

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[J].地球科学与环境学报,2024,46(1):96-113.

PAN Tong, JIA Jian-tuan, LI Dong-sheng, et al. Mineralization Series and Prospecting Direction of Salt and Groundwater Mineral Deposits in Qaidam Basin, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2024, 46(1): 96-113.

DOI:10.19814/j.jese.2023.10007

柴达木盆地盐类及地下水矿床成矿系列与找矿方向

潘 彤^{1,2}, 贾建团^{2,3*}, 李东生^{2,3}, 郭廷峰¹, 李小龙³, 韩 光^{2,3},
张晓冬^{2,3}, 张绍栋¹, 刘久波^{2,3}, 汪青川^{2,3}, 苗 青^{2,3}

(1. 青海省地质矿产勘查开发局, 青海 西宁 810008; 2. 青海省柴达木盆地盐湖资源勘探研究重点实验室, 青海 格尔木 816099; 3. 青海省柴达木综合地质矿产勘查院, 青海 格尔木 816099)

摘 要:新生代以来,柴达木盆地形成了复杂的构造体系及一系列相对独立的构造、成矿单元。柴达木盆地不同的构造单元因沉积环境与成矿条件的差异,在第四系浅层盐湖区、更新统冲洪积扇区、古近系—新近系圈闭构造区等特定的时空范围形成了赋存状态、矿物组合等相对独特的矿产。对柴达木盆地盐类及地下水资源时空分布特征、成矿作用及成矿地质背景进行了归纳研究,划分了盆地盐类及地下水矿床成矿系列。以成矿系列理论为指导,结合柴达木盆地最新的勘查研究成果,对盆地演化、盐类成矿单元、矿产时空分布及成矿类型等进行梳理,将柴达木盆地盐类及地下水矿床划分为 3 个成矿系列、6 个成矿亚系列、15 个矿床式。根据矿床自然分类及矿床成矿系列“全位成矿、缺位找矿”的预测思维,提出了柴达木盆地盐类及地下水矿产的找矿方向。

关键词:成矿系列;找矿方向;盐类矿产;地下水;成矿单元;矿床类型;矿产分布;柴达木盆地
中图分类号:P612 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-6561(2024)01-0096-18

Mineralization Series and Prospecting Direction of Salt and Groundwater Mineral Deposits in Qaidam Basin, China

PAN Tong^{1,2}, JIA Jian-tuan^{2,3*}, LI Dong-sheng^{2,3}, GUO Ting-feng¹, LI Xiao-long³,
HAN Guang^{2,3}, ZHANG Xiao-dong^{2,3}, ZHANG Shao-dong¹, LIU Jiu-bo^{2,3},
WANG Qing-chuan^{2,3}, MIAO Qing^{2,3}

(1. Bureau of Geological Exploration & Development of Qinghai Province, Xining 810008, Qinghai, China;
2. Qinghai Provincial Key Laboratory of Exploration and Research of Salt Lake Resources in Qaidam Basin, Golmud 816099, Qinghai, China; 3. Qaidam Integrated Geological Exploration Institute of Qinghai Province, Golmud 816099, Qinghai, China)

Abstract: Since the Cenozoic, Qaidam Basin has developed a complex tectonic system and a series of relatively independent tectonic and metallogenic units. Within specific spatiotemporal ranges including the shallow salt lake area in Quaternary, the alluvial-proluvial fan area in Pleistocene, and the trap structural area of Paleogene-Neogene, the different tectonic units in Qaidam Basin have brought minerals with relatively unique occurrence statuses and mineral compositions

收稿日期:2023-10-09;修回日期:2023-12-29 投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC2904301);青海省“昆仑英才·高端创新创业人才”计划项目

作者简介:潘 彤(1966-),男,青海乐都人,青海省地质矿产勘查开发局教授级高级工程师,博士研究生导师,理学博士,
E-mail: pant66@163.com.

* 通信作者:贾建团(1983-),男,甘肃通渭人,青海省柴达木综合地质矿产勘察院高级工程师, E-mail: czy@qhcz. cn.

because of variations in the sedimentary environment and metallogenic conditions. The inductive research on the spatiotemporal distribution characteristics, mineralization, and metallogenic geological background of basin salts and groundwater resources, along with the classification of metallogenic series for basin salt and groundwater mineral deposits, holds great significance in guiding future exploration, ore prospecting, and resource development and utilization, as well as ensuring the smooth construction of a world-class salt lake industrial base. Guided by the metallogenic series theory, the basin evolution, salt metallogenic units, spatiotemporal distribution of mineral resources, and metallogenic types are systematically collated based on the latest exploration and research findings on Qaidam Basin. As a result, the salt and groundwater mineral deposits in Qaidam Basin are classified into three metallogenic series, six metallogenic sub-series, and fifteen ore deposit types. Moreover, utilizing the natural classification of deposits and the predictive mindset of inevitable mineralization in certain spatiotemporal dimensions and prospecting/research of unexplored or unpredicted deposits, the effective prospecting directions for salt and groundwater mineral deposits in Qaidam Basin are presented.

Key words: mineralization series; prospecting direction; salt mineral; groundwater; metallogenic unit; deposit type; mineral distribution; Qaidam Basin

0 引 言

被誉为“聚宝盆”之称的柴达木盆地,是国内盐湖盐类资源最为丰富、勘查开发程度最高的盆地。随着我国钾、锂、硼等战略性矿产资源对外依存度持续走高,以及习近平总书记对青海省“加快建设世界级盐湖产业基地”的要求,近年来针对柴达木盆地盐类资源和支撑盐类资源开发的水资源勘查力度持续加大,针对盐类及地下水资源成矿理论、找矿方法、开发技术等方面的研究被业内学者高度重视。

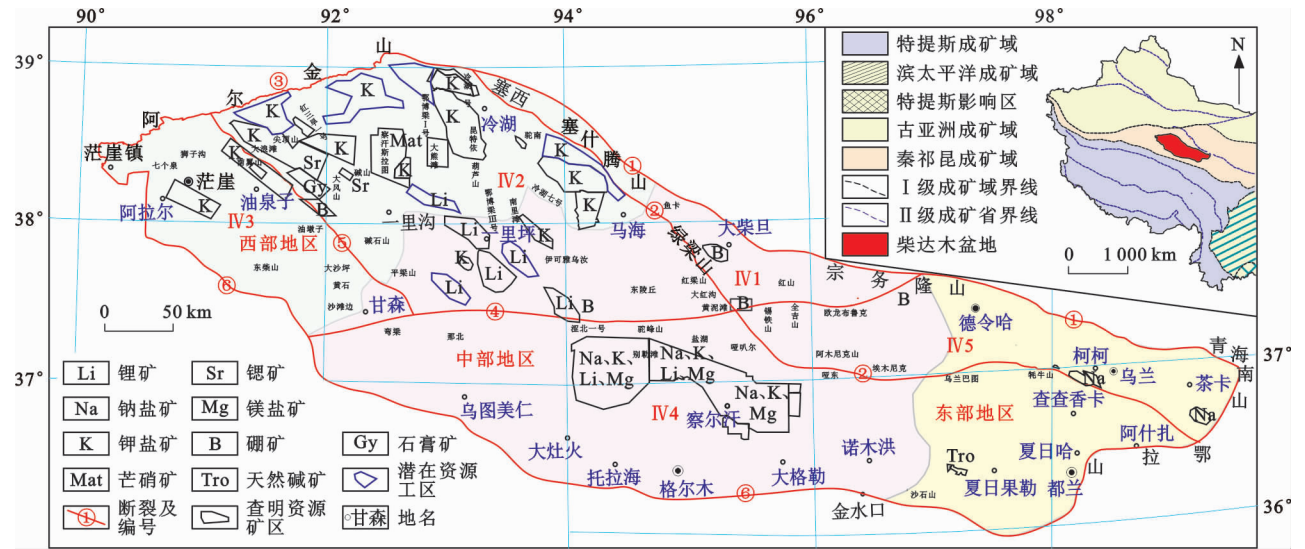
柴达木盆地盐湖盐类矿产(含锂、锶有色金属矿产)时空分布跨度大、固液相并存、组分复杂。现代浅层盐湖一般赋存于300 m以浅,固液相并存,现阶段勘查及开发利用程度较高,国内外专家学者针对该类型矿产的研究较为深入^[1-9]。深藏卤水一般赋存于450 m以深,近年来该类型卤水找矿取得了重大突破:在柴达木盆地西部大浪滩—黑北凹地、察汗斯拉图凹地、昆特依凹地和马海凹地发现了新类型砂砾型深层卤水钾盐矿床^[10],在鸭湖、红三旱四号等背斜构造区发现了深藏富锂、硼、钾卤水^[11-15];在马海地区湖积黏土中发现黏土型锂矿^[16-19];可供生产生活利用的地下水资源主要分布于盆地周缘,中东部较为丰富而西部相对短缺^[20]。本文从矿床成矿系列理论“四个一”内涵^[21-23]着眼,以区域成矿构造时空演化-成矿作用耦合关系为统一体,探讨柴达木盆地盐类及地下水矿床(本文指淡水资源)成矿的自然分类和时空演化规律,以成矿系列理论指导

盆地矿产勘查实践,划分了盆地盐类及地下水矿产成矿系列,提出柴达木盆地盐类及地下水找矿方向,把握新一轮找矿突破战略行动实施的契机,提升柴达木盆地战略性矿产资源保障能力,助力世界级盐湖产业基地建设。

1 研究区概况

柴达木盆地为青藏高原北部一个大型中生代山间拆离伸展盆地^[24],位于秦祁昆成矿域中部(图1),为一轴向NW—SE且自西北向东南缓缓倾斜的不规则菱形内陆汇水盆地,汇水域面积约为 $25.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[25]。中生代以来,在印度板块持续向北俯冲的影响^[26-27]下,柴达木盆地长期处于压扭走滑的动力学环境中,最终形成小规模地块^[28-29]。中生代早—中侏罗世,柴达木盆地处于伸展的构造环境,代表了印支期的一次伸展作用,盆地性质属伸展断陷—拗陷盆地^[30],晚侏罗世至白垩纪进入挤压拗陷—挤压隆升阶段。新生代盆地经历伸展—挤压两个构造旋回:①古新世—中新世早期处于整体挤压拗陷与柴达木盆地西缘局部拉分弱断陷阶段,渐新世盆地已基本形成了封闭的沉积环境并进入盆内演化;②中新世晚期—第四纪受到南向的挤压进一步加剧,盆地进入挤压反转阶段,并随着时间的推移,构造活动强度逐渐增大,形成现今盆地内部的系列线形构造带^[31-32]。

古近纪差异性升降运动使得柴达木盆地西部沉降较剧烈,形成相对沉降中心,最早成盐于始新世,



①为土尔根大坂—宗务隆山南缘断裂；②为柴达木盆地北缘断裂；③为阿尔金南缘断裂；④为甘森—小柴旦断裂；⑤为油泉子—甘森断裂；⑥为昆北断裂；IV 1 为柴达木盆地北缘硼-锂-钾盐成矿亚带；IV 2 为中央-钾-石盐-镁-锂-天青石-芒硝成矿亚带；IV 3 为昆北硼-钾-石盐-芒硝成矿亚带；IV 4 为察尔汗钾-石盐-镁-锂-硼-天然碱成矿亚带；IV 5 为德令哈石盐-天然碱成矿亚带；图件引自文献[20]和[25]，有所修改

图 1 柴达木盆地盐类成矿单元及矿产分布

Fig. 1 Salt Mineral Metallogenic Units and Mineral Distribution Map of Qaidam Basin

