[8]、“湖泊迁移-退缩模式”(陈克造)^[9]、“高山深盆振荡干化、分离盆地同步分析”(张彭熹)^[10]、“深卤补给成钾”(曲懿华)^[11]、“盆地构造反转成钾模式”(刘成林)^[12]。这些模式为理解柴达木盆地盐类资源的形成和分布提供了重要的理论基础。盐类资源的形成往往受地质构造、气候变化和物源条件三大要素的耦合控制。根据我国典型陆相钾盐沉积环境,郑绵平先生提出了“链式多级中浅盐湖成矿模式、多级湖盆深盆成盐模式、砂砾型含钾卤水成矿模式”^[13]以及“承袭式成钾模式”^[14]等新认识,揭示了冲洪积砂砾岩孔隙卤水成钾模式。李洪普等^[15]进一步基于盆地西部更新统砂砾型深层卤水研究,构建了相应的成矿模式。察尔汗盐湖的成钾过程则遵循“凹口凸”三阶段理论^[16]。刘溪溪等^[17]认为昆特依凹陷呈现“双层”钾盐矿床模式。崔庆岗等^[18]则提出,马海盆地钾盐沉积呈“泪滴状”展布,表现为层状和浸染状的沉积模式。

柴达木盆地新近纪—第四纪盐湖陆相钾盐的成矿过程涉及物质来源、卤水运移富集及成矿分布规律等多个环节,其成矿动力学机制尚不清楚。当前主要科学问题在于:(1)构造运动、气候震荡对卤水运移和沉淀过程的机制尚未揭示;(2)钾盐矿为何集中分布于察尔汗、大浪滩、昆特依和马海等区域,以及构造—气候—沉积演化对成矿带形成与阶段性成矿规律的控制作用仍有待阐明。为弥补此研究不足,本文在梳理区域地质背景与已有成矿理论的基础上,通过对比分析,提出中部沉积中心型、北部构造控矿型和前陆冲断带控矿型三大成矿模式,进而明确钾盐勘探的重点靶区与成矿理论。

1 地质背景

柴达木盆地是青藏高原最大的前陆盆地,呈不规则菱形展布,四周被东昆仑山、祁连山和阿尔金山环绕,平均海拔约2600~3700 m,最大沉积厚度超过13 400 m(图1)^[19]。现代河流及盐湖沉积主要分布于盆地边缘地区,其沉积体系由发源于周缘山脉的多条河流和高山融雪所形成的冲洪积扇主导^[20]。盆地

山体 and 背斜构造将盆区划分为黑北—大浪滩、昆特依和 马海等多个次级凹陷^[21]。察尔汗盐湖是第四纪以来的主要沉积中心，也是盆地内汇水最集中的区域^[22]。

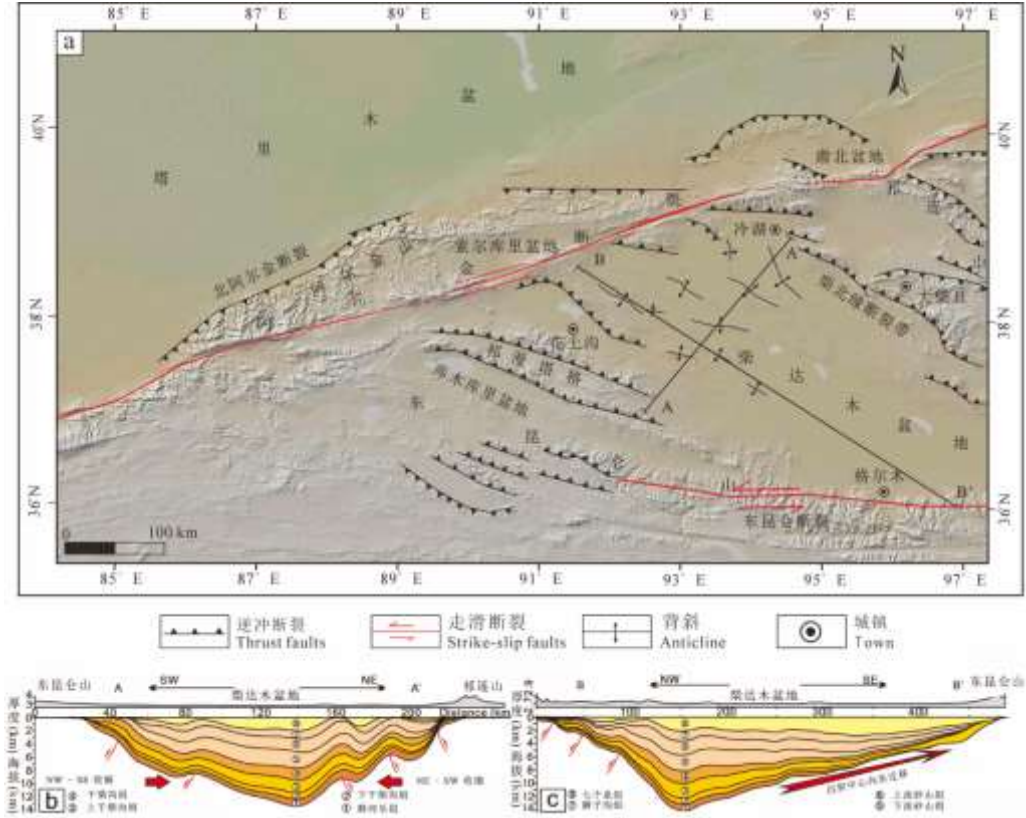


图 1 (a) 柴达木盆地构造纲要图 (b) NE-SW 向剖面 (c) NW-SE 面向剖面 (b, c 据文献^[3] 修)

Fig.1 (a) Tectonic schematic map of the Qaidam Basin; (b) NE-SW- and (c) NW-SE-oriented profiles across the Qaidam basin, modified from [3].

柴达木盆地的逆冲系统的扩展主要受阿尔金断裂走滑—逆冲运动驱动，自西向东逐步延伸^[23]。中新世晚期—第四纪先后经历构造运动，导致盆地发育出一系列背斜和向斜构造（图 2）。背斜褶皱的褶幅由西部的 $>16\text{ km}$ 向东逐渐减小至 $<4\text{ km}$ ，褶皱半波长也由 170 km 缩短至约 50 km ^[24]。随着构造变形的加剧，柴达木古湖开始裂解，加上“高山深盆”构造环境，形成柴达木盆地内马海、昆特依、察汗斯拉图和大浪滩—黑北等次级盆地，但彼此间仍保留水体与物质地下通道，并发育丰富的盐类物质，在地表—浅地表位置发育固—液相钾盐矿床^{[17][25]}。钾盐主要以卤水及固体形式赋存在以下地层：全新统盐湖相（ Q_4 ），上更新统冲洪积扇（ Q_3 ）和古近系—新近系含盐层（ N_1-N_2 ）^[10]。边缘拗陷与褶皱的复合构造共同构成了盆地的总体构造格局，这些构造单元控制了卤水的汇聚通道和储集空间，为钾盐成矿提供了关键的构造基础。

2 柴达木盆地钾盐矿时空分布

在柴达木盆地的 33 个主要湖泊中，盐湖占据绝对主导地位，共计 25 个^[7]。新近纪以来，盐湖古地理演变与多期气候震荡共同塑造了柴达木盆地水文系统^[27]，促使盐类物质在封闭湖盆中长期聚集与分异，最终形成了分布广泛、赋存形态多样的盐湖体系。在空间格局上，盆地呈现出以中心大型盐湖为主体、周缘次级盐湖为补充的格局。

2.1 空间分布

柴达木盆地钾盐成矿带在空间上可划分为北部和中部两大区(图 3)。北部盐湖区（大浪滩—察汗斯拉

图—昆特依—马海盆地)以硫酸盐型盐湖为主,其中昆特依盐湖卤水化学类型呈氯化盐型与硫酸盐型并存^[28];马海盆地的卤水层具有较高的K⁺矿化度,固、液体钾矿主要赋存于全新统地层中^[29];大浪滩钾盐矿区处于柴达木盆地西部新生代背斜带,受喜马拉雅运动控制,形成封闭的汇水凹陷^[30]。中部盐湖区主要以察尔汗盐湖为代表,固体钾盐矿物以钾石盐和光卤石为主,其别勒滩固体钾盐资源量约1.85亿吨,并与富钾卤水共存^{[31][32]},卤水钾浓度自东向西递增^[33]。钾盐富集受新生代凹陷构造控制,察尔汗盐湖位于盆地第四纪沉积中心,沉积厚度超过3000m,其高度封闭的成盐环境由阿尔金山走滑断裂与东昆仑断裂共同塑造^{[34][35]}。

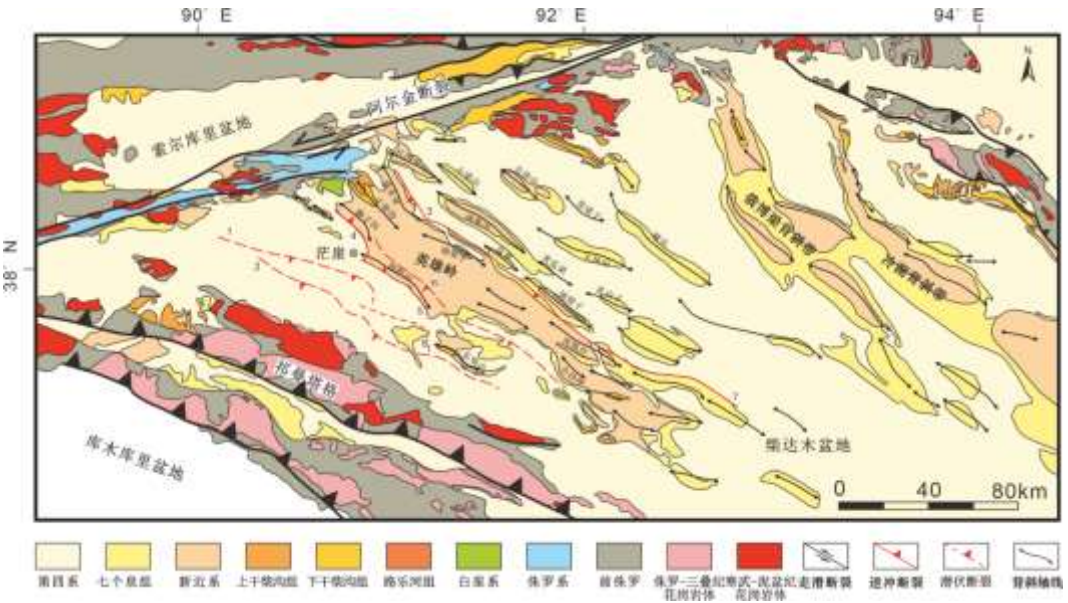


图2 柴达木盆地地质图(据文献[2] 修改)

(1 阿拉尔断裂; 2 昆北断裂; 3 英北断裂; 4 狮子沟断裂; 5 油砂山断裂; 6 XI 断裂; 7 油墩子断裂)

Fig.2. Geological map of the Qaidam Basin, modified from [2].