盛于上新世—全新世^[33]。始新世,位于柴达木西部狮子沟地区的沉降中心接受成盐,至渐新世向东偏北迁至大浪滩片区,中新世迁至察汗斯拉图,上新世迁至一里坪一带。第四纪早期柴达木盆地迅速抬升,西部广大地区出现褶皱系统,沉积中心迁至马海地区成盐,此阶段周围山地快速隆升使盆地相对沉降,周围高山融水由高往低潜入山前地带,溶滤上新世沉积的石盐层系而形成卤水,进入更新世冲洪积砂砾层的大孔隙储存,形成了山前巨厚砂砾层含钾卤水矿;晚更新世,由于柴达木盆地中部断裂发挥枢纽作用,柴达木盆地古跷跷板向东倾斜,促使富钾卤水汇聚至三湖区^[34-35];晚更新世至全新世,在持续干旱环境下造就了如今的察尔汗超大型钾镁盐矿床和其他沉积中心形成的现代盐湖盐类矿床^[36-37]。

2 成矿单元划分

成矿单元的科学划分是区域成矿规律研究成果的集中体现,也是普查找矿、资源潜力评价和区域成矿预测的基础。2022 年,潘彤等以柴达木盆地新生代构造地质环境为基础,突出盐类矿产,把柴达木盆地成矿单元划分为 5 个Ⅳ级成矿亚带(表 1、图 1)及 21 个Ⅴ级矿集区,为柴达木盆地盐类成矿预测及找矿勘查提供了依据^[25]。

3 矿床成因类型

柴达木盆地盐类矿产主要是盐湖沉积作用的产

物^[38-42]。本文在梳理柴达木盆地成矿地质背景、矿床地质特征、矿产空间分布规律等的基础上,以控矿要素和主导成矿作用为侧重点,把盐湖盐类矿床厘定为蒸发沉积型、溶滤沉积型、多来源流体叠加沉积型及沉积黏土型等 4 种类型;盆地地下水矿产均与周缘山区地表或地下水径流补给有关,为流体径流溶滤成因。本文对成矿类型的划分便于矿床归类和成矿系列的厘定,确定的类型名称与前人不尽相同,但对各成矿类型主成矿作用的认识基本一致。

3.1 蒸发沉积型

蒸发沉积型矿床在柴达木盆地占据最重要的地位,其分布广泛、规模巨大,以第四纪现代盐湖盐类矿产为主,少数为新近纪晚期形成的古盐类矿床。前人提出了察尔汗钾矿床的蒸发泵成因^[43]、溶滤水和沉积水的混合成因^[44],青海大风山天青石矿床成因陆相湖泊化学沉积型及热水沉积叠加改造型^[45],青海尖顶山锗矿具有陆源碎屑化学沉积型矿床特征^[46]等。总体来说,该类型均为封闭环境、干旱气候条件下以蒸发沉积作用为主导形成的盐类矿床。

3.2 溶滤沉积型

溶滤沉积型深藏卤水赋存于柴达木盆地北缘的山前冲洪积砂砾层中。李洪普等研究发现柴达木盆地黑北凹地早更新世新型砂砾层中的卤水钠氯系数、溴氯系数接近于盐岩溶滤卤水^[47],认为黑北凹地的卤水为陆相,来源于溶滤水^[48];郑绵平等认为

表 1 柴达木盆地盐类矿产成矿单元分类

Table 1 Classification of Salt Mineral Metallogenic Units in Qaidam Basin

I 级成矿域	II 级成矿省	III 级成矿带	IV 级成矿亚带
秦祁昆成矿域	昆仑(造山带)成矿省	柴达木盆地 Li-B-K-Na-Mg-盐类-石油-天然气-芒硝-天然碱成矿带	柴达木盆地北缘硼-锂-钾盐成矿亚带(IV 1)
			中央钾-石盐-镁-锂-天青石-芒硝成矿亚带(IV 2)
			昆北硼-钾-石盐-芒硝成矿亚带(IV 3)
			察尔汗钾-石盐-镁-锂-硼-天然碱成矿亚带(IV 4)
			德令哈石盐-天然碱成矿亚带(IV 5)

注:表格引自文献[25]。

柴达木盆地西部砂砾型含钾卤水是周围高山融水由高往低沿阿尔金断裂潜入山前地带,常年溶滤上新世沉积的石盐层系而形成的,继而进入早更新世冲洪积砂砾层大孔隙储存^[34];李洪普等综合分析认为,砂砾型深层卤水钾盐矿床为溶滤-沉积成因类型^[10]。该类型卤水是在半干旱—干旱气候条件下,与周围山系不断隆升剥蚀、山前凹陷相对持续沉降接受沉积、大气降水溶滤早期石盐层系有关。

3.3 多来源流体叠加沉积型

多来源流体叠加沉积型矿床是赋存在古近纪—新近纪背斜构造区的深藏卤水,前人多称其为“油田水”。该类卤水以锂、硼为主要有益矿种,常常共伴生钾、溴、碘、铷、铯等矿产。张彭熹等通过氢氧同位素研究,认为该类型卤水是干旱区蒸发作用和深部水体掺杂共同影响的结果^[4];葛文胜等认为该类卤水主要以大气降水为主,加上盆地压实释放的水,通过深大断裂循环、水-岩相互作用和湖盆蒸发作用等一系列演化过程,同时还有来自深部的地质流体混入而形成^[49];樊启顺等推测其来源基本属冰雪融水或雨水补给,沿着断裂带下渗,在迁移的途中经变质作用和深部水体掺杂而形成^[7];李廷伟等通过 Sr 同位素推断该类卤水为幔源水在上升过程中溶滤其他层位围岩或其他水体混染的结果^[50];李建森等认为柴达木油田水均为相对高钙低镁的 CaCl₂ 型水体,这与长期封存在地层中且接受多种来源的补给有关,并通过氢氧同位素分析认为其可能接受了更多

的深源岩浆流体补给,也可能接受了深部地壳甚至幔源物质的补给^[51-52]。现阶段相关学者对该类深藏卤水物源及成矿作用的认识不统一,本文暂定该类卤水为多来源流体叠加沉积型。

3.4 沉积黏土型

沉积黏土型锂矿床为青海省地质矿产勘查开发局在巴伦马海地区的新发现,赋存于盐湖沉积黏土层中,既有结构型锂,也有吸附型锂,介于碳酸盐黏土型锂矿与火山岩黏土型锂矿之间的一类黏土型锂矿^[16],本文确定该类型矿床为沉积黏土型。

4 矿产时空分布特征

柴达木盆地已发现盐类矿产地 55 处(表 2),已查明矿产地 46 处、潜在矿产地 9 处,盆地内钾、锂、镁、硼、溴、碘、铯、铷、石盐、芒硝及天然碱 11 种盐湖盐类资源累计查明资源储量约 3 863×10⁸ t^[53-58],已发现地下水矿产地 39 处^[59]。

4.1 成矿时期分布特征

柴达木盆地盐类矿产成矿时代主要为新近纪和第四纪^[25]。盆地的 55 个盐类矿产地中,新近纪成矿 8 处,第四纪成矿 47 处。

柴达木盆地西部的老茫崖盐矿,尖顶山、大风山、碱山锗矿为新近纪形成^[45-46]。背斜构造区深藏卤水为同沉积封存水、沉积物成岩过程中释放出的结晶水及结构水、地壳深部来源的内生水(火山喷气)多来源。不同构造区存在各物质来源贡献的差

表 2 柴达木盆地盐类矿产分布概况

Table 2 Distribution of Salt Minerals in Qaidam Basin

编号	成矿亚带名称	查明矿 区数量	潜在矿 区数量	不同规模矿产数量			成矿时代
				大型	中型	小型	
IV 1	柴达木盆地北缘硼-锂-钾盐成矿亚带	2	0	2	0	0	2 个矿区都是第四纪
IV 2	中央钾-石盐-镁-锂-天青石-芒硝成矿亚带	26	9	25	6	4	28 个矿区是第四纪;7 个矿区是新近纪
IV 3	昆北硼-钾-石盐-芒硝成矿亚带	5	0	2	1	2	4 个矿区是第四纪;1 个矿区是新近纪
IV 4	察尔汗钾-石盐-镁-锂-硼-天然碱成矿亚带	8	0	2	2	4	8 个矿区都是第四纪
IV 5	德令哈石盐-天然碱成矿亚带	5	0		2	3	5 个矿区都是第四纪

注:表格引自文献[25]、[53]~[55]。

异性,形成了不同背斜构造区卤水有益组分及水质的差异,使得多来源流体叠加成因存在较大可能,这是因为现阶段发现的该类型卤水主要赋存于古近系—新近系中^[60]。赋存于山前冲洪积扇的砂砾孔隙型富钾深层卤水成矿期为更新世^[25,61];浅层现代盐类矿产成矿期多为中、晚更新世—全新世^[25],与新构造运动形成的相对独立的凹地和持续干旱的气候有关;新发现的巴伦马海沉积吸附型锂矿成矿期为晚更新世—全新世^[16-18];盆地地下水矿产则均为全新世成矿^[59]。

4.2 矿床空间分布特征

柴达木盆地盐湖盐类资源在空间上有较鲜明的地域性,东部以石盐为主,中部以钾、锂、镁、硼、石盐为主,西部以钾、锂、石盐为主(图 1)。从水化学类型来看,柴达木盆地浅部卤水绝大部分属 $MgSO_4$ 亚型,但在盐湖演化后期的浓缩中心察尔汗、昆特依地区水化学类型为氯化物型^[62];砂砾型深层卤水为氯化物型,背斜构造区深藏卤水为 $CaCl_2$ 型^[47]。

按盐类矿产成矿单元划分(图 2),柴达木盆地北缘硼-锂-钾盐成矿亚带(Ⅳ1)内分布有矿产地 2 处,中央钾-石盐-镁-锂-天青石-芒硝成矿亚带(Ⅳ2)内分布有矿产地 35 处,昆北硼-钾-石盐-芒硝成矿亚带(Ⅳ3)内分布有矿产地 5 处,察尔汗钾-石盐-镁-锂-硼-天然碱成矿亚带(Ⅳ4)内分布有矿产地 8 处,德令哈石盐-天然碱成矿亚带(Ⅳ5)内分布有矿产地 5 处。

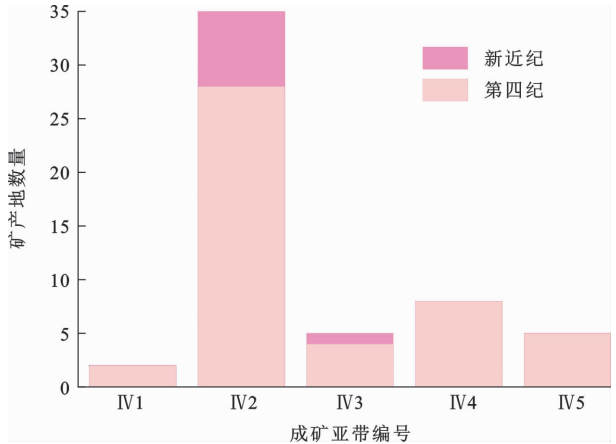


图 2 柴达木盆地矿产分布柱状图

Fig. 2 Distribution Histogram of Salt Minerals in Qaidam Basin

中央钾-石盐-镁-锂-天青石-芒硝成矿亚带(Ⅳ2)为盆地内矿产较集中分布区,矿产地数量占了全盆地的 63%,钾、钠、镁、锂资源量占比也同样较大。察尔汗钾-石盐-镁-锂-硼-天然碱成矿亚带(Ⅳ4)内

拥有格尔木市察尔汗钾镁盐矿、别勒滩矿区等大型矿产地,其钾、锂、镁、石盐等资源储量巨大,察尔汗矿田也是盆地内开发利用程度最高的矿集区(图 3)。

柴达木盆地地下水矿产地 39 处,允许开采总量达 $20\,560\,m^3 \cdot d^{-1}$,不均匀分布在盆地周缘。盆地东部分布有地下水矿产地 11 处(特大型 2 处、大型 6 处、中型 3 处),中部分布有地下水矿产地 19 处(特大型 1 处、大型 10 处、中型 8 处),西部分布有地下水矿产地 9 处(大型 3 处、中型 4 处、小型 2 处)^[59]。盆地水资源利用总体特征是东部相对丰富,开发强度较大;中部丰富,开发强度大;西部极为贫乏,严重缺水,开发强度相对较小,可利用水资源有限,严重制约了盐湖资源开发利用^[63]。

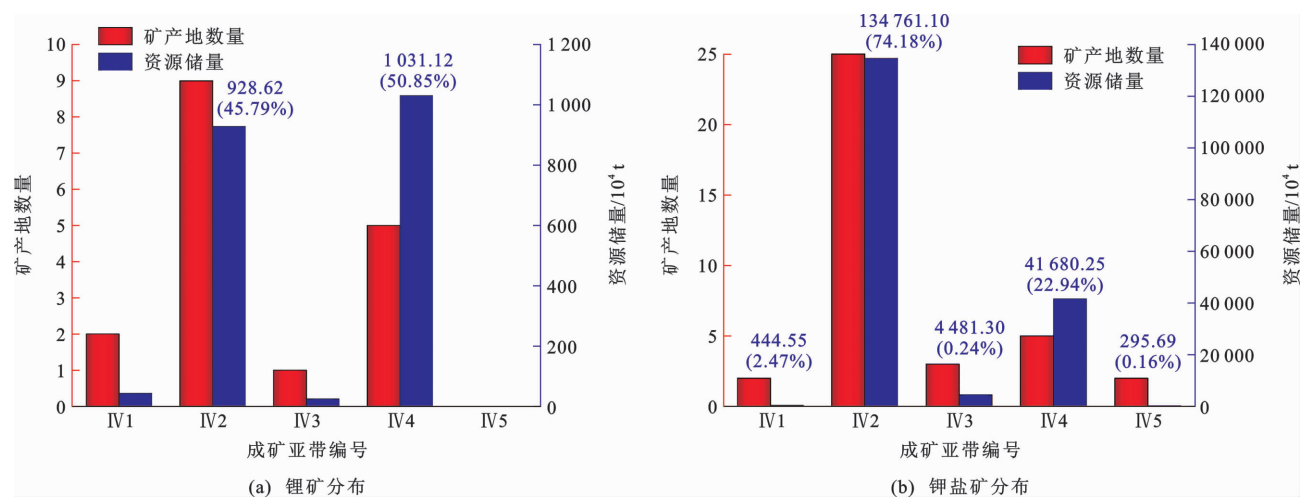
5 成矿系列划分

5.1 划分原则

一个地区矿床成矿系列划分时,首先应考虑构成该矿床的类型、空间或时间分布、控矿因素、与成矿作用有关的地质作用以及形成矿床组合的主要矿种,即一定的地质历史时期,一定的地质构造环境所构成的地质构造单元,一定的地质成矿作用和一组具有一定成因联系的矿床^[21-23]。本文对盐湖盐类及地下水矿床成矿系列的具体划分原则有:以成矿历史时期沉积盆地演化为主线的原则、以成矿作用关联性为原则、以反映最新的勘查成果为原则。

(1)以成矿历史时期沉积盆地演化为主线的原则。柴达木盆地中、新生代的演化受控于基底的构造变动及基底与周边造山带的相互作用,盆地基底在不同时期、不同地区的升降变化是导致盆地发育及迁移的根本原因^[64]。正是盆地的发育、迁移与古气候的变化,造就了其在不同的成矿历史时期在不同空间上形成了各种成因类型相互联系的矿床系列。

(2)以成矿作用关联性为原则。柴达木盆地在演化过程中受构造作用影响,形成不同的地理地貌环境、气候环境,不同的环境部位及特定的气候控制了特有沉积作用的发生,从而形成空间上或时间上具一定规律、矿物组合之间具一定关联且在特定环境中产出的矿产组合^[65]。柴达木盆地盐类成矿作用主要有溶滤沉积及蒸发沉积作用等,这些地质作用通常在相似的沉积环境、一定的地质时期内相继发生又持续作用,形成赋存范围较广、矿床规模不等、成因类型相似、矿物组合相近的矿产。



图中数据及括号内百分数指示矿产资源储量及占比

图 3 柴达木盆地钾、锂矿分布

Fig. 3 Distributions of Potassium and Lithium Deposits in Qaidam Basin

(3)以反映最新的勘查成果为原则。近年来柴达木盆地内的基础研究及资源勘查工作取得了突破性的成果,尤其是“一带一路”倡议和“加快建设世界级盐湖产业基地”的重要指示精神促进了柴达木盆地战略性矿产资源保障与找矿理论创新的广泛关注,促进了深部找矿(初步估算 KCl 潜在资源量为 7.89×10^8 t, LiCl 潜在资源量为 260.15×10^4 t, B_2O_3 潜在资源量为 1322.62×10^4 t, Br 潜在资源量为 110.94×10^4 t, I 潜在资源量为 38.94×10^4 t)^[66-76]、资源潜力预测(2022 年在盆地预测远景资源量时,钾盐为 12.82×10^8 t,锂矿为 1720.78×10^4 t,硼矿为 4268.09×10^4 t,钠盐为 2649.54×10^8 t,镁盐为 66.02×10^8 t,溴矿为 13.28×10^4 t,碘矿为 2711.26 t,芒硝为 46.18×10^8 t)及水资源勘(调)查的实质性突破^[77]。柴达木盆地盐类成矿单元划分及钾、锂、地下水等资源勘查成果的取得对成矿系列研究的科学性、完整性更具指导意义^[78]。

5.2 划分结果

成矿系列是开展找矿预测和矿产勘查的理论基础,也是促进找矿突破的关键思路,在勘查工作部署和具体找矿实践中要始终坚持“全位成矿,缺位找矿”的思想^[1]。本文根据盆地演化、成矿单元划分、矿产时空分布及成矿类型等的规律,将柴达木盆地盐类及地下水矿床划分为 3 个成矿系列(表 3):系列 1 为与古近纪—新近纪沉积作用及深部流体叠加有关的钾、石盐、镁、锂、硼、锶、石膏、芒硝矿床成矿系列,包括 2 个成矿亚系列和 4 个矿床式(图 4);系列 2 为与第四纪沉积作用有关的钾、石盐、镁、锂、硼、天然碱矿床成矿系列,包括 3 个成矿亚系列和 8

个矿床式(图 5);系列 3 为与第四纪流体径流溶滤作用有关的地下水矿床成矿系列,包括 1 个成矿亚系列和 3 个矿床式(图 6)。

6 成矿系列基本特征

6.1 与古近纪—新近纪沉积作用及深部流体叠加有关的钾、石盐、镁、锂、硼、锶、石膏、芒硝矿床成矿系列

柴达木盆地在古近纪—新近纪湖盆演化过程中出现了 2 个成盐期。第一期是渐新世盐类沉积阶段,高耸的祁连山系是盆地的主要物质补给区,周边水系携带大量的盐类物质补给盆地,由于湖水长期浓缩,局部开始了石盐沉积,但未形成矿床;第二期是上新世晚期的盐类沉积,在中—上新世气候湿热、湖水淡化以后,湖盆又开始缩小,在上新世后期湖水浓缩而沉积了大量的石盐、石膏、天青石等,主要分布在油墩子、南翼山、大小沙坪、黄石、大风山等地区^[79-80]。

6.1.1 与古近纪—新近纪沉积作用及深部流体叠加有关的钾、锂、硼矿成矿亚系列

与古近纪—新近纪沉积作用及深部流体叠加有关的钾、锂、硼矿成矿亚系列为富锂、硼等的深藏卤水矿床,分布于柴达木盆地西部,受古近纪—新近纪背斜构造控制。在空间上,深藏卤水主要受干柴沟组、油砂山组、狮子沟组地层控制,赋存于构造裂隙和砂岩孔隙、碳酸岩溶孔(洞)中。从垂向变化来看,埋藏深度越大,卤水温度越高, Li、B 含量也越高;从水平方向来看,越往盆地西部, Li、B、K 品位越高。在成因上,现阶段对该类型卤水的研究还不深入,卤

表 3 柴达木盆地盐类及地下水矿床成矿系列

Table 3 Mineralization Series of Salt and Groundwater Mineral Deposits in Qaidam Basin

成矿系列	成矿亚系列	矿床式	代表性矿床(点)
系列 1:与古近纪—新近纪沉积作用及深部流体叠加有关的钾、石盐、镁、锂、硼、锶、石膏、芒硝矿床成矿系列	与古近纪—新近纪沉积作用及深部流体叠加有关的钾、锂、硼矿成矿亚系列	鸭湖式深藏卤水	鸭湖构造深藏卤水矿、落雁山构造深藏卤水矿、红三旱四号构造深藏卤水矿
	与新近纪蒸发沉积作用有关的锶、石盐、石膏、芒硝矿成矿亚系列	大风山式锶矿	大风山锶矿、尖顶山锶矿
		南翼山式石盐、芒硝、硼矿	茫崖行政委员会南翼山石盐、芒硝、硼矿，茫崖行政委员会老茫崖地区石盐矿
		俄博梁式石膏矿	冷湖行政委员会俄博梁透明石膏矿点、茫崖行政委员会黄石透明石膏矿点
系列 2:与第四纪沉积作用有关的钾、石盐、镁、锂、硼、天然碱矿床成矿系列	与第四纪蒸发沉积作用有关的浅层钾、石盐、镁、锂、硼、天然碱矿成矿亚系列	察尔汗式钾、镁、锂矿	格尔木市察尔汗钾镁盐矿田
		大柴旦式硼矿	小柴旦湖硼矿区、大柴旦行政委员会大柴旦湖硼矿区、开特米里克硼矿
		大盐滩式钾矿	茫崖行政委员会大浪滩钾矿田、昆特依大盐滩钾镁盐矿
		台吉乃尔式湖锂矿	西台锂、硼、钾矿床，东台锂、硼、钾矿床，一里坪锂、硼、钾矿床
		柯柯式石盐矿	柯柯石盐矿、茶卡石盐矿
		巴隆式天然碱矿	大柴旦行政委员会南八仙天然碱矿、都兰县宗家—巴隆天然碱矿、德令哈天然碱矿
	与第四纪溶滤-沉积作用有关的深层卤水钾矿成矿亚系列	大浪滩式深层卤水	茫崖行政委员会大浪滩—黑北凹地深层卤水钾矿床、茫崖市马海地区深层卤水钾矿床、茫崖行政委员会察汗斯拉图地区深层卤水钾矿区、冷湖行政委员会昆特依深层卤水钾矿区
	与第四纪沉积作用有关的黏土型锂矿成矿亚系列	巴伦马海式锂矿	茫崖市巴伦马海锂矿
	系列 3:与第四纪流体径流溶滤作用有关的地下水矿床成矿系列	与第四纪流体径流溶滤作用有关的地下水矿床成矿亚系列	纳赤台矿泉
大柴旦热矿泉			海西蒙古族藏族自治州大柴旦温泉沟热矿泉
格尔木市水源地			格尔木市供水水源地、德令哈市巴音河冲洪积扇供水水源地