(1 Aral Fault; 2 Kunbei Fault; 3 Yingbei Fault; 4 Shizigou Fault; 5 Youshanshan Fault; 6 XI Fault; 7 Youdunzi Fault)

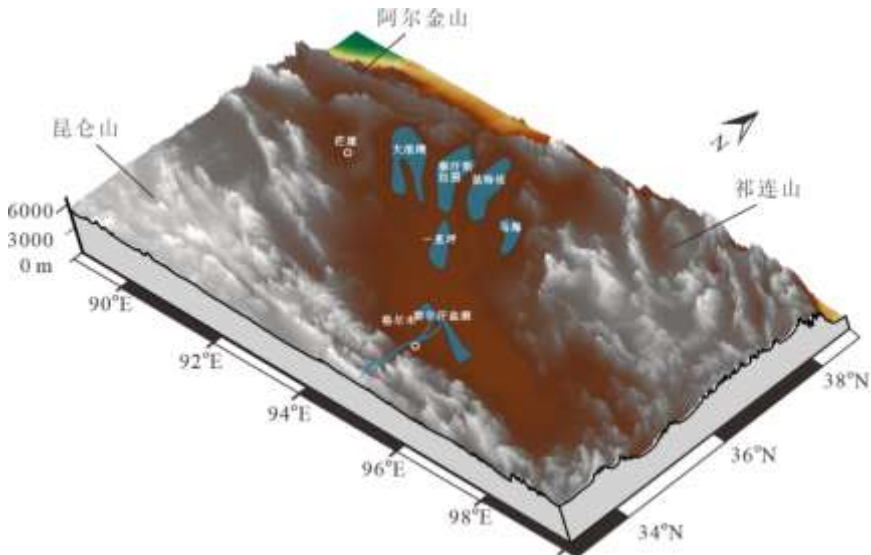


图3 柴达木盆地盐湖分布图

Fig.3. Distribution map of salt lakes in the Qaidam Basin

2.2 时间演化规律

柴达木盆地自侏罗—白垩纪盆地雏形形成后，在古近纪—新近纪时期，柴达木盆地经历了由潮湿到干旱的古气候演变。盆地古湖水体的演化可划分为三个阶段：预备阶段、成盐阶段和成钾阶段(图 4)。预备阶段经历的时间较长，在预备阶段 ($P_2 - N_1$ 至 N_1^2)，长期的湿润气候为古湖提供了丰富的钾源物质，湖泊中主要沉积碎屑盐类沉积，并伴随碳酸盐的沉积，为后期成盐、成钾奠定了物质基础^[36]。进入成盐阶段 (N_2^2)，古气候逐渐转为干旱，湖水强烈蒸发浓缩，开始沉积大量的蒸发盐类矿物，以石膏和石盐为主，并伴生少量芒硝与硫酸钠盐类^[37]。至上新世晚期，盆地西部古湖水体可能进入成钾阶段，受新近纪广泛分布的富钾卤水和高山融雪补给影响，在石盐沉积区的局部区域开始形成钾盐沉积^[38]。

演化阶段	时代	水体浓缩阶段	碳酸盐	石膏	芒硝	石盐	白钠镁矾	泻利盐	钾石盐	光卤石
成钾阶段	N_1^1	硫酸镁盐								
成盐阶段	N_2^2	硫酸钠盐								
预备阶段	N_1^1	成油-碎屑盐								
	P_2-N_1	成油-碎屑盐								

图 4 柴达木盆地早期古湖水体演化过程 (据文献[10] 修改)

Fig.4 Early evolution of palaeolake systems in the Qaidam Basin, modified from [10].

自第四纪以来，柴达木盆地古气候演化总体表现为由相对湿润向干旱化的转变。由于氯化盐类相较于硫酸盐类更易于溶解，因而盆地范围内普遍形成了富钾、富镁的氯化物型卤水，为钾盐沉积奠定了物质基础。第四纪的矿物演化亦可划分为三个阶段，与新近纪显著不同。预备阶段 (Q_1-Q_3) 主要以碎屑—碳酸盐沉积为主，缺乏单独成层的碳酸盐沉积^[39]；进入成盐阶段 (Q_3) 后，硫酸盐沉积的规模相对有限，沉积石盐为主，局部有少量氯化钠型的钾石盐、光卤石^[40]；自晚更新世以来逐渐进入成钾阶段；至成钾阶段 (Q_4)，原统一古湖体系解体为若干孤立湖盆，各湖盆因水化学条件与蒸发环境差异而表现出不同的析盐序列， Q_4 阶段则出现大量钾盐（如软钾镁矾、钾石盐、光卤石）的集中分布^[41](图 5)。

演化阶段	时代	浓缩阶段	硫酸盐型										
			碎屑物	碳酸盐	石膏	芒硝	石盐	泻利盐	软钾镁矾	钾石盐	光卤石	水氯镁石	
成钾阶段	Q_4	钾镁酸阶段											
成盐阶段	Q_3	硫酸盐阶段											
预备阶段	Q_1-Q_2	碎屑-碳酸盐											
演化阶段	时代	浓缩阶段	氯化物型										
			碎屑物	碳酸盐	石膏	石盐	钾石盐	光卤石	水氯镁石				
成钾阶段	Q_4	钾镁酸阶段											
成盐阶段	Q_3	硫酸盐阶段											
预备阶段	Q_1-Q_2	碎屑-碳酸盐											

图 5 柴达木盆地第四系水体演化过程 (据文献[10] 修改)

Fig. 5 Evolutionary process of Quaternary water bodies in the Qaidam Basin, modified from [10].

3 钾盐成矿控制因素

柴达木盆地钾盐矿床主要发育于新近纪—第四纪，受构造、气候、物源及岩相古地理协同作用的综合控制。钾盐矿主要分布于大浪滩、察汗斯拉图、察尔汗、昆特依和马海等次级洼陷区，呈现固—液相并存的钾盐矿床类型。

3.1 构造演化

柴达木盆地在新生代印度板块持续向北俯冲与挤压作用下^[42]，导致盆地持续沉降，为盐湖卤水汇聚提供空间，自始新世以来逐步形成内部沉降中心并开始成盐^[43]。构造演化经历了三个主要阶段：始新世前，盆地处于走滑—拉张—拉分裂陷阶段；始新世至中新世，转入挤压坳陷阶段；晚期则演化为挤压—走滑复合坳陷阶段^[44]。上述各期构造活动不仅塑造了坳陷与背斜分割的次级成盐区，使盐类矿物与碎屑相互沉积，而且背斜隆起与坳陷控制了钾盐湖的空间分布与后期沉积格局（图6）^[45]。

阿尔金断裂和东昆山断裂为深部富钾卤水上涌及其与地表卤水融合创建了通道^[46]^[47]；盆地西部走滑—拉分作用塑造的次级凹陷进一步控制了盐湖分布，NEE 向断裂控制的卤水富集层可延伸至埋深 150 m 的砂砾层^[29]；深部石膏层在构造挤压下塑性变形并封闭下伏卤水，超压驱动富钾卤水沿断裂垂向迁移，在浅部砂砾孔隙中运移^[47]^[48]。古近纪走滑阶段的多个次级洼陷在受限水体环境中其盐度提升^[48]；而新近纪以来的印度板块的持续挤压则导致湖盆萎缩和沉积中心迁移，使钾盐沉积中心由英雄岭向察尔汗逐步调整^[49]。

此外，喜马拉雅运动导致高原阶段性隆升，阻断南亚季风水汽的北上，使盆地年降水量降至 50 mm 之下、蒸发量超 3000 mm，显著提高了盐湖的蒸发浓缩效率^[50]；同时，新生代周缘造山带隆起，丰富的含钾物质被溶滤和风化剥蚀释放，经地表径流输送至盆地，增加了卤水中 K^+/Na^+ 比值升高，从而进一步促进了钾盐的沉淀与富集^[47]^[50]。

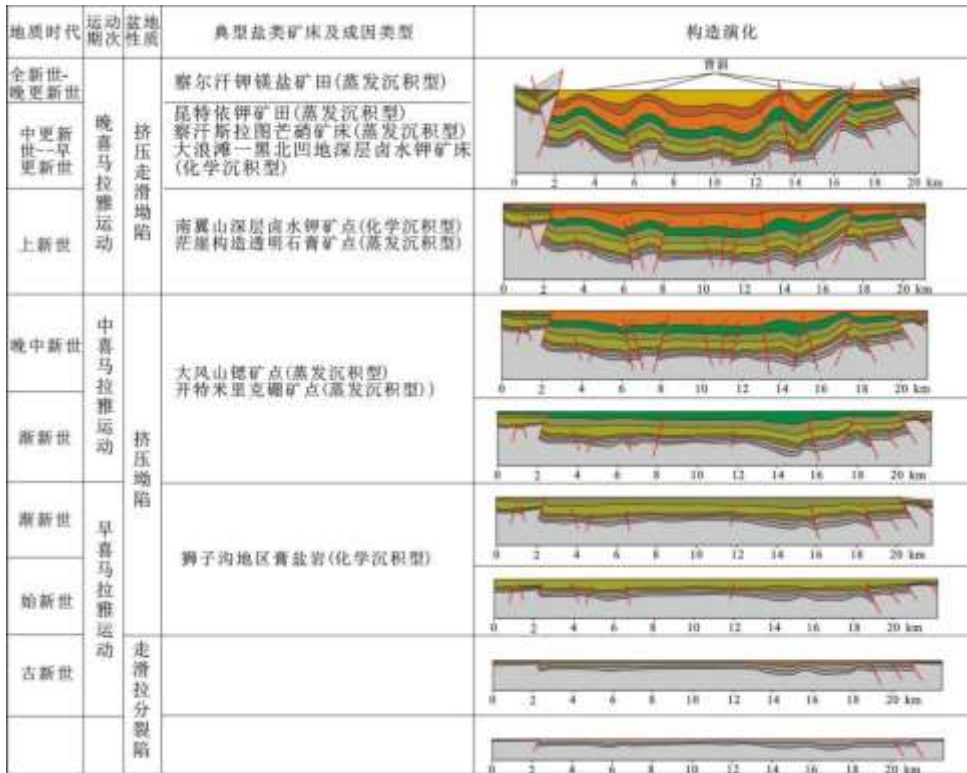


图6 柴达木盆地构造与成矿演示图（据文献[44] [51] 修改）

Fig.6. Tectonic Framework and Mineralization Schematic of the Qaidam Basin, modified from [44] [51].

3.2 气候条件

柴达木盆地自新生代以来总体呈持续干旱化趋势，尤其是在渐新世—全新世期间，其年均蒸发量远超降水量^[52]，为钾盐富集奠定了有利的气候与水文地质条件。盐湖在历史气候干湿交替的驱动下^[14]，经历多期次的湖水收缩与扩展，盐层亦随之演化。盐湖在干冷期蒸发增强，湖水高度浓缩，盐类沉积增多，湖泊退化为干盐滩；暖湿期蒸发减弱，降雨侵蚀作用增强，矿化度增加，湖水淡化，呈现成盐湖特征，碎屑

输送和沉积占优^{[53][54]}。气候冷暖干湿交替的震荡过程，是控制盐类不断沉积与再分布的核心机制^[27]。

新近纪晚期随着区域缩短/隆升增强，柴达木盆地逐渐被构造“封闭”，使排水连通性下降并抬高了盆地的盐度基线；同期区域由暖湿向干冷转变（花粉证据）且全球逐步增冷（ $\delta^{18}\text{O}$ ），共同促进了大量蒸发岩与高盐度沉积的形成。进入第四纪后，盆地处于这一高盐化基线之上，随后受到冰期—间冰期的气候振荡强烈影响，导致盐度在短时间尺度上反复增高或减弱，形成近代显著的盐度波动记录。构造作用决定了盐度的长期基线，第四纪冰期周期控制了短期振幅，两者耦合共同塑造了柴达木盆地的新近纪—第四纪盐化演化(图 7)。下油砂山组的低盐度特征表明，早—中中新世期间青藏高原东北缘气候相对湿润。在 18~14 Ma 期间，耐热孢粉百分率达峰值，反映出中中新世的温暖期^{[55][56]}。西宁盆地 17~14 Ma 的沉积物显示暖湿气候条件^[57]。进入上油砂山组至七个泉组的沉积阶段，湖水盐度持续升高，同期，干生植物、高山植物与针叶植物所占比例逐步增加，而非乔木与乔木花粉的比值持续下降，指示自中中新世以来盆地及其周缘山地环境日益干燥，并与全球气候趋于干冷的总体演化趋势相一致^{[58][59]}。孢粉资料^[60]、总有机碳与离子^[61]均呈现柴达木盆地环境变干冷的变化。