水成矿元素包含 Li、B、K、Na、Mg、Br、I 等，卤水来源为多源的，其与地层同沉积的高矿化水和深源含 Li、B、Br、I 流体叠加的可能性较大。

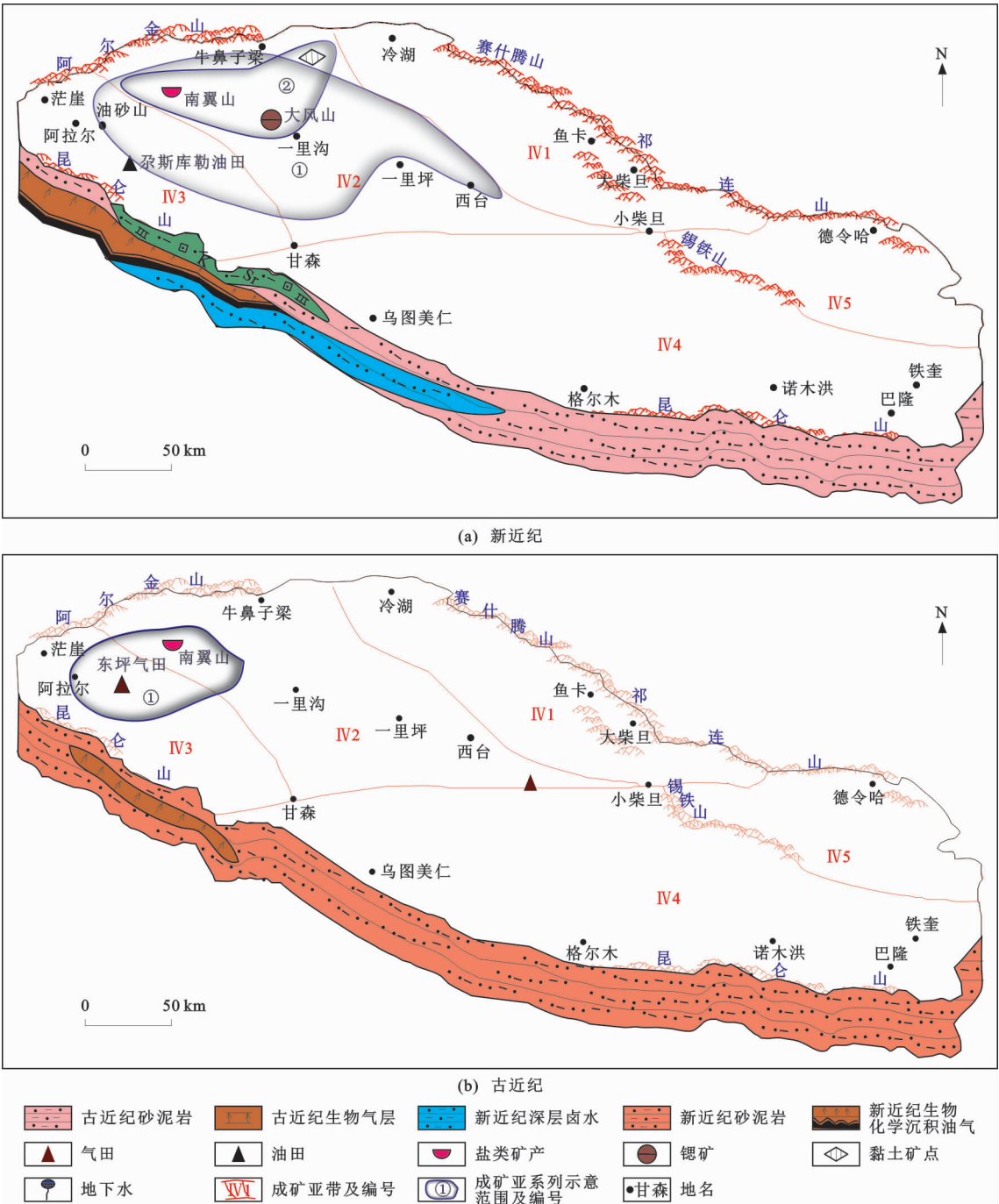
经地表调查和遥感影像解译，柴达木盆地有背斜构造 148 个，目前已验证蕴含该类型卤水矿床的背斜构造有南翼山、狮子沟等 14 个，已开展勘查评价工作的有鸭湖、红三早四号构造等 7 个^[74-78]。该成矿亚系列评价矿产地有 3 处，均为大型。

6.1.2 与新近纪蒸发沉积作用有关的锶、石盐、石膏、芒硝矿成矿亚系列

与新近纪蒸发沉积作用有关的锶、石盐、石膏、芒硝矿成矿亚系列分布于柴达木盆地西部次级盆地，成矿范围主要受上新世晚期盐湖沉积中心分布区的控制。上新世，湖泊沉积中心从大浪滩明显向东、东北迁移至察汗斯拉图、大风山、油墩子一带，此时气候更加干旱，湖水进一步浓缩，出现天青石、石

膏、芒硝、石盐等盐湖相蒸发岩系，形成了以大风山锗矿、察汗斯拉图芒硝矿为典型的硫酸盐类沉积矿床。从空间结构来看，该类型矿床主要赋存于上新统狮子沟组，呈多层状分布于次级盆地中，其底板为黏土层，反映当时已处于半深湖相沉积状态，起到了隔水层的作用。从时间结构来看，成矿主要发生于上新世，已演化为以硫酸盐矿物蒸发结晶沉积为主的阶段。成矿物质源自盆地周边山系基岩溶滤，古新世成矿元素迁移至尕斯库勒—狮子沟一带，形成古盐湖；然后盐湖自西向东北、东南迁移，受气候条件变化，逐步浓缩，盐类矿物从碳酸盐阶段转化为硫酸盐阶段，形成了一个继承性沉积成盐过程^[79-81]。这也是盆地中古近纪—新近纪沉积演化中一次重要的成矿阶段。

该类型成矿亚系列的主要控矿因素为狮子沟组化学沉积岩层，明显受干旱寒冷气候影响。已发现



①为与古近纪—新近纪沉积作用及深部流体叠加有关的钾、锂、硼成矿亚系列;②为与新近纪蒸发沉积作用有关的锑、石盐、石膏、芒硝成矿亚系列

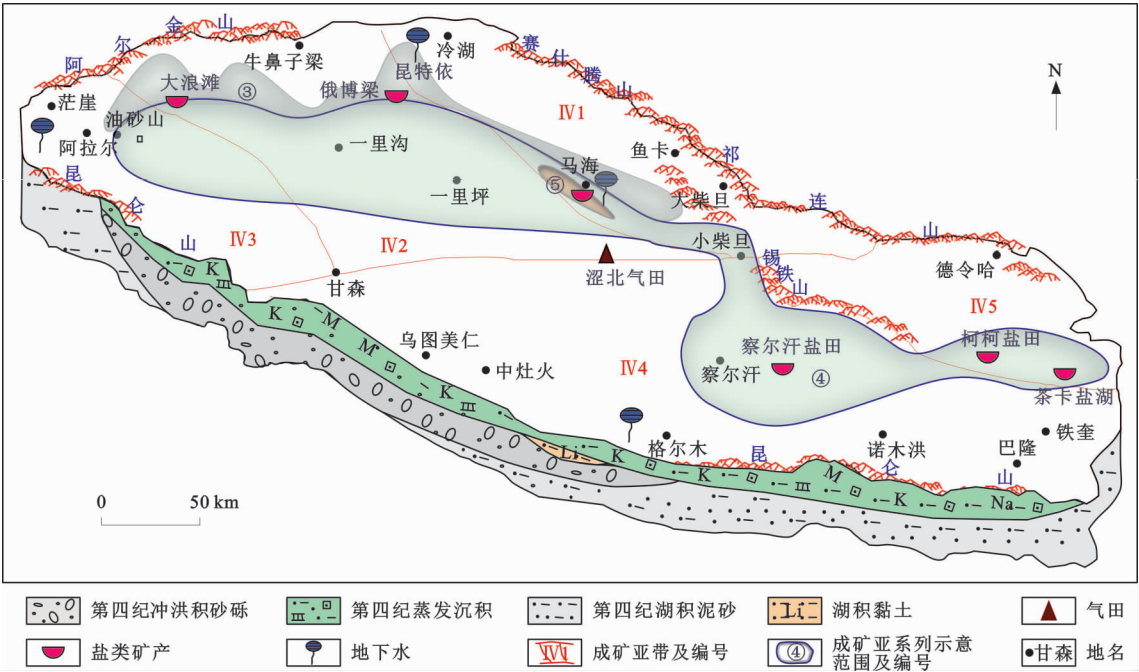
图 4 与古近纪—新近纪沉积作用及深部流体叠加有关的钾、石盐、镁、锂、硼、锑、石膏、芒硝矿床成矿系列示意图

Fig. 4 Schematic Maps of Mineralization Series of Potassium, Halite, Magnesium, Lithium, Boron, Strontium, Gypsum and Mirabilite Deposits Attributed to Paleogene-Neogene Sedimentation Superposed with Deep Fluid Activities

的矿床主要有大风山锑矿、尖顶山锑矿、老茫崖盐矿、察汗斯拉图芒硝矿等,已评价矿产地 5 处,其中大型 2 处、中型 2 处、小型 1 处。

6.2 与第四纪沉积作用有关的钾、石盐、镁、锂、硼、天然碱矿床成矿系列

上新世末期,柴达木盆地 SN 向挤压作用强烈,大规模褶皱隆升,将柴达木统一古湖盆分隔,成盐盆地格局初步形成。第四纪柴达木盆地及周缘进入快速隆升期,气候向干冷方向转化,盆地湖盆咸化,盐类持续沉积成矿,为盆地最主要的盐类成矿期。第四纪盆地演化阶段归纳出 3 个与沉积作用有关的成矿亚系列。



③为与第四纪蒸发沉积作用有关的浅层钾、石盐、镁、锂、硼、天然碱矿成矿亚系列；④为与第四纪溶滤-沉积作用有关的深层卤水钾矿成矿亚系列；⑤为与第四纪沉积吸附作用有关的黏土型锂矿成矿亚系列

图 5 与第四纪沉积作用有关的钾、石盐、镁、锂、硼、天然碱矿床成矿系列示意图

Fig. 5 Schematic Map of Mineralization Series of Potassium, Halite, Magnesium, Lithium, Boron, and Trona Deposits Attributed to Quaternary Sedimentation

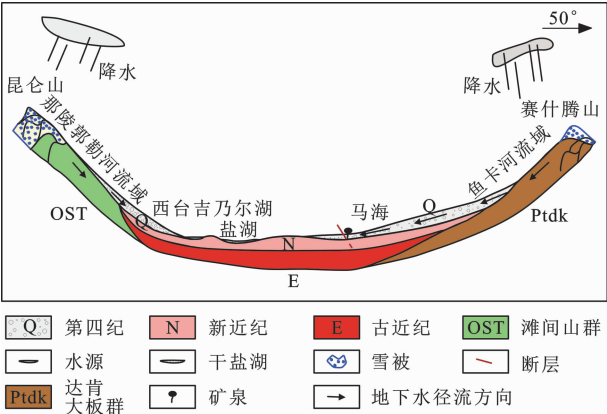


图 6 与第四纪流体径流溶滤作用有关的地下水矿床成矿模型

Fig. 6 Mineralization Model of Groundwater Mineral Deposit Attributed to Quaternary Fluid Runoff Leaching

6.2.1 与第四纪蒸发沉积作用有关的浅层钾、石盐、镁、锂、硼、天然碱矿成矿亚系列

与第四纪蒸发沉积作用有关的浅层钾、石盐、镁、锂、硼、天然碱矿成矿亚系列是盆地盐类成矿的主要产物，分布范围从盆地西部大浪滩一带到东部茶卡地区，明显受第四纪次级盆地控制，第四纪新构造运动所形成构造凹陷、凹地、冲洪积扇为成盐提供良好空间。成矿矿种涉及到硫酸盐类、氯化物型钾、钠、镁、锂、硼、钙、溴、碘、铷、铯等成矿化合物。以钾

为主的成矿分固体和液体两种形态：①固体矿是在古气候由冷暖交替型转为寒冷干燥型时，盐湖浓缩成干盐滩，经化学沉积作用形成，在察尔汗、大浪滩、昆特依地区形成了钾镁盐矿田，在南八仙、巴隆地区形成天然碱矿床，中更新世在更加干冷的气候条件下，盆地北部大柴旦、小柴旦次盆地内沉积有石盐、芒硝及丰富的固体硼矿层^[82-83]；②液体矿以晶间卤水的形式赋存于石盐层中，在西部大浪滩—中部察尔汗的各次级盆地均有分布。

从成矿空间来看，平面分布从西往东具有规律变化，西部大浪滩、察汗斯拉图、昆特依等盆地以石膏、芒硝、天青石等硫酸盐矿物为主，氯化物型钾、钠、镁为次，盆地中部一里坪、东台、西台以锂、硼为主，钾为次，再往东到察尔汗地区以氯化物型钾、钠、镁为主，共伴生硼、锂等，盆地东部柯柯盐湖、茶卡盐湖则以钠盐为主，伴生少量的钾、溴。从垂向分布来看，西部以察汗斯拉图、昆特依为代表，从上新世晚期到全新世呈现连续化学沉积，从硫酸盐类到氯化物型逐渐变化；马海盆地从早更新世开始盐类沉积；察尔汗地区晚更新世—全新世为主要成盐期。这种平面、垂向的分布也是盐湖继承性演化逐步沉积的结果。

从时间结构来看，从早更新世、中更新世、晚更

新世至全新世是一个连续沉积成盐的过程,在全新世大多数盐湖最终消亡进入干盐湖,这是盆地第二个主要盐类成矿阶段,也是盆地成矿规模最大的成矿期。

从物源结构来看,K、Na、Mg等主成矿元素主要继承了古近纪—新近纪古盐湖的成矿物质,也有第四纪周边山系的持续溶滤补给。早中更新世以来,柴达木盆地北缘温泉沟—居红图高硼地热水沿塔塔棱河补给大、小柴旦湖,柴达木盆地南缘可可西里富锂沿洪水河补给东西台、一里坪及别勒滩地区,这是硼、锂成矿的主要来源和时期。

该成矿亚系列的主要控矿因素为早更新世—全新世蒸发沉积盐层,受干旱寒冷气候影响明显,属于典型的蒸发沉积成因。典型矿床有察尔汗钾、镁盐矿田、大小柴旦湖硼矿床、大浪滩钾矿田、昆特依大盐滩钾镁盐矿、一里坪—东台锂硼钾矿床、南八仙天然碱矿床、宗家—巴隆天然碱矿床、茶卡盐矿床等。形成石膏、芒硝、石盐、镁盐、钾盐等蒸发沉积型盐类及天然碱矿产41处,其中大型23处、中型6处、小型12处。

6.2.2 与第四纪溶滤—沉积作用有关的深层卤水钾成矿亚系列

与第四纪溶滤—沉积作用有关的深层卤水钾成矿亚系列主要分布于柴达木盆地西部阿尔金、赛什腾山前地区,受山前次级盆地早、中更新世冲洪积扇控制,呈大厚层状,扇根及扇中砂砾石层为良好储层,至扇缘黏土层逐渐增多,含矿卤水层变薄至逐渐尖灭。成矿时间以早—中更新世为主,后至全新世均有持续的溶滤沉积作用。主要成矿产物是KCl液体卤水,成矿富集主要来源于山前古近纪—新近纪古盐层的淋滤补给,使得该沉积体系中赋存含钾卤水^[61]。

该成矿亚系列主要为早、中更新世砂砾石层控制,是2008年首次发现的盐湖矿床新类型,通过10余年勘查工作,已取得找矿突破。其中,赛什腾山前的马海地区含水层分布面积为3 252.51 km²,储卤层厚度为314.08~1 265.14 m(平均厚度为793.10 m),单井涌水量为1 500~6 073 m³·d⁻¹,KCl平均品位为0.53%,资源潜力巨大^[68-69]。阿尔金山前的大浪滩—黑北凹地矿区,初步圈定含水层分布面积为2 165.38 km²,含水层厚度为197~800 m,单井涌水量为2 000~9 600 m³·d⁻¹,KCl品位为0.31%~1.56%^[69-70];该成矿亚系列还有昆特依、察汗斯拉图矿床^[71-72]。目前发现该成矿亚系列矿产

地5处,其中大型3处、中型2处。

6.2.3 与第四纪沉积作用有关的黏土型锂矿成矿亚系列

与第四纪沉积作用有关的黏土型锂矿成矿亚系列分布于柴达木盆地第四纪次级盆地干盐滩中,成矿层位为全新世石盐层间和岩盐层底部的黏土层,在消亡的盐湖底部经机械作用沉积的细粒黏土吸附锂离子逐步富集成矿。已发现的马海地区黏土型锂矿位于柴达木盆地北缘中部,行政区划隶属于青海省茫崖市马海镇,分布面积为197.96 km²,在空间上与固、液相钾盐矿互层交错、共生。赋矿地层为全新统、上更新统和中更新统,圈定含矿黏土层3层,估算LiCl潜在资源总量可达114.41×10⁴ t, LiCl平均含量为355.96×10⁻⁶,转换成Li₂O潜在资源总量可达40.32×10⁴ t, Li₂CO₃潜在资源总量为99.71×10⁴ t; Rb₂O潜在资源总量可达35.72×10⁴ t, Rb₂O平均含量为104.68×10⁻⁶; Cs₂O潜在资源总量可达3.13×10⁴ t, Cs₂O平均含量为8.92×10⁻⁶^[16]。Li主要赋存于伊利石、绿泥石、伊蒙混层等黏土矿物中,其含量与Si、Al、K、Mg等含量具有较强的正相关关系^[18]。该成矿亚系列矿产目前发现仅1处,为茫崖市巴仑马海锂矿。

6.3 与第四纪流体径流溶滤作用有关的地下水矿床成矿系列

柴达木盆地气候寒冷干燥,年均降水量小、蒸发量大^[84],地下水主要依靠盆地周缘现代河流向盆地中心湖区汇聚补给,而河水主要来源于山区大气降水,大部分河水出山后沿程下渗补给形成地下水,少数规模较大的河流在尾间形成湖泊^[85-86]。盆地地表水—地下水受构造、岩性、地形和水力条件等因素的综合影响相互转化,地表河流变为地下水后以潜流的方式流向盆地低洼处,在潜流过程中地下水以溶滤作用为主,从山区到尾间水化学类型呈明显的分带性,水化学组分差异主要是含水层岩性不同所致,盆地南部受盐岩类溶解的影响更强烈,东部和北部受碳酸盐影响更强烈^[87]。

地下水资源作为人类生产生活的重要资源,尤其是柴达木盆地地下水资源分配不平衡,盆地西部盐类资源储量巨大但开发利用率却很低,其中一个原因是水资源匮乏。在盆地开展地下水资源评价工作应被高度重视,因此本文对柴达木盆地地下水矿床纳入盐类矿床成矿系列进行论述。现评价的可供生产生活利用的水源地有格尔木水源地、马海水源地(矿泉)、阿拉尔水源地等。该成矿亚系列矿产地

共 39 处,其中特大型 3 处、大型 19 处、中型 15 处、小型 2 处。

7 找矿方向

运用成矿系列概念研究不同找矿地区的矿床成矿系列,就是以本地区地质构造环境、已有矿床为基础,分析成矿作用,提出可能的矿床成矿系列、可能的矿床组合,结合地质、物探、化探、遥感信息,提出找矿方向及有利的成矿地质构造部位,为找矿服务^[66]。一个盐类矿床的形成和分布往往受地层、构造、岩浆活动、岩相古地理、岩性、古水文、古地形及古气候等多种地质因素的影响,某一成矿(亚)系列矿床在时空分布上具有规律性,控矿地质因素对成矿贡献的侧重点也较为接近,把握矿床成矿机制和时空上的产出及分布特征,在全盆地以“缺位找矿”的思路指导预测找矿。

(1)古近纪—新近纪构造裂隙孔隙深藏卤水找矿。构造裂隙孔隙深藏卤水矿床与古近系—新近系圈闭构造、古盐类沉积及有利储层关系密切,赋矿部位往往是背斜构造核部裂隙发育部位。在柴达木盆地西部的古近纪—新近纪背斜构造新发现深藏含锂卤水,具有 Li 含量高、镁锂比低、原卤矿化度低等诸多优势特点^[20],从西往东有狮子沟、南翼山、碱山、落雁山、鸭湖、伊克雅乌汝等 11 个圈闭构造发育良好的碳酸盐、碎屑岩储层,并显示有深藏卤水赋存,因此,柴达木盆地古近纪—新近纪背斜构造深层含锂卤水找矿空间巨大。根据成矿系列理论判断有 27 个背斜构造成矿条件良好,重点勘查范围主要位于中央钾-石盐-镁-锂-天青石-芒硝成矿亚带(Ⅳ2)。

(2)第四系砂砾孔隙深层卤水找矿。柴达木盆地在早、中更新世相对雨量丰富,水动力较强,沉积物多以砂、砾为主,为典型的冲-洪积相,在柴达木盆地北缘沉积了巨厚的砂砾层。根据对砂砾层的验证,先是在大浪滩—黑北凹地一带发现了该类型深层卤水,随后通过成矿系列理论的指导在察汗斯拉图、昆特依及马海地区发现了该类型深层卤水,取得了重大找矿突破。已发现的 5 处矿产地均分布于中央钾-石盐-镁-锂-天青石-芒硝成矿亚带(Ⅳ2),而该成矿亚带的红沟子地区、苏干湖北、柴达木大门口一带也分布较厚大的砂砾石储集层,具有该类型钾盐矿产成矿的有利条件。现阶段在盆地南缘的祁漫塔格山、鄂拉山山前局部地段同样发育该类型储层;宗务隆山山前雅沙图一带山间凹地也沉积有较厚大的冲洪积砂砾石,具备寻找砂砾孔隙卤水型硼矿的

条件。

(3)现代蒸发盐类找矿。柴达木盆地现代蒸发盐类主要以固体盐类、赋存于固体盐类孔隙中的卤水及地表湖水为主,主要分布在盆地次级凹地,受成盐凹地演化阶段及凹地规模控制,该类型矿产在现阶段勘查评价程度已比较高。在柴达木盆地北缘硼-锂-钾盐成矿亚带(Ⅳ1)分布大、小柴旦湖等山间构造湖,该类湖泊的发生、发展、演化都在原地进行,经沼泽化时期后进入盐湖阶段^[38],可见在该成矿单元山间构造湖为盐类找矿的一个重要方向。察尔汗钾-石盐-镁-锂-硼-天然碱成矿亚带(Ⅳ4)南缘乌图美仁—诺木洪一带大量分布蒸发盐类沉积物,具钾盐矿床找矿远景,该成矿亚带东南部早、中更新统一全新统化学沉积建造是天然碱的主要分布地段^[88],别勒滩北延段东陵湖一带也具有寻找浅层盐湖矿产的空间。德令哈石盐-天然碱成矿亚带(Ⅳ5)湖沼沉积和盐碱滩十分发育,是晚更新世—全新世天然碱矿的有利找矿区段;雅沙图—靠条灶火一带热水成因硼矿也有一定的找矿远景^[89]。

(4)巴伦马海式锂矿的发现,为柴达木盆地该类型矿产的找矿提供了想象空间,尤其是盆地中西部 Li 含量较高的察尔汗、一里坪、东西台等现代盐湖矿区更可能形成该类型矿床,故在盆地内寻找该类型矿产的远景巨大,但其开发利用的可行性还有待深入研究与论证。