进入全新世后，干旱程度持续加剧，马海等盐湖由咸水湖演变为盐湖乃至干盐滩，进一步推动了钾盐的沉积与富集^[62]。但是在全新世中期，即“全新世大暖期”，全球气候整体表现为温暖湿润；自全新世中晚期以来，气候逐渐趋于干燥。在晚全新世阶段，干旱化趋势愈加显著，中部和西南部地区开始出现沙丘发育，伴随区域降水量明显减少。

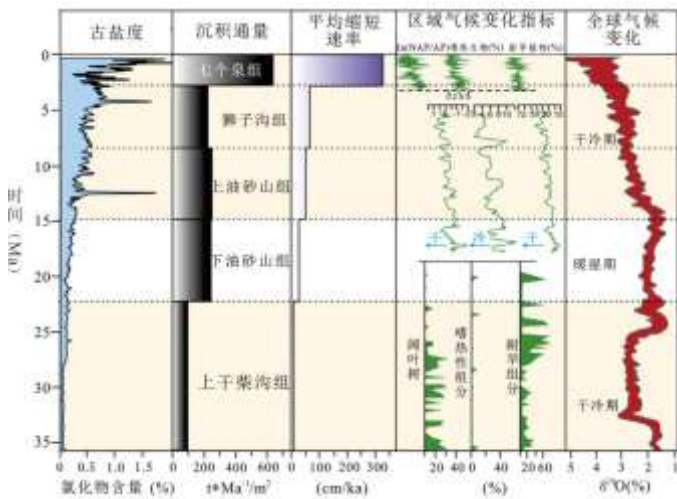


图 7 柴达木盆地古盐度与新近纪和第四纪期间的重大气候变化比较（据文献^[63] 修改）

Fig. 7. Comparison of palaeosalinity in the Qaidam Basin with major climate changes during the Neogene and Quaternary (modified from [63]).

因此，根据以上的内容柴达木盆地的新近纪-第四纪干旱化演变历史可以分为以下 5 个阶段：

(1)早中新世至中中新世(约 22.0~9.7 Ma):柴达木盆地气候总体较为湿润，但存在明显的干湿波动。

盆地内发育广泛的浅湖—半深湖相沉积，湖泊面积在湿润阶段显著扩张，以泥质沉积为主；而在相对干旱阶段，湖泊水体萎缩，沉积物中开始出现轻微咸化特征。该时期虽然气候已呈波动性干旱化趋势，但尚未形成大规模盐类沉积，为后期新近纪持续干旱化与成盐作用的发生奠定了环境基础。

(2)晚中新世至上新世中期(约 9.7~3.58 Ma):这一时期进入持续干旱化阶段，沉积环境逐渐由湖泊转向扇三角洲和洪积扇沉积。持续干旱促使蒸发作用增强，湖泊范围收缩，盆地内咸化水平显著提升，并出现一定碳酸盐和盐类沉积。青藏高原的持续隆升及特提斯海退缩是推动该阶段干旱化的重要因素，为上新世初步成盐创造了气候条件。

(3)上新世至早更新世(约 3.58~2.7Ma):这是盆地干旱化的关键阶段。盆地进入极端干旱环境，湖泊进一步萎缩，沉积物以灰绿色砂砾岩及盐化沉积为主。蒸发作用最为强烈，咸化和成盐作用达到高峰。该

阶段不仅标志着盆地干旱化的全面出现，也是钾盐资源开始富集的核心时期。

(4)早更新世至晚更新世(约 2.7~0.3Ma):柴达木古湖自 2.7 Ma 以来总体呈现干旱化趋势，其间经历了多次气候系统的显著转变。古湖系统在 2.2~1.95 Ma、1.3~1.1 Ma 及 0.6 Ma 附近发生了三次从稳定周期态向不稳定随机态的突变，并分别开始发育盐层、厚层盐岩及钾盐矿物。气候干湿波动的主控周期发生了显著变化，反映了干旱加剧与环境不稳定的演化过程^[64]。

(5)晚更新世末期至现今(0.3 Ma B.P.):在晚更新世末期，由于全球气候进入冰盛期，加之青藏高原的强烈隆升，致使该地区变得十分干冷，所有大小湖盆均在 25~15ka B.P.之间成为干盐湖，形成了大面积的干盐滩。在全新世早期气温回升，大量冰雪融化水补入湖中，干盐滩边缘的小卤水湖水一度大幅度上涨。随着青藏高原的隆升加剧，北移的印度洋水汽越来越少，致使柴达木盆地越来越干旱^[65]。

3.3 物源特征

柴达木盆地的物源条件也能显著影响盐湖中钾盐的富集。基岩山区花岗岩和古近纪、新近纪古盐岩层是深层砂砾孔隙水和晶间卤水重要的直接矿源层^[66]。这些物源的运移主要依靠地表水、地下水的流动、热泉和油田水。

新生代以来，昆仑山、阿尔金山及祁连山的隆升与风化，为盆地提供了大量富钾的硅酸盐矿物。地表水一方面借助化学风化溶解流域矿物，另一方面又将这些溶解物质及上涌的高矿化度地下水与热泉带入盆地，从而为盐湖的盐类富集提供关键物质来源。河流搬运过程中，这些矿物经水解释放出 K^+ ，成为晶间卤水的主要来源之一；如乌图美仁河入湖水体 K^+ 浓度可达 120~180 mg/L，累计输入量为盐湖总钾量的 15%^[67]。

地下水在柴达木盆地的运移与水—岩相作用密切相关，在此过程中发生离子交换和矿物溶解，促进了钾离子的大量富集。浅层地下水以氯化物型为主，向深部过渡时，由于长期与富钾硅酸盐矿物接触， K^+ 逐渐析出，浓度显著提高^[68]。以马海盐湖周缘为例，地下水中 K^+ 浓度 30mg/L^{[69]~[70]}。季节性气候变化对地下水富集钾过程也有显著影响。暖湿期的冰雪融水补给显著提升地下水位，加剧了对盐类矿物的淋滤与二次溶解；干冷期的蒸发浓缩则进一步提高了卤水的盐度和钾离子浓度^[71]。盆地西部广泛发育高矿化度的 Ca-Cl 型深部卤水，其 δD 、 $\delta^{11}B$ 、 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 表明物源具有深部热液和古沉积卤水特征；深大断裂和逆冲断层则作为深部热液和古卤水上升至浅部的重要通道^[69] 错误:未找到引用源。。

南翼山、狮子沟、尖北等地区的油田水均含有较高品位的钾盐资源^[73]，断层和背斜构造为深部油田卤水提供了上升通道^[74]，其中富含 Ca^{2+} 的 Ca-Cl 型油田卤水对钾镁盐矿物的沉积起到了关键作用^[72] 错误:未找到引用源。，而受油田水补给影响的深层富钾卤水也显示出与油田卤水相似的地球化学特征^[75]。深层卤水的热液背景，如天青石沉积，也表明热液矿物在盐湖成盐元素富集中起到了潜在的催化作用^[76]。热泉补给对盐湖资源的贡献则更为显著，在那棱格勒河及其尾间湖区的水化学分析中，这些热泉通过昆仑断裂带上涌进入河流。

柴达木钾盐的成矿依赖“深—浅耦合”机制。浅部风化与河流补给提供基础，深部热液 / 古卤水与古盐岩溶滤增强了钾浓度，气候干旱化加剧了富集过程^{[33]~[35]}。阿尔金山前和昆北断裂应作为靶区优先考量，以捕捉深部提高热液或古卤水贡献的潜力^{[67]~[77]}。

3.4 岩相古地理

第四纪初期，受喜马拉雅构造运动影响，青藏高原强烈抬升，柴达木盆地进入前陆盆地阶段。盆地内广泛发育河流泛滥平原沉积，西部与北缘以砂砾层为主^[37]。西部抬升并遭受强烈剥蚀，山前地区形成冲洪积扇，一里坪为浅湖沉积，东部持续沉降，沉积中心由英雄岭—茫崖转移至三湖凹陷^[78]。第四纪以来，在新构造运动作用下，湖盆继续东移至三湖凹陷，基本奠定了现今沉积与构造格局。

3.4.1 早更新世 早更新世，受青藏运动的影响，柴达木盆地西部英雄岭—狮子沟—油砂山—茫崖一线强烈褶皱隆起形成背斜带，导致阿尔斯库勒湖—大浪滩—一里坪—三湖凹陷带基本隔离，沉积环境从扇三角洲向滨浅湖环境演变。冷湖构造带褶皱隆起，形成水下或水面屏障，使马海地区由冲积洪积扇环境转变为湖泊环境，形成马海凹地^{[15]~[79]}。早更新世中期，红沟子—南翼山咸水泉—油泉子—油墩子、尖顶山、大风山一带和鄂博梁等也相继褶皱隆起，使柴达木古湖出现初步分割，形成了大浪滩、察汗斯拉图、昆特依、一里坪等彼此之间互相连通的沉积凹地的雏形^[80]。早更新世晚期，盆地西北部持续抬升，古气候趋于干

冷，湖水逐渐浓缩，形成盐湖沉积环境。尕斯库勒湖山前为冲洪积沉积，进入预备钾盐沉积阶段。大浪滩与察汗斯拉图一带山前发育冲洪积与河流三角洲沉积，出现盐湖相沉积。马海与昆特依地区山前为冲洪积沉积，湖中心则普遍沉积石盐，进入典型盐湖环境。盆地东南部强烈沉降，沉积中心向东迁移至东、西台吉乃尔湖和涩聂湖一带，发育中深湖沉积，仍处于淡水至微咸水湖阶段。其后湖水继续向东扩展至达布逊、霍布逊湖以东，形成滨浅湖环境^[81]（图 8）。

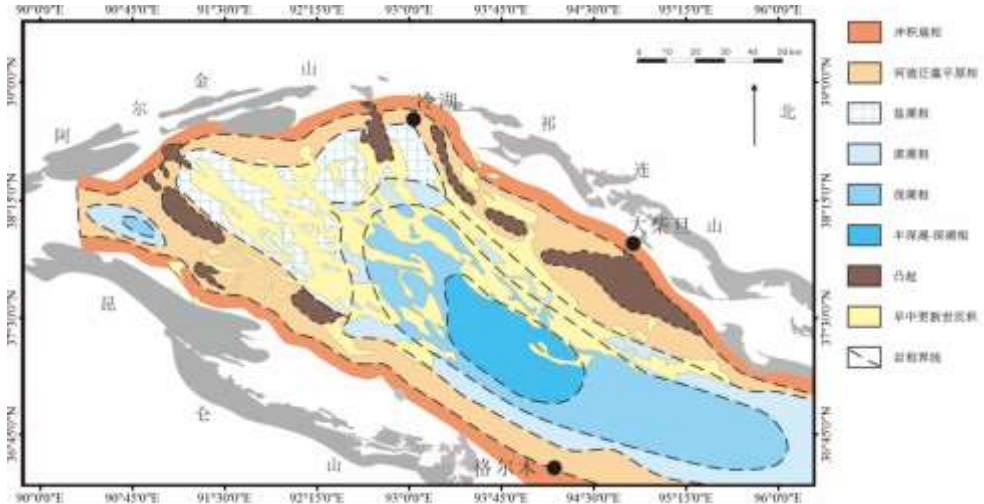


图 8 柴达木盆地早更新世沉积古地理图（据文献[66] 修改）

Fig.8. Palaeogeographic map of the Early Pleistocene deposits in the Qaidam Basin (modified from [66]).