(5)柴达木盆地中东部地下水资源相对丰富,但西部地区盐类矿床富水性差,可供盐类资源开发利用的地下水资源紧缺,急需在盆地西部加大水资源勘查力度,以保障盐类资源开发利用及其他产业的生产生活用水。重点应在孜斯库勒湖—丁字口、牛鼻子梁、柴达木大门口—打柴沟、小梁山北部地区加强水文地质研究,加快查明水文地质条件,评价盆地西部地下水资源,提交供水靶区,为开发利用柴达木盆地西部盐湖及油气资源提供水资源依据。

(6)近年来,在盐湖盐类及地下水资源勘查研究的同时,柴达木盆地还发现了氦气、铀矿、地热及铷、铯等其他三稀资源的重要线索,但评价和研究程度尚低,本文也未详细评述,今后还应重视对这些资源的评价与研究。

8 结 语

柴达木盆地盐湖盐类及地下水矿产资源丰富,浅部盐湖勘查研究程度较高,深层(藏)卤水勘查工作取得了突出成果但研究程度不高,基础理论建立

尚不完善,水资源空间分配不均衡。本文通过对柴达木盆地盐类及地下水矿床成矿系列与找矿方向的研究,获得如下认识。

(1)浅层盐湖盐类矿产是柴达木盆地分布范围最广、资源储量最大的矿产,多分布于新构造运动以来形成的次级凹地,为相对封闭环境、干旱气候条件下水体蒸发沉积形成,呈盐湖、干盐湖及晶间卤水形式赋存,勘查开发程度较高。下一步应重点关注开采背景下的资源保供及溶采工艺提升,另外在盆地东北部山间凹地、西部蒸发盐类大面积沉积区尚有该类型钾镁盐、石盐、天然碱等成矿的有利区段。

(2)松散砂砾孔隙深层卤水矿床分布于盆地西部山前冲洪积扇群带,为溶滤沉积型卤水矿,有用组分以钾为主,资源远景巨大,但现阶段勘查研究的程度尚低。下一步应加快提升资源量控制级别和开发利用研究,盆地西北部尚有红沟子、柴达木大门口等地区同样具有该类型深层卤水成矿的条件,找矿有利区为中央钾-石盐-镁-锂-天青石-芒硝成矿亚带(Ⅳ2)。

(3)背斜构造区裂隙孔隙深藏卤水主要分布于盆地西部,找矿远景巨大,物质来源及矿床成因还有待深入研究,初步推断有同沉积的卤水与深部流体补给等多来源,以富锂-硼为主,共伴生钾、溴、碘、铷、铯其特征,主要储集空间为砂岩孔隙、碳酸岩溶孔(洞),已在多个背斜构造区发现有该类型深藏卤水分布,下一步找矿有利区为中央钾-石盐-镁-锂-天青石-芒硝成矿亚带(Ⅳ2),其他成矿亚带也有必要进一步探索。

(4)盆地地下水资源相对丰富,但西部地区水资源紧缺,加快西部地区水资源评价有利于促进盐类资源开发利用;另外,不可忽视黏土锂矿及与深藏卤水共伴生的氦、铀、铷、铯、地热等资源的综合评价与研究。

(5)根据盆地演化、成矿单元划分、矿产时空分布及成矿类型等的规律总结,将柴达木盆地盐类及地下水矿床划分为3个成矿系列、6个成矿亚系列、15个矿床式。

参考文献:

References:

[1] 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[J].地质论评,1983,29(2):159-165.
YUAN Jian-qi, HUO Cheng-yu, CAI Ke-qin. The High Mountain-deep Basin Saline Environment: A New

Genetic Model of Salt Deposits[J]. Geological Review, 1983, 29(2): 159-165.

- [2] 张彭熹,于升松,支霞臣,等.柴达木盆地盐湖[M].北京:科学出版社,1987.
ZHANG Peng-xi, YU Sheng-song, ZHI Xia-chen, et al. Salt Lake in Qaidam Basin[M]. Beijing: Science Press, 1987.
- [3] 沈振枢.柴达木盆地第四纪含盐地层划分及沉积环境[M].北京:地质出版社,1993.
SHEN Zhen-shu. The Division and Sedimentary Environment of Quaternary Salt-bearing Strata in Qaidam Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993.
- [4] 张彭熹,张保珍,LOWENSTEIN T K,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[M].北京:科学出版社,1993.
ZHANG Peng-xi, ZHANG Bao-zhen, LOWENSTEIN T K, et al. Genesis of Ancient Abnormal Potassium Salt Evaporites: A Case Study of Potassium Salt Formation in Qarhan Salt Lake, Qaidam Basin[M]. Beijing: Science Press, 1993.
- [5] 袁见齐,杨 谦,孙大鹏,等.察尔汗盐湖钾盐矿床的形成条件[M].北京:地质出版社,1995.
YUAN Jian-qi, YANG Qian, SUN Da-peng, et al. Formation Conditions of the Qarhan Salt Lake Sylvite Deposit[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995.
- [6] 郑喜玉,张明刚,徐 昶,等.中国盐湖志[M].北京:科学出版社,2002.
ZHENG Xi-yu, ZHANG Ming-gang, XU Chang, et al. Salt Lakes of China[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [7] 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[J].地球化学,2007,36(6):601-611.
FAN Qi-shun, MA Hai-zhou, TAN Hong-bing, et al. Characteristics and Origin of Brines in Western Qaidam Basin[J]. Geochimica, 2007, 36(6): 601-611.
- [8] 侯献华,樊 馥,郑绵平,等.青海盐湖钾盐资源开发利用及产业发展[J].科技导报,2017,35(12):67-71.
HOU Xian-hua, FAN Fu, ZHENG Mian-ping, et al. Development and Utilization of Potash Resources Saline Lakes in Qinghai Province[J]. Science & Technology Review, 2017, 35(12): 67-71.
- [9] 熊增华,王石军.察尔汗盐湖资源开发利用现状及关键技术进展[J].化工矿物与加工,2021,50(1):33-37.
XIONG Zeng-hua, WANG Shi-jun. Status and Progress on Key Technologies for Development and Utilization of Resources in Qarhan Salt Lake[J]. Industrial Minerals & Processing, 2021, 50(1): 33-37.

[10] 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[J].湖泊科学,2022,34(3):1043-1054.
LI Hong-pu, HOU Xian-hua, ZHENG Mian-ping, et al. Discussion on Metallogenic Model and Prospecting Direction of Pleistocene Gravel Brine Potassium Deposit in Western Qaidam Basin[J]. Journal of Lake Sciences, 2022, 34(3): 1043-1054.

[11] 李洪普,郑绵平,侯献华,等.柴达木西部南翼山构造富钾深层卤水矿的控制因素及水化学特征[J].地球学报,2015,36(1):41-50.
LI Hong-pu, ZHENG Mian-ping, HOU Xian-hua, et al. Control Factors and Water Chemical Characteristics of Potassium-rich Deep Brine in Nanyishan Structure of Western Qaidam Basin[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2015, 36(1): 41-50.

[12] 毛建业.青海省茫崖镇狮子沟地区深层卤水调查评价报告[R].格尔木:青海省柴达木综合地质矿产勘查院,2016.
MAO Jian-ye. Investigation and Evaluation Report on Deep Brines in Shizigou Area, Mangnai Town, Qinghai Province[R]. Golmud: Qaidam Integrated Geological Exploration Institute of Qinghai Province, 2016.

[13] 袁文虎.青海省柴达木盆地锂资源潜力及利用调查评价报告[R].格尔木:青海省柴达木综合地质矿产勘查院,2020.
YUAN Wen-hu. Investigation and Evaluation Report on Lithium Resource Potential and Utilization in Qaidam Basin, Qinghai Province[R]. Golmud: Qaidam Integrated Geological Exploration Institute of Qinghai Province, 2020.

[14] 岳鑫.青海省茫崖行委小冒泉地区钾盐矿预查报告[R].格尔木:青海省柴达木综合地质矿产勘查院,2021.
YUE Xin. Pre-survey Report on Potash Deposit in Xiaomaoquan Area of Mangnai Administrative Committee of Qinghai Province[R]. Golmud: Qaidam Integrated Geological Exploration Institute of Qinghai Province, 2021.

[15] 陈金牛.青海省大柴旦行委西台吉乃尔湖东北深层卤水钾矿勘查报告[R].格尔木:青海省柴达木综合地质矿产勘查院,2021.
CHEN Jin-niu. Exploration Report on Deep Brine Potassium Deposit in the Northeast of West Taijinar Lake, Dachaidan Administrative Committee, Qinghai Province[R]. Golmud: Qaidam Integrated Geological Exploration Institute of Qinghai Province, 2021.

[16] 潘彤,陈建洲,丁成旺,等.柴达木巴伦马海盆地锂稀有轻金属黏土型矿赋存特征[J].黄金科学技术,2023,31(3):359-377.
PAN Tong, CHEN Jian-zhou, DING Cheng-wang, et al. Occurrence Characteristics of Lithium Rare Light Metal Clay-type Deposits in Balunmahai Basin of Qaidam Basin[J]. Gold Science and Technology, 2023, 31(3): 359-377.

[17] 潘彤,陈建洲,丁成旺,等.柴达木盆地盐湖盆地黏土中锂、铷、铯超常富集及其开发潜力[J].中国地质,2023,50(6):1925-1927.
PAN Tong, CHEN Jian-zhou, DING Cheng-wang, et al. Supernormal Enrichment of Lithium, Rubidium and Cesium and Its Development Potential in the Clay of Salt Lake Basin of Qaidam Basin[J]. Geology in China, 2023, 50(6): 1925-1927.

[18] 丁成旺,马玉亮,陈建洲,等.柴达木盆地巴仑马海盐湖黏土沉积矿物学及稀有稀散元素地球化学特征[J].盐湖研究,2023,https://kns.cnki.net/kcms/detail/63.1026.P.20230407.1713.002.html.
DING Cheng-wang, MA Yu-liang, CHEN Jian-zhou, et al. Sedimentary Mineralogy and Geochemical Characteristics of Rare and Rare Elements in the Clay of Salt Lake, Balun Mahai, Qaidam Basin[J]. Journal of Salt Lake Research, 2023, https://kns.cnki.net/kcms/detail/63.1026.P.20230407.1713.002.html.

[19] PAN T, CHEN J Z, HE M Y, et al. Characterization and Resource Potential of Li in the Clay Minerals of Mahai Salt Lake in the Qaidam Basin, China[J]. Sustainability, 2023, 15(19): 14067.

[20] 青海省自然资源厅.青海省柴达木盆地盐湖资源利用与保护规划[R].西宁:青海省自然资源厅,2021.
Department of Natural Resources of Qinghai Province. Planning for the Utilization and Protection of Salt Lake Resources in Qaidam Basin, Qinghai Province[R]. Xining: Department of Natural Resources of Qinghai Province, 2021.

[21] 陈毓川.矿床的成矿系列[J].地学前缘,1994,1(3/4):90-94.
CHEN Yu-chuan. Metallogenic Series of Ore Deposits[J]. Earth Science Frontiers, 1994, 1(3/4): 90-94.

[22] 陈毓川,裴荣富,王登红,等.论矿床的自然分类:四论矿床的成矿系列问题[J].矿床地质,2015,34(6):1092-1106.
CHEN Yu-chuan, PEI Rong-fu, WANG Deng-hong, et al. Natural Classification of Mineral Deposits: Discussion on Minerogenetic Series of Mineral Deposits (IV)[J]. Mineral Deposits, 2015, 34(6): 1092-1106.

[23] 陈毓川,裴荣富,王登红,等.论地球系统四维成矿及矿床学研究趋向:七论矿床的成矿系列[J].矿床地质,2020,39(5):745-753.