3.4.2 中更新世 中更新世初期，柴达木盆地西北部持续抬升，沉降中心东移至察尔汗地区，沉积厚度超过 600 m，形成淡水—微咸水的中深湖—浅湖沉积环境，而西北部各湖盆普遍表现为滨浅湖—盐湖沉积^[80]。受青藏高原进一步隆升及干旱气候影响，西北部盐湖进入自析盐阶段。尕斯库勒为滨浅湖、盐湖与干盐湖交替沉积^[82]；大浪滩以砂质黏土—石膏互层为主，盐层比例增加；察汗斯拉图发育粉砂淤泥夹盐层与芒硝层，盐度增强；昆特依形成泥盐互层，亦富含芒硝；马海盆地除边缘淡水沉积外，多为泥盐互层；一里坪早期为盐湖—咸化浅湖交替，夹石盐，至中更新世晚期演化为半咸水—咸水滨浅湖，石盐沉积消失，转为碳酸盐岩与碎屑沉积为主^[83]（图 9）。

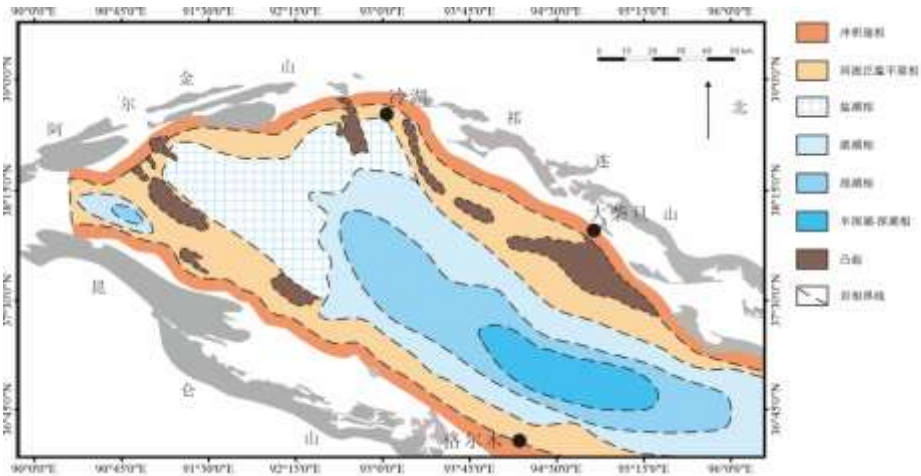


图 9 柴达木盆地中更新世沉积古地理图（据文献[66] 修改）

Fig.9. Palaeogeographic map of Middle Pleistocene deposits in the Qaidam Basin (modified from [66]).

3.4.3 晚更新世

晚更新世早期，早—中更新世形成的褶皱进一步隆升，冷湖、鄂博梁、红三早及碱山等 NW-SE 向背斜活动加强，导致柴达木古湖彻底解体，湖盆完全分离^[84]。湖泊浓缩使西北部普遍进入干盐湖阶段：尕斯库勒湖收缩并局部形成干盐滩^[85]；大浪滩被多条次级构造分割成狭长凹地；察汗斯拉图和昆特依因新构造隆升演化为独立盐湖，盐类沉积显著增强，发育大量石盐与芒硝；马海盆地受赛什腾山前断裂和背斜再度隆升控制，湖泊收缩成喇叭状狭长洼地；一里坪逐渐封闭，石盐消失，仅见石膏层，表现为咸化滨浅湖环境。与此同时，察尔汗盆地沉降加剧，在晚更新世早期—中期形成淡水—微咸水滨湖与沼泽沉积，至中期次级构造连片隆起，大部分地区演化为剥蚀区，仅小梁山周缘保留盐湖沉积^[66]。

晚更新世晚期，地壳继续强烈抬升并伴随极度干旱气候，尕斯库勒湖进一步萎缩，西南岸为冲积沉积；马海湖急剧浓缩转变为干盐滩；而一里坪东南部及察尔汗地区湖水急剧蒸发，广布石盐沉积，普遍进入典型盐湖阶段^[83]（图 10）。

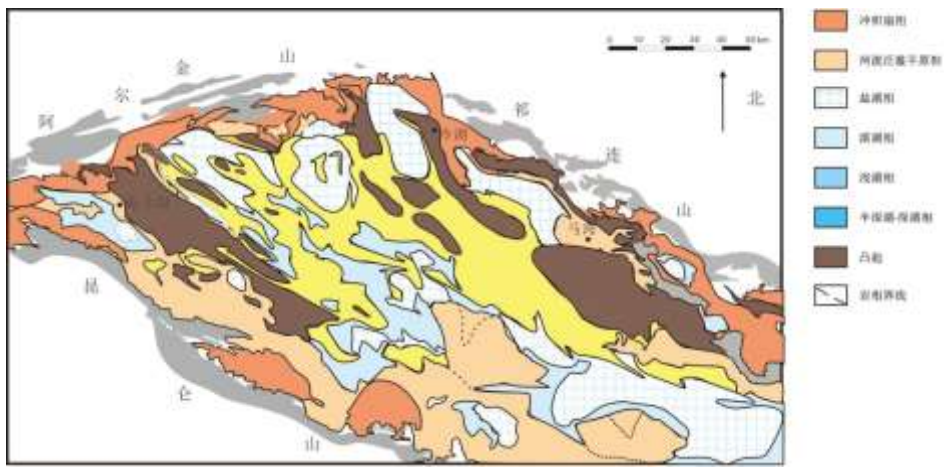


图 10 柴达木盆地晚更新世沉积古地理图（据文献^[66] 修改）

Fig. 10. Palaeogeographic map of Late Pleistocene deposits in the Qaidam Basin (modified from ^[66]).

4 钾盐矿床的成因模式

柴达木盆地的钾盐矿床主要形成于新生代，在构造、气候和物源三大要素的耦合作用下演化而成。盆内钾盐矿床集中分布于察尔汗、昆特依、大浪滩和马海等次级盆地，呈现出固-液共存的赋矿特征。根据构造、物源等，可将柴达木盆地划分为 A：中部沉积中心型、B：北部构造控矿型和 C：前陆冲断带控矿型三大钾盐矿区。

4.1 中部沉积中心型

中部沉积中心型位于柴达木盆地中央地带，北界受褶皱构造带控制，南界受地貌高差制约，成盐强度总体呈现出“北高南低、西强东弱”的空间分异规律。主要包括察尔汗盐湖、东、西台吉乃尔盐湖及一里坪盐湖。东、西台吉乃尔及一里坪盐湖主要发育石盐沉积，三者均含有钾盐晶间卤水，其中钾镁盐沉积主要分布于西台吉乃尔和一里坪盐湖。察尔汗盐湖是柴达木盆地中部沉积中心型盐湖中最具代表性的钾盐矿床，也是我国最大的盐湖。受新生代喜马拉雅运动影响，该区长期处于沉降中心，形成封闭湖盆；其次级凹陷的演化受阿尔金断裂和昆仑断裂控制，沉积中心亦随构造活动呈阶段性迁移^{[86][87]}。

察尔汗盐湖位于古老构造基底上发育的中新生代强烈中央拗陷带上^[88]，新构造运动促使察尔汗地区与柴达木盆地西部分离并演化为独立湖盆，西部的涩北构造和东部的盐湖构造隆升，晚更新世末期东昆仑的强烈隆升，哑叭尔构造隆盛与察尔汗地区的相对下降，导致周缘河流袭夺古湖水系，大量水体汇入察尔汗湖区^[89]。察尔汗湖区成盐大约经历了潮湿(24 ka 前)→干旱(24 ka B.P. ~ 2.8 ka)→最干旱(2.8 ka - 0.9 ka：成盐期)→相对湿润(0.9 ka~至今)的气候演化^{[90]-[91]}。察尔汗盐湖主要受河水和 Ca-Cl 水两种水文

端元补给：（1）河水从西南-南-东南-东方向持续补给察尔汗盐湖；（2）发育自北缘深部断裂带 Ca-Cl 热泉水补给至盐湖^{[93]~[94]}。

察尔汗盐湖从西向东（别勒滩→达布逊→察尔汗→霍布逊），呈现“深水成钾→浅水成盐”的沉积模式^[67]。深水区（别勒滩）发育光卤石和钾石盐，以河流为主要的年输入 KCl 量达 7160 t^[67]。过渡带（达布逊）出现钾石盐与石盐互层，反映干湿波动^[32]。浅水区（霍布逊）以石盐为主。

察尔汗盐湖的盐类沉积自下而上划分为 5 个含盐组，每个含盐组都包含一个碎屑层和一个盐层。第 1~3 盐层主要分布于察尔汗区段以西，第 4 盐层遍及全区，第 5 盐层主要分布于达布逊湖的北侧和东侧，以及别勒滩区段的西南部。固体钾矿层在空间上主要分布于达布逊湖的东、北侧，尤以北侧最富。KCl 含量（0.5%~6%）分布最广，厚度较大。液体钾矿层在空间上的分布规律是自上而下依次为 A（KCl>1%）、B（0.5%<KCl<1%）、C 级（KCl<0.5%）矿层，但局部地段只出现其中的 1~2 层，个别地段出现与总规律相反的层序倒置现象^[96]。因此中部沉积中心型的成钾模式可概括为“构造汇水—气候控蒸—物源定质—水文富钾”协同作用。

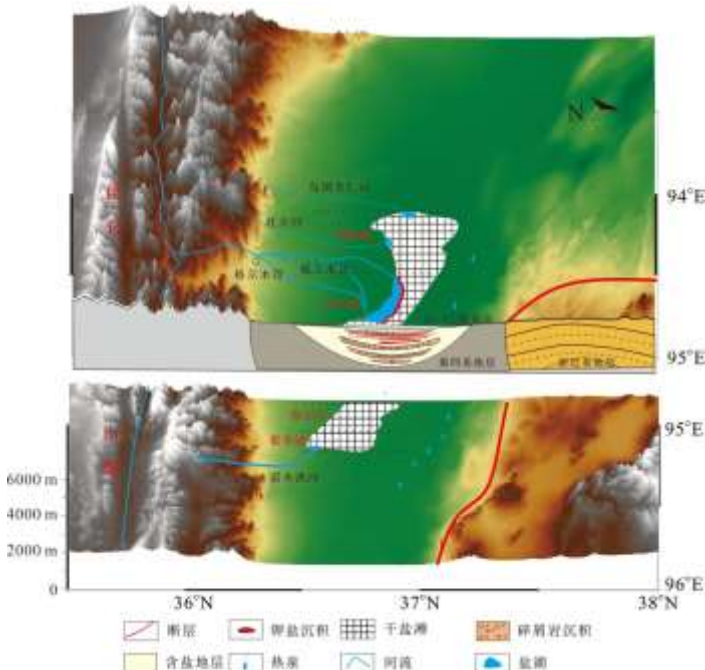


图 11 中部沉积中心型钾盐成因模式

Fig.11. Genetic model of central sedimentary-center-type potash mineralization.

4.2 前陆冲断带控矿型

前陆冲断带控矿型钾盐湖主要分布于柴达木盆地的东北缘，沿祁连山地带发育一系列被逆冲断裂分割的小型次级盆地，其间广泛分布着盐湖体系。东起茶卡盐湖，西至牛郎织女湖，主要包括大柴旦湖、小柴旦湖、马海湖区、牛郎织女湖、茶卡盐湖及柯柯盐湖等典型代表。

马海盐湖位于柴达木盆地东北缘的一个次级沉降盆地，是该类型的典型代表。其构造格局较为复杂。盆地北部受冲洪积扇及古近纪—新近纪背斜所限定，并与赛什腾山接壤；西部及西南部则以冷湖背斜为边界，该构造不仅起到天然屏障作用，同时将马海盆地与昆特依盆地有效分隔；而南部则为风蚀作用形成的残丘带，主要由新近系及第四系早—中更新统地层组成，构成封闭—半封闭的沉降构造环境^[97]。新构造运动也使盆地的沉积中心从西到东、从南到北迁移，使得马海盆地东北部成为盆地的沉积中心和成盐溶质、水源的汇集区。马海盐湖在第四纪时期的沉积相主要有冲积相、滨湖相、浅湖相和盐湖相，盐湖沉积层理自下而上经历了碎屑沉积—蒸发盐类沉积—干盐滩沉积的演化序列（图 12）^[98]。

早更新世，马海地区气候温润、降水充沛，水动力强，沉积以砂、砾为主，并形成多组韵律层，反映间歇性洪水能量由强转弱的反复变化^[44]。中更新世气候转干冷，石膏沉积出现，沉积环境以滨湖相和浅湖相为主。晚更新世气候极度干旱，湖水补给锐减，湖体明显收缩^[99]。至全新世，湖泊彻底干涸，形成广阔干盐滩^[100]。新构造运动后期，受冷湖构造影响，马海盆地演化为孤立封闭湖盆。整体经历了发生、发展、收缩、解体与消亡五个阶段。周缘赛什腾山和祁连山物源供给充足，冲洪积扇和马卡河流沉积不仅提供碎屑物质，也影响了湖水稀释与沉积环境演化。整体而言，前陆冲断带控矿型型的成钾过程可概括为“封闭湖盆格局—干旱气候条件—持续物源供给—湖水浓缩沉积”的模式。

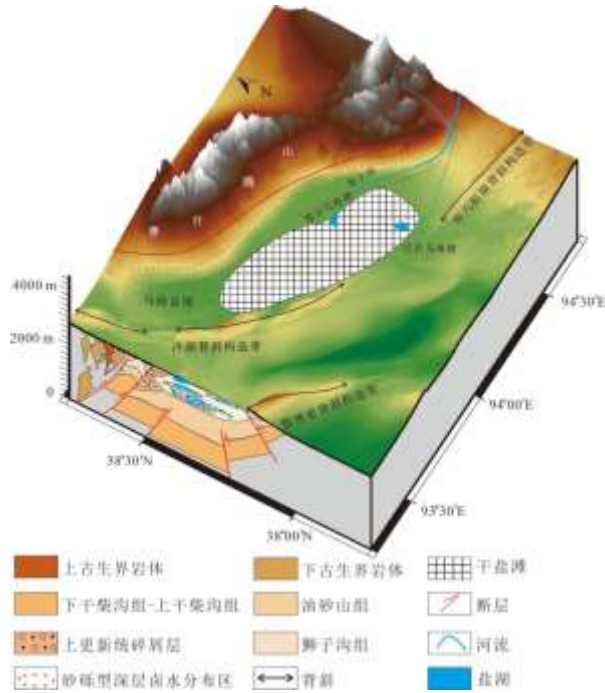


图 12 前陆冲断带控矿型型钾盐矿成因模式

Fig 12. Genetic model of eastern marginal shallow-lake depositional potash mineralization.

4.3 西北部构造控矿型

柴达木盆地西北部的“北部构造控矿型”钾盐矿主要集中于尕斯库勒、大浪滩—黑北凹地、察汗斯拉图与昆特依等区域。该区含钾卤水可分为三种类型：①氯化钠型（砂砾层含钾卤水），②氯化钙型（油田水），③现代盐湖型（硫酸盐），各具显著差异^[101]。

自始新世以来，阿尔金山断裂持续左行走滑与地壳挤压作用，促使盆地西北缘发育出一系列如南翼山、小梁山、尖顶山、大风山等背斜构造，其间分布大浪滩、黑北、察汗斯拉图、昆特依等凹地。

自上新世以来，盆地西北部多次经历干冷与暖湿期交替，古盐湖多轮浓缩沉积，形成了大浪滩、察汗斯拉图、昆特依等典型盐湖沉积区^[45]。4 Ma B.P.以来，大浪滩地区气候由温湿逐渐转向偏干，并在 3.5 - 2.5 Ma B.P.期间开始沉积石膏等蒸发岩。进入更新世后，气候干旱化持续加强，石膏和石盐大量沉积，湖泊逐步萎缩，最终在中更新世表现为典型冷干的盐湖环境，并经历多个成盐期^[102]。

物源方面，阿尔金山前广泛发育冲洪积扇体，沉积形成高孔隙度、高渗透性的砂砾层，不仅为卤水运移与聚集提供了优良储集空间，也为湖水稀释与沉积环境演化提供了条件。阿尔金山和英雄岭高山融水沿断裂带渗入山前地区，长期溶滤上新统地层中的石盐层，形成富钾卤水并汇入更新统砂砾层储存^[15]。

沉积特征上，典型矿区如大浪滩凹陷，主要赋存更新统深层卤水和全新统的晶间卤水（图 13）^[103]；昆特依凹陷则以地下卤水型液体钾矿为主，兼有固体矿，共同赋存于早更新世砂砾层孔隙层与中更新世—全新世化学沉积晶间层中^[104]。

西北部构造控矿型成钾模式表现为：走滑挤压构造背景下，在干旱气候和持续物源供给作用下，卤水沿断裂富集并经湖水蒸发浓缩，形成多类型钾盐矿床。

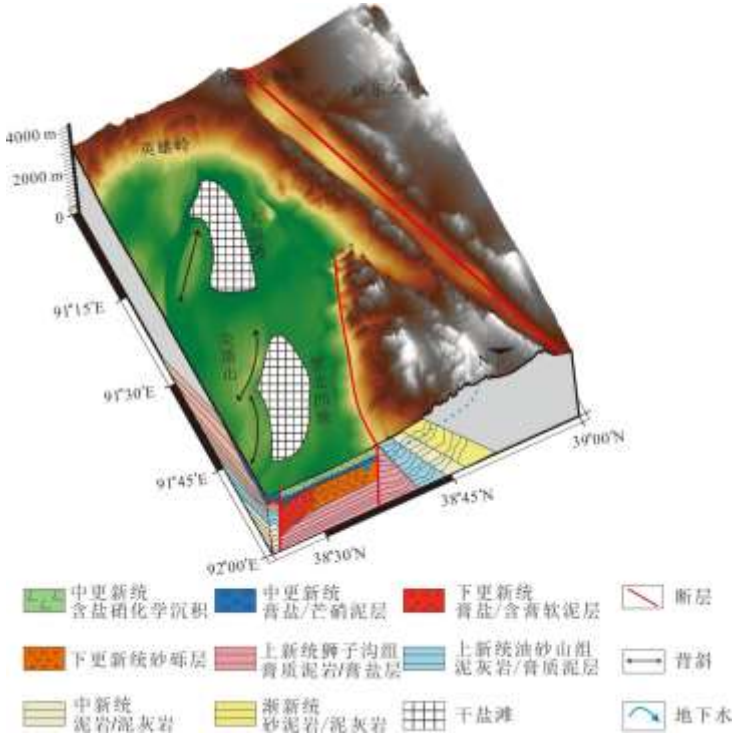


图 13 西北部构造控矿型钾盐成因模式

Fig. 13. Genetic Model of Tectonically Controlled Potash Deposits in the Northwest Region.

5 柴达木盆地盐湖演化

钾盐成矿与古卤水的成因演化密切相关，其中，构造因素决定了含盐盆地的形成、迁移与空间格局，直接控制了卤水的汇聚通道与储集空间；气候因素主导了湖泊水量平衡与蒸发浓缩过程，进而影响卤水的富集强度与盐类沉积序列；物源因素则提供了持续的钾质来源与物质补给，决定了卤水中钾离子的丰度与演化趋势。三者的耦合制约了钾盐矿床的形成机制，控制了其时空分布特征与成矿规律。

因此，柴达木盆地钾盐盐湖的演化可分为五个主要阶段，体现了构造运动、古气候干旱化与沉积环境协同控制下的成矿过程（图 14）。

在古新世—早中新世阶段，盆地处于喜马拉雅运动早幕的稳定沉降期，形成全盆统一的柴达木古湖。此时湖泊广布，沉积环境以半深湖—浅湖为主，发育厚层蒸发岩与碳酸盐沉积，为后期卤水富集和钾盐成矿提供了充足的空间与物质来源。

进入中中新世—上新世中期，青藏高原陆内俯冲加剧，NW-SE 向褶皱和断裂广泛发育，古湖逐渐解体为多个次级凹陷。区域构造隆升导致沉积中心东移与南迁，湖泊面积显著收缩，蒸发岩沉积增强，并在山前带形成高孔隙度砂砾层，为后期深层孔隙卤水的储集奠定了基础。

至上新世晚期—早更新世，盆地气候进入极端干旱阶段，湖泊持续浓缩，蒸发作用达到最强。盆地内部的多个凹地逐步成型，石盐沉积广泛发育，并在局部地区开始出现钾盐矿物的沉积，这是柴达木盆地由普遍咸化迈向局部成盐的重要转折期。

在早更新世—晚更新世，新构造叠加作用显著增强，NW 向褶皱与断裂体系频繁活化，使统一古湖彻底分解为多个独立湖盆。凹地内部发育厚层岩盐沉积并形成晶间卤水系统，山前带砂砾层则提供了孔

隙卤水储集空间。共和运动的活化使盐湖—干盐湖沉积体系达到鼎盛，固—液相盐类矿物普遍沉积，柴达木盆地进入钾盐成矿的高峰期。

自晚更新世末期至全新世，青藏高原快速隆升与极度干旱气候共同作用，湖泊进一步萎缩，最终演化为现代盐湖群。西部与北部发育星散状小型盐湖，而中部察尔汗盐湖成为沉积中心，形成厚层石盐与富钾盐矿，是中国最重要的现代钾盐成矿区；大浪滩-黑北凹地、昆特依、马海等凹地则表现为多类型、复合型钾盐矿床。

综上所述，柴达木盆地钾盐盐湖的演化经历了由广盆统一大湖的沉降—分割成多级凹陷—极端干旱下的初步成盐—断控叠加下的成矿鼎盛—现代孤立盐湖群的定型的完整过程。构造运动决定了湖盆的分割与迁移，气候干旱化推动了水体的浓缩与盐类沉积，物源供给则为卤水富集提供了物质保障。三者耦合作用不仅塑造了柴达木盆地盐湖演化的基本格局，也控制了钾盐成矿的空间展布与时间节律，使该区成为我国最重要的盐湖型钾盐成矿带。

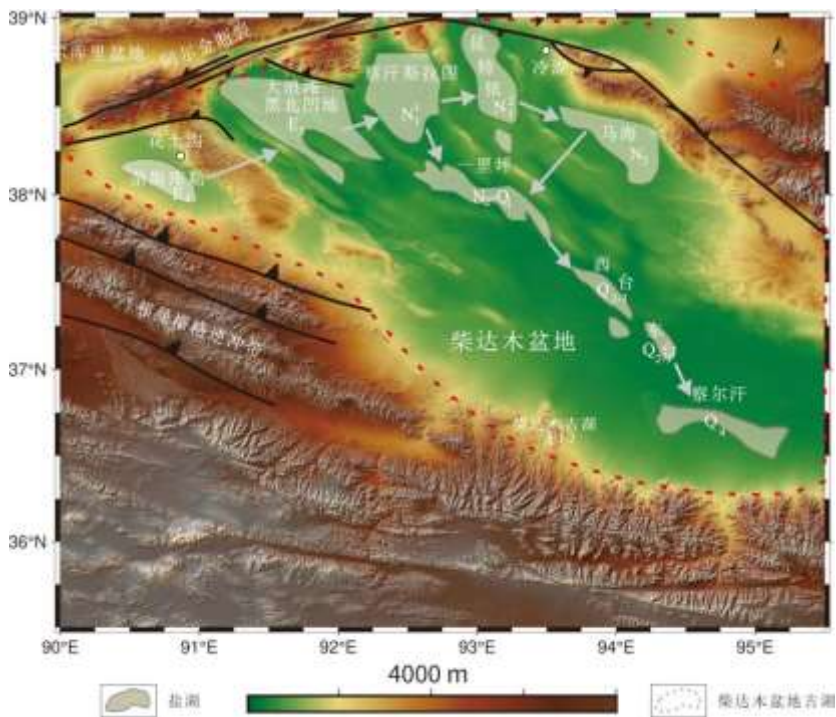


图 14 柴达木新生代含盐盆地迁移示意图（据文献[3] [13] [37] [105]）

Fig.14 Schematic Diagram of the Migration of Cenozoic Saline Basins in the Qaidam Basin.