- CHEN Yu-chuan, PEI Rong-fu, WANG Deng-hong, et al. Four-dimensional Metallogeny in Earth System and Study Trends of Mineral Deposits: A Discussion on Minerogenetic Series (Ⅷ) [J]. Mineral Deposits, 2020, 39(5): 745-753.
- [24] 崔军文, 唐哲民, 邓晋福, 等. 阿尔金断裂系[R]. 北京: 地质出版社, 1999.
- CUI Jun-wen, TANG Zhe-min, DENG Jin-fu, et al. Aitun Fault System[R]. Beijing: Geological Publishing House, 1999.
- [25] 潘 彤, 张金明, 李洪普, 等. 柴达木盆地盐类矿产成矿单元划分[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(5): 1446-1460.
- PAN Tong, ZHANG Jin-ming, LI Hong-pu, et al. Division of Salt Minerals Metallogenic Units in Qaidam Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(5): 1446-1460.
- [26] HU X M, GARZANTI E, WANG J G, et al. The Timing of India-Asia Collision Onset: Facts, Theories, Controversies[J]. Earth-science Reviews, 2016, 160: 264-299.
- [27] ZHENG Y F, WU F Y. The Timing of Continental Collision Between India and Asia[J]. Science Bulletin, 2018, 63(24): 1649-1654.
- [28] ALLÈGRE C J, COURTILLOT V, TAPPONNIER P, et al. Structure and Evolution of the Himalaya-Tibet Orogenic Belt[J]. Nature, 1984, 307: 17-22.
- [29] XIA W C, ZHANG N, YUAN X P, et al. Cenozoic Qaidim Basin, China: A Stronger Tectonic Inversed, Extensional Rifted Basin[J]. AAPG Bulletin, 2001, 85(4): 715-736.
- [30] 曾联波, 金之钧, 张明利, 等. 柴达木侏罗纪盆地性质及其演化特征[J]. 沉积学报, 2002, 20(2): 288-292.
- ZENG Lian-bo, JIN Zhi-jun, ZHANG Ming-li, et al. The Jurassic Basin Type and Its Evolution Characteristic in Qaidam Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20(2): 288-292.
- [31] 徐凤银, 尹成明, 巩庆林, 等. 柴达木盆地中、新生代构造演化及其对油气的控制[J]. 中国石油勘探, 2006, 11(6): 9-16, 37.
- XU Feng-yin, YIN Cheng-ming, GONG Qing-lin, et al. Mesozoic-Cenozoic Structural Evolution in Qaidam Basin and Its Control over Oil and Gas[J]. China Petroleum Exploration, 2006, 11(6): 9-16, 37.
- [32] 吴光大, 葛肖虹, 刘永江, 等. 柴达木盆地中、新生代构造演化及其对油气的控制[J]. 世界地质, 2006, 25(4): 411-417.
- WU Guang-da, GE Xiao-hong, LIU Yong-jiang, et al. Basin and Its Control on Hydrocarbon Occurrence [J]. World Geology, 2006, 25(4): 411-417.
- [33] 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[J]. 地球学报, 2013, 34(2): 129-138.
- ZHENG Mian-ping, ZHANG Xue-fei, HOU Xian-hua, et al. Geological Environments of the Late Cenozoic Lakes and Salt-forming and Oil-gas Pool-forming Actions in the Tibetan Plateau[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2013, 34(2): 129-138.
- [34] 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[J]. 地球学报, 2015, 36(2): 129-139.
- ZHENG Mian-ping, HOU Xian-hua, YU Chang-qing, et al. The Leading Role of Salt Formation Theory in the Breakthrough and Important Progress in Potash Deposit Prospecting [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2015, 36(2): 129-139.
- [35] 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[J]. 地质学报, 2016, 90(9): 2123-2166.
- ZHENG Mian-ping, ZHANG Yong-sheng, LIU Xi-fang, et al. Progress and Prospects of Salt Lake Research in China[J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(9): 2123-2166.
- [36] 陈克造, BOWLER J M. 柴达木盆地晚更新世盐湖演化[C]//中国科学院中澳第四纪合作研究组. 中国-澳大利亚第四纪学术讨论会论文集. 北京: 科学出版社, 1987: 82-91.
- CHEN Ke-zao, BOWLER J M. Evolution of Salt Lake in the Late Pleistocene Qaidam Basin[C]//Cooperative Research Group of Chinese-Australian Quaternary, Chinese Academy of Sciences. Proceedings of the Chinese-Australian Quaternary Symposium. Beijing: Science Press, 1987: 82-91.
- [37] 陈克造, BOWLER J M. 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[J]. 中国科学: B辑, 1985, 4(5): 463-473.
- CHEN Ke-zao, BOWLER J M. Preliminary Study on the Sedimentary Characteristics of Qarhan Salt Lake and the Evolution of Paleoclimates in Qaidam Basin [J]. Science in China: Series B, 1985, 4(5): 463-473.
- [38] 潘 彤. 青海矿床成矿系列探讨[J]. 地球科学与环境学报, 2019, 41(3): 297-315.
- PAN Tong. Discussion on the Minerogenetic Series of Deposits in Qinghai, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2019, 41(3): 297-315.
- [39] 潘 彤. 青海成矿单元划分[J]. 地球科学与环境学报, 2017, 39(1): 16-33.
- PAN Tong. Classification of Metallogenic Units in

- Qinghai, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2017, 39(1): 16-33.
- [40] 潘 彤, 喻忠鸿, 薛国强, 等. 柴达木盆地南缘和北缘金属矿产资源地球物理勘查进展[J]. 地球科学与环境学报, 2021, 43(3): 568-586.
- PAN Tong, YU Zhong-hong, XUE Guo-qiang, et al. Geophysical Exploration of Mineral Deposits in the Northern and Southern Margins of Qaidam Basin, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2021, 43(3): 568-586.
- [41] 王进寿, 潘 彤, 李 鹏, 等. 青海省柴北缘成矿带矿床成矿系列[J]. 地球科学与环境学报, 2022, 44(3): 391-412.
- WANG Jin-shou, PAN Tong, LI Peng, et al. Metallogenic Series of Deposits in the Northern Qaidam Metallogenic Belt of Qinghai Province, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2022, 44(3): 391-412.
- [42] 孟军海, 林佳富, 才智杰, 等. 柴达木盆地盐湖型锂矿床地质特征与地球物理探测[J]. 地球科学与环境学报, 2022, 44(1): 124-131.
- MENG Jun-hai, LIN Jia-fu, CAI Zhi-jie, et al. Geological Characteristics and Geophysical Exploration of Salt Lake-type Lithium Deposits in Qaidam Basin, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2022, 44(1): 124-131.
- [43] 许靖华, 钱作华连, 卫 袁, 等. 中国察尔汗湖钾盐蒸发泵成因[J]. 化工地质, 1991(4): 1-6, 28.
- XU Jing-hua, QIAN Zuo-hua-lian, WEI Yuan, et al. Genesis of Potassium Salt Evaporation Pump in Qarhan Lake, China[J]. Geology of Chemical Minerals, 1991(4): 1-6, 28.
- [44] 张兆广. 察尔汗盐湖东段潜卤水水文地球化学特征及卤水成因分析[J]. 盐湖研究, 2009, 17(1): 19-26.
- ZHANG Zhao-guang. Unconfined Brine Hydrochemistry Characteristic and Brine Cause Analysis of East Section of Qarhan Salt Lake[J]. Journal of Salt Lake Research, 2009, 17(1): 19-26.
- [45] 马顺清, 李善平, 谢智勇, 等. 青海大风山天青石矿床地质特征及成因分析[J]. 西北地质, 2012, 45(3): 130-140.
- MA Shun-qing, LI Shan-ping, XIE Zhi-yong, et al. Characteristics and Genetic Analysis of Celestite Deposits in Dafeng Mountain Area, Qinghai[J]. Northwestern Geology, 2012, 45(3): 130-140.
- [46] 陈秉芳, 林文山, 白建海, 等. 青海尖顶山锶矿床地质特征及成因分析[J]. 西北地质, 2018, 51(4): 184-193.
- CHEN Bing-fang, LIN Wen-shan, BAI Jian-hai, et al. Geological Characteristics and Genetic Analysis of the Jiandingshan Strontium Deposit in Western Qaidam Basin[J]. Northwestern Geology, 2018, 51(4): 184-193.
- [47] 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[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2021.
- LI Hong-pu, HOU Xian-hua, PAN Tong, et al. Study on Mineralization and Utilization of Potassium-bearing Brine in Deep Qaidam Basin[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2021.
- [48] 校韩立. 柴达木盆地黑北凹地新型砂砾型含钾卤水成因研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2017.
- XIAO Han-li. Study on Origin of Potassium-bearing Brine in Sandy Gravel Bed of Heibei Concave in Qaidam Basin[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, 2017.
- [49] 葛文胜, 蔡克勤. 柴达木盆地富锶卤水的特征及成因[C]//中国地质调查局. 第八届全国矿床会议论文集. 南昌: 中国地质调查局, 2006: 327-331.
- GE Wen-sheng, CAI Ke-qin. Characteristics and Origin of Strontium-rich Brine in Qaidam Basin [C]// China Geological Survey. Proceedings of the 8th National Conference on Mineral Deposits. Nanchang: China Geological Survey, 2006: 327-331.
- [50] 李廷伟, 谭红兵, 樊启顺. 柴达木盆地西部油田卤水锶同位素特征及成因分析[C]//中国地质调查局. 第八届全国矿床会议论文集. 南昌: 中国地质调查局, 2006: 488-491.
- LI Ting-wei, TAN Hong-bing, FAN Qi-shun. Strontium Isotope Characteristics and Genetic Analysis of Bittern in Western Qaidam Basin[C]// China Geological Survey. Proceedings of the 8th National Conference on Mineral Deposits. Nanchang: China Geological Survey, 2006: 488-491.
- [51] 李建森, 李廷伟, 彭喜明, 等. 柴达木盆地西部第三系油田水水文地球化学特征[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(1): 50-55.
- LI Jian-sen, LI Ting-wei, PENG Xi-ming, et al. Hydrogeochemical Behaviors of Oilfield Water in the Tertiary in Western Qaidam Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(1): 50-55.
- [52] 李建森, 山发寿, 张西营. 阿尔金山两侧盐湖物质来源、成钾作用及其控制因素研究[J]. 地质学报, 2021, 95(7): 2205-2213.
- LI Jian-sen, SHAN Fa-shou, ZHANG Xi-ying. Study on the Material Source, Potassium Formation and Its Controlling Factors in Salt Lakes on Both Sides of the Altun Mountain[J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 95(7): 2205-2213.
- [53] 青海省自然资源厅. 青海省矿产资源储量简表(二〇