6 结论

柴达木盆地钾盐成矿过程是新生代以来构造、气候与物源三重因素长期耦合的综合产物，体现了高原隆升背景下陆相盐湖盆地演化的典型模式。研究表明：

（1）构造演化主导成矿格局。新生代多幕次构造运动不仅主导了独特的“高山深盆”构造环境格局和次级凹陷的分异，而且通过褶皱与断裂体系的叠加演化，控制了卤水的富集通道与储集单元，实现了由统一大湖到分散盐湖群的演化。这种“构造分隔—断控承袭”的模式，是柴达木盆地钾盐成矿的空间基础。

（2）气候干旱化驱动钾盐富集。由新近纪的相对湿润逐渐过渡到第四纪的极端干旱，湖泊经历了扩张、收缩直至萎缩的演变过程。气候冷暖干湿交替的震荡过程，是控制盐类不断沉积与再分布的核心机制。干旱背景下的强烈蒸发作用加速了卤水浓缩和盐类沉积，使成矿过程与气候波动高度耦合。

(3) 物源供给是卤水演化的物质保障。周缘造山带的快速抬升与剥蚀持续向湖盆输送富钾物质, 河流沉积与深部循环卤水共同作用, 使卤水体系在长期演化过程中保持高钾离子浓度。这一过程确保了成矿物质的连续性与丰度。

(4) 柴达木盆地钾盐矿床的形成可归纳为三大成矿模式: 中部沉积中心型、前陆冲断带控矿型和西北部构造控矿型。三者分别受控于沉降中心的持续汇水、前陆冲断带的封闭次级湖盆以及走滑挤压构造形成的凹陷体系, 在气候干旱化和周缘山系物源供给的共同作用下, 形成了固—液并存的多类型钾盐矿床。这一格局揭示了构造、气候与物源的耦合机制。

(4) 钾盐成矿演化过程可划分为五个阶段: 古新世—早中新世的统一古湖沉降阶段、中中新世—上新世的多级凹陷分化阶段、上新世—早更新世的极端干旱浓缩阶段、早更新世—晚更新世的断控承袭与成矿鼎盛阶段, 以及晚更新世—全新世的现代盐湖群阶段。盆地的成钾演化体现了“构造汇水—气候控蒸—物源定质”的综合钾盐成矿模式。

致谢: 研究过程中得到了郑绵平院士, 侯献华研究员的指点帮助, 对此表示感谢。

7 参考文献

- [1] Yue HY, Guo P, Zhang TY *et al.* Integrated geophysical exploration of favorable potassium salt mineralization on the northeastern margin of Qaidam Basin, China. *J. Geophys. Eng.*, 2025, **22**(3): 889-900.
- [2] Cheng F, Garzzone C, Jolivet M *et al.* A new sediment accumulation model of Cenozoic depositional ages from the Qaidam Basin, Tibetan Plateau. *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 2018, **123**(11): 3101-3121.
- [3] Cheng F, Jolivet M, Guo Z, *et al.* Cenozoic evolution of the Qaidam basin and implications for the growth of the northern Tibetan plateau: A review. *Earth-Sci. Rev.*, 2021, **220**: 103730.
- [4] Stober I, Zhong J, Bucher K. From freshwater inflows to salt lakes and salt deposits in the Qaidam Basin, W China. *Swiss J. Geosci.*, 2023, **116**(1): 5.
- [5] 中华人民共和国自然资源部编. 中国矿产资源报告(2024). 2024. 10. https://www.mnr.gov.cn/sj/sjfw/kc_19263/zgkczybg/202410/P020241022640395744283
- [6] Xiong ZH, Wang SJ. Status and Progress on Key Technologies for Development and Utilization of Resources in Qarhan Salt Lake. *Chem. Miner. Process.*, 2021, **50**(1): 33-37. [熊增华, 王石军, 2021. 察尔汗盐湖资源开发利用现状及关键技术进展. 化工矿物与加工, **50**(1): 33-37.]
- [7] Bai YX, Wang SB, Guo S *et al.* Utilization and research status of salt lake resource elements in Qaidam Basin, Qinghai. *Salt Sci. Chem. Eng.*, 52(3), 1-6+19. [白燕祥, 王松博, 国爽等. 青海柴达木盆地盐湖资源元素利用及研究现状. 盐科学与化工, 2023, 52(3):1-6+19.]
- [8] Yuan JQ, Huo CY, Cai KQ. The high mountain-deep basin saline environment: A new genetic model of salt deposits. *Geological Review*, 1983, 29(2): 159-165. [袁见齐, 霍承禹, 蔡克勤. 高山深盆的成盐环境——一种新的成盐模式的剖析. 地质论评, 1983, 29(2):159-165.]
- [9] Chen KZ, Bowler JM. Preliminary study on sedimentary characteristics and evolution of palaeoclimate of Qarhan Salt Lake in Qaidam Basin. *Science in China (Series B)*, 1985, (5): 463-473. [陈克造, J.M. Bowler. 柴达木盆地察尔汗盐湖沉积特征及其古气候演化的初步研究. 中国科学(B 辑), 1985, (5):463-473.]
- [10] 张彭熹. 柴达木盆地盐湖. 北京: 科学出版社, 1987: 1-233.
- [11] Qu YH. A new pathway of mother brine supply for potassium salt deposits: deep brine recharge. *Mineral Petrology*, 1982, 1: 7-14. [曲懿华. 钾盐矿床母液来源的新途径——深卤补给. 矿物岩石, 1982, 1: 7-14.]
- [12] Liu CL, Wang ML, Jiao PC, *et al.* Sedimentary characteristics and origin of polyhalite in Lop Nur salt lake, Xinjiang. *Mineral Deposits*, 2008, 27(6): 705-713. [刘成林, 王弭力, 焦鹏程等. 罗布泊杂卤石沉积特征及成因机理探讨. 矿床地质, 2008, 27(6):705-713.]
- [13] Zheng MP, Zhang YS, Liu XF, *et al.* Progress and prospects of salt lake research in China. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90(9):

- 2123-2166. [郑绵平, 张永生, 刘喜方等. 中国盐湖科学技术研究的若干进展与展望. 地质学报, 2016, 90(9):2123-2166.]
- [14] Zheng MP, Zhang Z, Zhang YS *et al.* New insights and progress on potash exploration patterns in China. *Acta Geosci. Sin.* 2012, **33**(3), 280–294. [郑绵平, 张震, 张永生等. 我国钾盐找矿规律新认识和进展. 地球学报, 2012, **33**(3):280-294.]
- [15] Li HP, Hou XH, Zheng MP *et al.* Discussion on metallogenic model and prospecting direction of Pleistocene gravel brine potassium deposit in western Qaidam Basin. *J. Lake Sci.* 2022, **34**(3), 1043–1054. [李洪普, 侯献华, 郑绵平等. 柴达木盆地西部更新统砂砾型深层卤水钾矿成矿模式与找矿方向探讨. 湖泊科学, 2022, **34**(3):1043-1054.]
- [16] Shan FS, Qin ZJ, Fan QS *et al.* The "Concave-Oral-Convex" metallogenic model of potash deposits and its prospecting methodology. *Journal of Salt Lake Research*, 2018, **26**(1), 1–6+31. [山发寿, 秦占杰, 樊启顺等. “凹口凸” 钾盐成矿模式与找钾方法. 盐湖研究, 2018, **26**(1):1-6+31.]
- [17] Liu XX, Yue X, Yu XL *et al.* Characteristics and genesis of the double potash layer metallogenetic model of Kuntayi Depression in the northwest margin of Qaidam Basin. *J. Lake Sci.* 2020, **32**(1), 246–258. [刘溪溪, 岳鑫, 于小亮等. 柴达木盆地西北缘昆特依凹陷的双层钾盐成矿模式特征及成因. 湖泊科学, 2020, **32**(1):246-258.]
- [18] 崔庆岗, 侯新星, 来永伟等. 柴达木盆地宗马海湖地区钾盐矿床成矿规律与成矿预测研究. 山东国土资源, 2019, **35**(10):17-25.
- [19] Li GX, Shi YJ, Zhang YS *et al.* New progress and enlightenment of oil and gas exploration and geological understanding in Qaidam Basin. *Lithol. Reserv.*, 2022, **34**(6): 1-18. [李国欣, 石亚军, 张永庶等. 柴达木盆地油气勘探、地质认识新进展及重要启示. 岩性油气藏, 2022, **34**(6): 1-18.]
- [20] Wang EC, Xu FY, Zhou JX *et al.* Eastward migration of the Qaidam basin and its implications for Cenozoic evolution of the Altyn Tagh fault and associated river systems. *GSA Bull.*, 2006, **118**(3-4): 349-365.
- [21] Wang YG, Li YM, Chen ZY *et al.* Evolution of the Quaternary sedimentary environment in Qaidam Basin. *Hydrol. Eng. Geol.*, 2009, **36**(1): 128-132. [王永贵, 李义民, 陈宗颜等. 柴达木盆地第四纪沉积环境演化. 水文地质工程地质, 2009, **36**(1):128-132.]
- [22] Song H, Fan Q, Li Q *et al.* Recharge processes limit the resource elements of Qarhan Salt Lake in western China and analogues in the evaporite basins. *J. Oceanol. Limnol.*, 2023, **41**(4): 1226-1242.
- [23] Yin A, Dang YQ, Chen XH *et al.* Cenozoic evolution and tectonic reconstruction of Qaidam Basin: Insights from seismic profile interpretation. *J. Geomech.*, 2007, **13**(3): 193-211. [尹安, 党玉琪, 陈宣华等, 2007. 柴达木盆地新生代演化及其构造重建——基于地震剖面的解释. 地质力学学报, **13**(3): 193-211.]
- [24] Yin A, Dang YQ, Zhang M *et al.* Cenozoic tectonic evolution of the Qaidam basin and its surrounding regions (Part 3): Structural geology, sedimentation, and regional tectonic reconstruction. *Geological Society of America Bulletin*, 2008, **120**(7-8), 847-876.
- [25] Han CM, Fan QS, Han G *et al.* Source-to-sink process of brine-type lithium deposits and its genetic link to hydromorphic evolution in Qaidam Basin watersheds. *J Salt Lake Res.*, 2023, **31**(2): 9-18+102. [韩春梅, 樊启顺, 韩光等. 柴达木盆地盐湖卤水型锂矿源汇过程及流域水文地貌演化与成矿联系. 盐湖研究, 2023, **31**(02):9-18+102.]
- [26] Lü BF, Zhang YQ, Yang SY. Characteristics of tectonic systems and their geodynamic significance for basin formation in Qaidam Basin. *Geological Review*, 2011, **57**(2), 167–174. [吕宝凤, 张越青, 杨书逸. 柴达木盆地构造体系特征及其成盆动力学意义. 地质论评, 2011, **57**(2):167-174.]
- [27] Wei HC, Fan QS, An FY *et al.* Chemical elements in core sediments of the qarhan salt lake and Palaeoclimate evolution during 94–9 ka. *Acta Geosci. Sin.*, 2016, **37**(2): 193-203. [魏海成, 樊启顺, 安福元等. 94–9 ka 察尔汗盐湖的气候环境演化过程. 地球学报, 2016, **37**(2): 193-203.]
- [28] Ren QH, Gao DL, Zhang Y *et al.* Geochemical characteristics of brines in the Dayantan mining area of Kuntayi Salt Lake, Qaidam Basin. *J. Salt Lake Res.*, 2018, **26**(2): 34-42. [任倩慧, 高东林, 张岩等. 柴达木盆地昆特依盐湖大盐滩矿区卤水地球化学特征分析. 盐湖研究, 2018, **26**(2):34-42.]
- [29] Bai HK, Pan T, Han G *et al.* Hydrochemical Characteristics and Genesis of Sand–Gravel Brine Deposits in the Mahai Basin of the Northern Qinghai–Tibetan Plateau. *Water*, 2024, **16**(24): 3562.
- [30] Zheng MP, Hou XH, Zhang YS *et al.* Progress in the investigation of potash resources in western China. *China Geology*, 2018, **1**(3): 392-401.
- [31] Wang D, Zhang H, Liu CL *et al.* Distribution characteristics and resource potential evaluation of low grade solid potassium in

Qarhan Salt Lake. *Research Square*, 2023.

- [32] Yi JX, Fan QS, Wei HC *et al.* The Characteristics of the Mineral Assemblage and the Forming Clue in Qarhan Salt Lake. *J. Salt Lake Res.*, 2017, **25**(2): 47-54. [弋嘉喜,樊启顺,魏海成等. 察尔汗盐湖矿物组合特征及其成因指示. 盐湖研究, 2017, **25**(2):47-54.]
- [33] Wang D, Liu CL, Shen LJ *et al.* Quantitative records of paleotemperature in Qarhan Salt Lake, Qaidam Basin and its relationship with potassium deposits. *Scientific Reports*, 2024, **14**(1): 18678.
- [34] Chen AD, Zheng MP, Yao HT *et al.* Magnetostratigraphy and ²³⁰Th dating of a drill core from the southeastern Qaidam Basin: Salt lake evolution and tectonic implications. *Geoscience Frontiers*, 2018, **9**(3): 943-953.
- [35] Wang JY, Fang XM, Appel E *et al.* Magnetostratigraphic and radiometric constraints on salt formation in the Qaidam Basin, NE Tibetan Plateau. *Quaternary Science Reviews*, 2013, **78**: 53-64.
- [36] Zhang JM, Fu YW, Tian CX *et al.* Lithofacies paleogeography and genesis of salt rock in the late Eocene of western Qaidam Basin. *Journal of Stratigraphy*, 2021, **45**(4): 545-553. [张金明, 付彦文, 田成秀等. 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, 2021, **45**(4):545-553.]
- [37] Pan T, Jia JT, Li DS *et al.* Mineralization Series and Prospecting Direction of Salt and Groundwater Mineral Deposits in Qaidam Basin, China. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2024, **46**(1): 96-113.[潘彤, 贾建团, 李东生等. 柴达木盆地盐类及地下水矿床成矿系列与找矿方向. 地球科学与环境学报, 2024, **46**(1):96-113.]
- [38] Fu JL, Yu SS, Li SJ *et al.* Availability of Tertiary Oilfield Water Resources in Western Qaidam Basin. *Journal of Salt Lake Research*, 2005, **13**(3): 17-21. [付建龙, 于升松, 李世金等. 柴达木盆地西部第三系油田卤水资源可利用性分析. 盐湖研究, 2005, **13**(3):17-21.]
- [39] Wu ZX, Wang YT, Shao ZY *et al.* Geochemical Characteristics and Source Area Analysis of Quaternary Mudstones in the Sanhu Depression of the Qaidam Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2025: 1-24. [吴志雄, 王晔桐, 邵泽宇等. 柴达木盆地三湖坳陷第四系泥岩地球化学特征及其源区分析. 沉积学报, 2025:1-24.]
- [40] Fan F, Hou XH, Zheng MP *et al.* Homogenization temperature of fluid inclusions in Early-Middle Pleisto- cenehalitefrom Liang Hole ZK02 in Dalangtan area, Qaidam Basin and its constraints on potash mineralization. *Earth Science Frontiers*, 2021, **28**(6): 105-114. [樊馥, 侯献华, 郑绵平等. 柴达木盆地大浪滩梁 ZK02 孔早—中更新世石盐纯液相流体包裹体均一温度及其对钾盐成矿的约束. 地学前缘, 2021, **28**(6):105-114.]
- [41] Liu XQ, Cai KQ, Yu SS. Geochemical simulation of formation and evolution of salt lakesand their water sources in Qardam Basin:Application of Pitzer's model. *Geochimica*, 2002, (5): 501-507. [刘兴起, 蔡克勤, 于升松. 柴达木盆地盐湖形成演化与水体来源关系的地球化学初步模拟: Pitzer 模型的应用. 地球化学, 2002, (5):501-507.]
- [42] Hu XM, Garzanti E, Wang JG *et al.* The timing of India-Asia collision onset—Facts, theories, controversies. *Earth-Science Reviews*, 2016, **160**: 264-299.
- [43] Zheng MP, Zhang XF, Hou XH *et al.* Geological Environments of the Late Cenozoic Lakes and Salt-forming and Oil-gas Pool-forming Actions in the Tibetan Plateau. *Acta Geosci. Sin.*, 2013, **34**(2): 129-138. DOI:10.3975/cagsb.2013.02.01. [郑绵平,张雪飞, 侯献华等. 青藏高原晚新生代湖泊地质环境与成盐成藏作用. 地球学报, 2013, **34**(2):129-138.]
- [44] Pan T, Zhang JM, Li HP *et al.* Division of Salt Minerals Metallogenic Units in Qaidam Basin. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)* , 2022, **52** (5): 1446-1460. [潘彤,张金明,李洪普等.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), 2022, **52**(5):1446-1460.]
- [45] He Z, Zhang XY, Huang YM *et al.* Cenozoic Tectonic Movements of the North Qaidam Basin and Their Effects on the Evolution of Salt Lakes. *J. Salt Lake Res.*, 2016, **24**(1): 1-7. [何照,张西营,黄聿铭,等.柴达木盆地北部新生代构造运动及其对盐湖演化的影响.盐湖研究, 2016, **24**(1):1-7.]
- [46] Zhong JA, Lin YJ, Wang FM *et al.* Origin and Formation Mechanisms of Potassium- and Lithium-Rich Brines in the Triassic Strata of Northeastern Sichuan Basin, South China. *Aquat. Geochem.*, 2024, **30**(3): 163–178.
- [47] Ren QH, Li BK, Zhang Y *et al.* Origin and evolution of intercrystalline brine in the northern Qaidam Basin based on hydrochemistry and stable isotopes. *Front. Environ. Sci.*, 2023, **11**:1106181.

- [48] Liu CL, Yang TZ, Li P *et al.* Origin mechanism of overpressure in saline lacustrine formation of the Paleogene and Neogene in the Western Qaidam Basin, NW China. *Carbonates and Evaporites*, 2024, **39**(1).
- [49] Feng DH, Liu CL, Tian JX *et al.* Key Controlling Factors of Hydrocarbon Accumulation of Fine-Grained Mixed Sequence in a Saline Lacustrine Basin: An Integrated Research of Petroleum System in the Northwestern Qaidam Basin, Qinghai-Tibet Plateau. *Nat. Resour. Res.*, 2025:1-26.
- [50] Luo JX, He MY, Chang H *et al.* Does climate change lead to potash deposits? A perspective of Lop Nur Salt Lake, China. *Quaternary International*, 2024, **692**: 56-72.
- [51] Guo JM, Wei XB, Long GH *et al.* Three-dimensional structural model of the Qaidam basin: Implications for crustal shortening and growth of the northeast Tibet. *Open Geosciences*, 2017, **9**(1): 174-185.
- [52] Guo P, Liu CY, Huang L *et al.* Genesis of the late Eocene bedded halite in the Qaidam Basin and its implication for paleoclimate in East Asia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2017, **487**: 364-380.
- [53] 杨建文.柴达木盆地东台吉乃尔盐湖沉积物硼同位素特征及其环境意义研究[学位论文].西宁:中国科学院大学(中国科学院青海盐湖研究所),2023.
- [54] 周震鑫.察尔汗盐湖全新世以来 OSL 年代及其沉积速率研究[学位论文].西宁:中国科学院大学(中国科学院青海盐湖研究所),2023
- [55] Miao YF, Fang XM, Herrmann M *et al.* Miocene pollen record of KC-1 core in the Qaidam Basin, NE Tibetan Plateau and implications for evolution of the East Asian monsoon. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 2011, **299**: 30-38.
- [56] Miao YF, Herrmann M, Wu FL *et al.* What controlled Mid-Late Miocene long-term aridification in Central Asia? - Global cooling or Tibetan Plateau uplift: a review. *Earth-Sci. Rev.* 2012, **112**(3-4): 155-172.
- [57] Zan, JB, Fang, XM, Yan, MD *et al.*, 2015. Lithologic and rock magnetic evidence for the Mid-Miocene climatic optimum recorded in the sedimentary archive of the Xining Basin, NE Tibetan Plateau. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 2015, **431**: 6-14.
- [58] Zachos JC, Pagani M, Sloan L *et al.* Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. *Science*, 2001, **292**(5517): 686-693.
- [59] Zachos JC, Dickens GR, Zeebe RE. An early Cenozoic perspective on greenhouse warming and carbon-cycle dynamics. *Nature*, 2008, **451**(7176): 279-283.
- [60] Wu FL, Fang XM, Herrmann M, *et al.* Extended drought in the interior of Central Asia since the Pliocene reconstructed from sporopollen records. *Global and Planetary Change*, 2011, **76**(1-2): 16-21..
- [61] Song CH, Hu SH, Han, WX *et al.* Middle Miocene to earliest Pliocene sedimentological and geochemical records of climate change in the western Qaidam Basin on the NE Tibetan Plateau. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 2014, **395**: 67-76.
- [62] 王朝旭, 赵艳军,王青春等, 马海盐湖北部矿段全新世 沉积特征及沉积环境的演化. 河北地质大学学报, 2021, **44**(5):23-31.
- [63] Guo P, Liu CY, Huang L *et al.* Palaeohydrological evolution of the late Cenozoic saline lake in the Qaidam Basin, NE Tibetan Plateau: Tectonic vs. climatic control. *Glob. Planet. Change*, 2018, **165**: 44-61.
- [64] Han WX, Fang XM, Zhang T. New Model for Orbital Forcing Salt Formation in the Qaidam Basin. *Acta Geoscientica Sinica*, 2024, **45**(5): 715-727. [韩文霞, 方小敏, 张涛. 天体轨道参数调控柴达木盆地第四纪盐类资源形成的新模式. 地球学报, 2024, **45**(5):715-727.]
- [65] 黄麒, 韩凤清. 柴达木盆地盐湖演化与古气候波动. 北京: 科学出版社, 2007.
- [66] 李洪普, 侯献华, 潘彤等. 柴达木盆地深层含钾卤水成矿与利用研究. 武汉: 中国地质大学出版社, 2021.
- [67] Zhang XR, Fan QS, Li QK *et al.* The source, distribution, and sedimentary pattern of K-rich brines in the Qaidam Basin, western China. *Minerals*, 2019, **9**(11): 655.
- [68] Xiao Y, Shao JL, Cui YL *et al.* Groundwater circulation and hydrogeochemical evolution in Nomhon of Qaidam Basin, northwest China. *J. Earth Syst. Sci.*, 2017, **126**(2):1-16.
- [69] Zhao YJ, Wang N, Shen LJ *et al.* Contribution of deep material sources to shallow potash formation of the Quaternary Mahai Salt Lake in the Qaidam Basin: Evidence from isotopes and trace Elements. *Ore Geology Reviews*, 2024, **171**: 106166.
- [70] Song HL, Fan QS, Li QK *et al.* Recharge processes limit the resource elements of Qarhan Salt Lake in western China and analogues

- in the evaporite Basins. *J. Oceanol. Limnol.*, 2023, **41**(4): 1226–1242.
- [71] Dang XY, Lu N, Gu XF *et al.* The relationship between groundwater and natural vegetation in Qaidam Basin. *J. Groundw. Sci. Eng.*, 2021, **9**(4): 341-349.
- [72] Fan QS, Lowenstein TK, Wei HC, *et al.* Sr isotope and major ion compositional evidence for formation of Qarhan Salt Lake, western China. *Chemical Geology*, 2018, 497: 128-145.
- [73] Gao YY, Wen SM, Fan R *et al.* Progress and applications of extraction technologies for associated resources in the produced water of oil and gas field. *Chemical Engineering of Oil & Gas*, 2024, 53(5): 119-128. [高云云, 文绍牧, 范锐等. 油气田水伴生资源提取技术进展及应用. *石油与天然气化工*, 2024, 53(5):119-128.]
- [74] Ai ZY, Li YS, Tang QL *et al.* Preliminary Study on the Source of formation — ore fluids of Polyhalite in Kuntay Playa Based on Hydrogeochemical Simulation. *Journal of Salt Lake Research*, 2018, 26(4): 44-50+72. [艾子业, 李永寿, 唐启亮等. 基于水文地球化学模拟的昆特依盐湖杂卤石成矿流体来源初步研究. *盐湖研究*, 2018, 26(4):44-50+72.]
- [75] 李玉文. 柴达木盆地昆特依盐湖富钾卤水地球化学特征及成因[学位论文], 西宁: 中国科学院大学(中国科学院青海盐湖研究所),2018
- [76] Li JS, Li TW, Ma YQ *et al.* Distribution characteristics and enrichment mechanism of key metal mineral elements of brine Li and Rb in Qaidam basin. *Science China: Earth Sciences*, 2022, 52(3): 474-485. [李建森, 李廷伟, 马云麒等, 2022. 柴达木盆地卤水型 Li、Rb 关键金属矿产元素分布特征及富集机制. *中国科学:地球科学*, 52(3): 474-485.]
- [77] Li YS, Pan T, Li HP *et al.* Source and genesis of Ca-Cl type brines in Qaidam Basin, Qinghai-Tibetan Plateau: evidence from hydrochemistry as well as B and Li isotopes. *Front. Environ. Sci.*, 2024, 11: 1248294.
- [78] Zhao YJ, Jiao PC, Wang MQ, *et al.* Characteristics of lithium-rich brine, reservoir physical properties and analysis on water-rich areas in the Yiliping salt lake, Qaidam basin. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(7): 2062-2072. [赵艳军,焦鹏程,汪明泉,等.柴达木盆地一里坪盐湖富锂卤水特征、储层物性及富水区分析. *地质学报*, 2021, 95(7): 2062-2072.]
- [79] Chen JY, Wang QC, Chen JN, *et al.* Discussion on the genesis of Pleistocene deep pore brine of sand—gravel type in the Mahai area, northern margin of Qaidam Basin. *Geological Review*, 2025, 71(1): 2025010001. [陈晶源,汪青川,陈金牛,等. 柴北缘马海地区更新统砂砾型深层孔隙卤水成因探讨. *地质论评*, 2025, 71(1):2025010001.]
- [80] 沈振枢,程果,乐昌颂,等.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,1993, 132–134.
- [81] 潘彤, 张金明, 田永革, 等. 柴达木盆地IV级成矿单元找矿潜力. *世界石油工业*, 2025, 32(3).]
- [82] 韩积斌. 尕斯库勒盐湖盆地水文系统中高浓度铀的迁移富集行为[学位论文]. 中国地质大学, 2018.]
- [83] Ke X, Zhang Z, Song T *et al.* Quaternary paleogeographic reconstruction of the Qaidam Basin, northern Tibetan Plateau. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2025: 113056.
- [84] Feng N, Qin XW, Ma YL *et al.* Discussion on the geochemical characteristics and genesis of intercrystalline brine in the mahai basin, northern Margin of Qaidam basin. *Journal of Salt Lake Research*, 2025: 1-10. [冯宁, 秦西伟, 马玉亮等. 柴北缘马海盆地晶间卤水地球化学特征及成因探讨. *盐湖研究*, 2025:1-10.]
- [85] Ye CY, Wang ZM, Zhao SQ *et al.* Sedimentary Characteristics Since 280 ka B.P. in Gasikule Salt Lake in Western Qaidam Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(1): 85-92. [叶传永, 王志明, 赵世勤等. 柴达木盆地西部尕斯库勒盐湖 280 ka 以来沉积特征. *沉积学报*, 2014, 32(1):85-92.]
- [86] Li B, Chen XH, Shi Z *et al.* Cenozoic Kinematic Evolution of the Northern Tibetan Plateau: Implication for the Tectonic Setting of Deep Brines Mineralization in the Southwestern Qaidam Basin. *Tectonics*, 2025, **44**(1).
- [87] Wang YT, Sun GQ, Bo SS *et al.* Detrital zircon U Pb dating and geochemistry of the Paleogene-Neogene sediments in the Qaidam Basin (China): Implications for provenance and Tectonics. *Glob. Planet. Change*, 2023, **228**: 104202.
- [88] Zhang YS, Zheng MP. Metallogenic models of potassium ore deposits in China and demonstration of deep exploration technology. *Earth Science Frontiers*, 2021, 28(6): 1-9. [张永生, 郑绵平. 中国钾盐矿产基地成矿规律与深部探测技术示范. *地学前缘*, 2021, 28(6):1-9.]
- [89] Wang LW, Wang MX, Bai BY, *et al.* Sedimentary characteristics and metallogenic mechanism of potassium salt in Dongling lake, northern Qarhan Playa. *Journal of Salt Lake Research*, 2025, 33 (3) : 70-78. [王利文, 王明祥, 白宝云等. 察尔汗北

部东陵湖钾盐沉积特征与成矿机理. 盐湖研究, 2025, 33 (3) : 70-78.]

- [90] Zhou ZX, Lu XH, Yang JW *et al.* OSL chronology in sediment of the Qarhan salt lake since Holocene. *Journal of Salt Lake Research*, 2024, 32(4): 40-45. [周震鑫, 卢晓航, 杨建文等. 全新世以来察尔汗盐湖沉积物的 OSL 年代学研究. 盐湖研究, 2024, 32(4): 40-45.]
- [91] Long P, Zhao Y, Sun X, *et al.* Lithium enrichment in the Qarhan Salt Lake (China) was a long-term process driven by interglacial-glacial cycles. *Communications Earth & Environment*, 2025, 6(1): 307.
- [92] Zhu YZ, Li ZY, Wu BH, *et al.* The formation of the Qarhan Saline Lakes as viewed from the Neotectonic movement. *Acta Geologica Sinica*, 1990, 1:13~21. [朱允铸, 李争艳, 吴必豪等. 从新构造运动看察尔汗盐湖的形成. 地质学报, 1990, 1:13~21.]
- [93] 张彭熹, 张保珍, Lowenstein TK 等. 古代异常钾盐蒸发岩的成因: 以柴达木盆地察尔汗盐湖钾盐的形成为例. 北京: 科学出版社, 1993:27-121.
- [94] Fan QS, Li JS, Qin ZJ *et al.* The research progress on the origin of CaCl₂ brines and the further scientific issues. *Journal of Salt Lake Research*, 2021, 29(1): 1-9. [樊启顺, 李建森, 秦占杰等. 氯化钙型卤水成因的研究进展及其科学问题. 盐湖研究, 2021, 29(1):1-9.]
- [95] Wu BH, Duan ZH, Guan YH *et al.* Deposition of Potash - Magnesium Salts in the Qarhan Playa, Qaidam Basin. *Acta Geologica Sinica-English*, 1986, 60(3): 79-90.
- [96] Yang Q. Distribution Law of Salt Layer and Potassium Deposit in Qarhan Salt Lake. *Chemical Geology*, 1993, (3): 186-195. [杨谦. 察尔汗盐湖盐层及钾矿层的分布规律. 化工地质, 1993, (3):186-195.]
- [97] 魏新俊, 邵长铎, 王弭力. 柴达木盆地西部富钾盐湖物质组分、沉积特征及形成条件研究. 北京: 地质出版社, 1993.
- [98] Yang FK, Fan QS, Han G *et al.* Origin and evolution of deep K-rich confined brine in Mahai basin, Qinghai-Tibet Plateau. *Aquatic Geochemistry*, 2024, 30(3): 239-258. DOI: 10.1007/s10498-024-09424-9.
- [99] Zhang JM, Pan T, Song TZ, *et al.* Lithofacies paleogeographic characteristics of the Late Pleistocene in Qaidam Basin [J/OL]. *Journal of Palaeogeography*, 2025: 1-15. [张金明, 潘彤, 宋泰忠等. 柴达木盆地晚更新世岩相古地理特征. 古地理学报, 2025: 1-15.]
- [100] 王朝旭. 柴达木盆地马海盐湖全新世沉积环境及钾盐成矿作用[学位论文]. 河北地质大学, 2022.
- [101] Zheng MP, Hou XH, Yu CQ *et al.* The leading role of salt formation theory in the breakthrough and important progress in potash deposit prospecting. *Acta Geosci. Sin.*, 2015, 36(2): 129-139. [郑绵平, 侯献华, 于常青等. 成盐理论引领我国找钾取得重要进展. 地球学报, 2015, 36(2):129-139.]
- [102] Fan QS, Ma HZ, Tan HB *et al.* Characteristics and origin of brines in western Qaidam Basin. *Geochimica.*, 2007, 36(6): 601-611. [樊启顺, 马海州, 谭红兵等. 柴达木盆地西部卤水特征及成因探讨. 地球化学, 2007, 36(6):601-611.]
- [103] Hou XH, Wang W, Zheng MP *et al.* Seismic response characteristics of the Heibei Concave-Dalangtan potassium-rich deep brine reservoir in western Qaidam Basin. *Earth Science Frontiers*, 2021, 28(6): 134-145. [侯献华, 王伟, 郑绵平等. 柴达木盆地西部黑北凹地——大浪滩深层卤水钾盐储卤层地震响应特征研究. 地学前缘, 2021, 28(6):134-145.]
- [104] Guo WX. Hydrogeological conditions and development countermeasures of Kuntay Salt Lake, Qaidam Basin. *Geology of Chemical Minerals*, 2022, 44(4):369-374. [郭文祥. 柴达木盆地昆特依大盐滩钾盐矿水文地质条件及开发对策. 化工矿产地质, 2022, 44(4):369-374.]
- [105] Yin A, Dang Y, Zhang M, *et al.* Cenozoic tectonic evolution of Qaidam basin and its surrounding regions (part 2): Wedge tectonics in southern Qaidam basin and the Eastern Kunlun Range. 2007.