- 二一年)[R]. 西宁:青海省自然资源厅,2022.
- Department of Natural Resources of Qinghai Province. Summary of Mineral Resource Reserves of Qinghai Province by the End of 2021[R]. Xining: Department of Natural Resources of Qinghai Province, 2022.
- [54] 青海省柴达木综合地质矿产勘查院. 察尔汗等40个矿区矿产资源国情调查[R]. 西宁:青海省地质调查局,2022.
- Qaidam Integrated Geological Exploration Institute of Qinghai Province. Survey on National Conditions of Mineral Resources in 40 Mining Areas Including Qarhan[R]. Xining: Qinghai Geological Survey, 2022.
- [55] 青海省柴达木综合地质矿产勘查院. 青海中天硼锂矿业有限公司大柴旦湖硼矿国情调查[R]. 西宁:青海省自然资源厅,2022.
- Qaidam Integrated Geological Exploration Institute of Qinghai Province. Survey on National Conditions of Dachaidan Lake Boron Mine of Qinghai Zhongtian Boron and Lithium Mining Co., Ltd. [R]. Xining: Department of Natural Resources of Qinghai Province, 2022.
- [56] 青海省柴达木综合地质矿产勘查院. 格尔木市东台吉乃尔盐湖锂硼钾矿国情调查[R]. 西宁:青海省自然资源厅,2022.
- Qaidam Integrated Geological Exploration Institute of Qinghai Province. Survey on National Conditions of Lithium, Boron and Potassium Deposit in East Taijinar Salt Lake, Golmud City [R]. Xining: Department of Natural Resources of Qinghai Province, 2022.
- [57] 青海省柴达木综合地质矿产勘查院. 兴源钾肥有限责任公司大浪滩钾矿国情调查[R]. 西宁:青海省自然资源厅,2022.
- Qaidam Integrated Geological Exploration Institute of Qinghai Province. Survey on National Conditions of Dalangtan Potassium Deposit of Xingyuan Potassium Fertilizer Co., Ltd. [R]. Xining: Department of Natural Resources of Qinghai Province, 2022.
- [58] 青海省柴达木综合地质矿产勘查院. 冷湖滨地钾肥有限责任公司国情调查[R]. 西宁:青海省自然资源厅,2022.
- Qaidam Integrated Geological Exploration Institute of Qinghai Province. Survey on National Conditions of Qinghai Lenghu Bindi Potash Fertilizer Co., Ltd. [R]. Xining: Department of Natural Resources of Qinghai Province, 2022.
- [59] 青海省柴达木综合地质矿产勘查院. 纳赤台矿泉水源地等46个矿区矿产资源国情调查[R]. 西宁:青海省地质调查局,2023.
- Qaidam Integrated Geological Exploration Institute of Qinghai Province. Survey on National Conditions of Mineral Resources in 46 Mining Areas Including Naichai Mineral Water Source [R]. Xining: Qinghai Geological Survey, 2023.
- [60] 青海省柴达木综合地质矿产勘查院. 柴达木盆地油气构造深层卤水富集区资源储量评价方法[R]. 西宁:青海省地质矿产勘查开发局,2023.
- Qaidam Integrated Geological Exploration Institute of Qinghai Province. Evaluation Method of Resource Reserves in Deep Brine-enriched Areas of Hydrocarbon-bearing Structures in Qaidam Basin [R]. Xining: Bureau of Geological Exploration & Development of Qinghai Province, 2023.
- [61] 李洪普,潘 彤,李永寿,等. 柴达木盆地西部构造裂隙孔隙卤水地球化学组成及来源示踪[J]. 地球科学, 2022, 47(1): 36-44.
- LI Hong-pu, PAN Tong, LI Yong-shou, et al. Geochemical Composition and Origin Tracing of Structural Fissure and Pore Brine in Western Qaidam Basin [J]. Earth Science, 2022, 47(1): 36-44.
- [62] 郑绵平,刘喜方. 青藏高原盐湖化学及其矿物组合特征[J]. 地质学报, 2010, 84(11): 1585-1600.
- ZHENG Mian-ping, LIU Xi-fang. Hydrochemistry and Minerals Assemblages of Salt Lakes in the Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(11): 1585-1600.
- [63] 青海省水利厅. 建设世界级盐湖产业基地水资源保障分析报告[R]. 西宁:青海省水利厅,2021.
- Qinghai Department of Water Conservancy. Analysis Report on Water Resources Guarantee for Building a World-class Salt Lake Industrial Base [R]. Xining: Qinghai Department of Water Conservancy, 2021.
- [64] 郑绵平,齐 文,张永生. 中国钾盐地质资源现状与找钾方向初步分析[J]. 地质通报, 2006, 25(11): 1239-1246.
- ZHENG Mian-ping, QI Wen, ZHANG Yong-sheng. Present Situation of Potash Resources and Direction of Potash Search in China [J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(11): 1239-1246.
- [65] 陈毓川,裴荣富,王登红,等. 矿床成矿系列: 五论矿床的成矿系列问题[J]. 地球学报, 2016, 37(5): 519-527.
- CHEN Yu-chuan, PEI Rong-fu, WANG Deng-hong, et al. Minerogenetic Series for Mineral Deposits: Discussion on Minerogenetic Series (V) [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2016, 37(5): 519-527.
- [66] 青海省柴达木综合地质矿产勘查院. 青海省冷湖镇马海—巴仑马海一带卤水钾盐资源调查评价[R]. 西

- 宁:青海省地质矿产勘查开发局,2018.
- Qaidam Integrated Geological Exploration Institute of Qinghai Province. Investigation and Evaluation of Brine Potash Resources in Mahai-Balun Mahai Area, Lenghu Town, Qinghai Province[R]. Xining: Bureau of Geological Exploration & Development of Qinghai Province,2018.
- [67] 青海省柴达木综合地质矿产勘查院. 青海省冷湖镇马海地区钾矿资源调查评价、预查[R]. 西宁:青海省地质矿产勘查开发局,2022.
- Qaidam Integrated Geological Exploration Institute of Qinghai Province. Investigation, Evaluation, and Pre-survey on Brine Potassium Deposit Resources in Mahai Area, Lenghu Town, Qinghai Province[R]. Xining: Bureau of Geological Exploration & Development of Qinghai Province,2022.
- [68] 青海省柴达木综合地质矿产勘查院. 青海省茫崖镇大浪滩东北部深层卤水钾盐矿普查[R]. 西宁:青海省地质矿产勘查开发局,2016.
- Qaidam Integrated Geological Exploration Institute of Qinghai Province. General Survey on Deep Brine Potash Deposit in the Northeast of Dalangtan, Mangnai Town, Qinghai Province[R]. Xining: Bureau of Geological Exploration & Development of Qinghai Province,2016.
- [69] 青海省柴达木综合地质矿产勘查院. 青海省茫崖市阿拉巴斯套地区卤水钾矿预查[R]. 西宁:青海省地质矿产勘查开发局,2021.
- Qaidam Integrated Geological Exploration Institute of Qinghai Province. Pre-survey on Brine Potassium Deposit in Alabasitao, Mangnai Town, Qinghai Province[R]. Xining: Bureau of Geological Exploration & Development of Qinghai Province,2021.
- [70] 青海省柴达木综合地质矿产勘查院. 青海省冷湖镇昆特依矿区深层卤水钾盐资源调查评价[R]. 西宁:青海省地质矿产勘查开发局,2018.
- Qaidam Integrated Geological Exploration Institute of Qinghai Province. Investigation and Evaluation of Deep Brine Potash Resources in Kuntayi Mining Area, Lenghu Town, Qinghai Province[R]. Xining: Bureau of Geological Exploration & Development of Qinghai Province,2018.
- [71] 青海省柴达木综合地质矿产勘查院. 青海省茫崖镇察汗斯拉图地区深层卤水钾矿预查[R]. 西宁:青海省地质矿产勘查开发局,2018.
- Qaidam Integrated Geological Exploration Institute of Qinghai Province. Pre-survey on Deep Brine Potassium Deposit in Chahanshilatu Area, Mangnai Town, Qinghai Province[R]. Xining: Bureau of Geological Exploration & Development of Qinghai Province,2018.
- Exploration & Development of Qinghai Province,2018.
- [72] 青海省柴达木综合地质矿产勘查院. 青海省茫崖镇狮子沟地区深层卤水调查评价[R]. 西宁:青海省地质矿产勘查开发局,2018.
- Qaidam Integrated Geological Exploration Institute of Qinghai Province. Investigation and Evaluation of Deep Brine in Shizigou Area, Mangnai Town, Qinghai Province[R]. Xining: Bureau of Geological Exploration & Development of Qinghai Province,2018.
- [73] 青海省柴达木综合地质矿产勘查院. 柴达木西部(含整装勘查区)新近纪以来固液相钾盐资源调查评价[R]. 西宁:青海省地质矿产勘查开发局,2018.
- Qaidam Integrated Geological Exploration Institute of Qinghai Province. Investigation and Evaluation of Solid-liquid Phase Potash Resources in Western Qaidam (Including the Integrated Exploration Area) Since Neogene Period[R]. Xining: Bureau of Geological Exploration & Development of Qinghai Province,2018.
- [74] 青海省柴达木综合地质矿产勘查院. 青海省柴达木盆地红三旱四号锂矿调查评价[R]. 西宁:青海省地质矿产勘查开发局,2021.
- Qaidam Integrated Geological Exploration Institute of Qinghai Province. Investigation and Evaluation of Hongshan No. 4 Lithium Mine in Qaidam Basin, Qinghai Province[R]. Xining: Bureau of Geological Exploration & Development of Qinghai Province,2021.
- [75] 青海省柴达木综合地质矿产勘查院. 青海省大柴旦行委西台吉乃尔湖北深层卤水钾矿普查[R]. 西宁:青海省地质矿产勘查开发局,2023.
- Qaidam Integrated Geological Exploration Institute of Qinghai Province. General Survey of Deep Brine Potassium Deposit in the Northeast of West Taijinar Lake, Dachaidan Administrative Committee, Qinghai Province[R]. Xining: Bureau of Geological Exploration & Development of Qinghai Province,2023.
- [76] 青海省柴达木综合地质矿产勘查院. 青海省茫崖市鄂博梁 I 号背斜构造卤水锂矿调查评价[R]. 西宁:青海省地质矿产勘查开发局,2023.
- Qaidam Integrated Geological Exploration Institute of Qinghai Province. Investigation and Evaluation of Brine Lithium Deposit in Eboliang I Anticline Structure, Mangnai Town, Qinghai Province[R]. Xining: Bureau of Geological Exploration & Development of Qinghai Province,2023.
- [77] 青海省地质调查局,青海省柴达木综合地质矿产勘查院,青海省地质调查院. 青海省潜在矿产资源评价[R]. 西宁:青海省自然资源厅,2023.

- Qinghai Geological Survey, Qaidam Integrated Geological Exploration Institute of Qinghai Province, Qinghai Geological Survey Institute. Evaluation of Potential Mineral Resources in Qinghai Province[R]. Xining: Department of Natural Resources of Qinghai Province, 2023.
- [78] 潘 彤,李东生,李洪普,等.柴达木盐湖矿产理论创新与资源保障工作报告[R].西宁:青海省地质矿产勘查开发局,2023.
- PAN Tong, LI Dong-sheng, LI Hong-pu, et al. Report on Mineral Theoretical Innovation and Resource Guarantee in Qaidam Salt Lake[R]. Xining: Bureau of Geological Exploration & Development of Qinghai Province, 2023.
- [79] 孙大鹏.柴达木盆地盐类沉积的形成及与油气的关系[J].石油与天然气地质,1984,5(2):132-139.
- SUN Da-peng. Distribution and Formation of Salts and Their Relationship with Petroleum Generation in Qaidam Basin[J]. Oil & Gas Geology, 1984, 5(2): 132-139.
- [80] 朱允铸,钟坚华,李文生.柴达木盆地新构造运动及盐湖发展演化[M].北京:地质出版社,1994.
- ZHU Yun-zhu, ZHONG Jian-hua, LI Wen-sheng. The Neotectonic Movement and the Evolution of Saline Lakes of Qaidam Basin in Northwestern China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994.
- [81] 葛文胜,蔡克勤.柴达木盆地西北部锶矿成矿系统研究[M].北京:中国地质大学,1999.
- GE Wen-sheng, CAI Ke-qin. Strontium Mineralization in Northwestern Qaidam Basin System[M]. Beijing: China University of Geosciences, 1999.
- [82] 高春亮,余俊清,闵秀云,等.大柴旦盐湖硼矿床与国内外硼矿床的对比研究[J].盐湖研究,2016,24(4):1-11.
- GAO Chun-liang, YU Jun-qing, MIN Xiu-yun, et al. The Study on Borate Deposit of Da Qaidam Salt Lake Compared to Other Borate Deposits in the World[J]. Journal of Salt Lake Research, 2016, 24(4): 1-11.
- [83] 高小芬,林 晓,张智勇,等.青藏高原第四纪钾盐矿时空分布特征及成矿控制因素[J].地质通报,2013,32(1):186-194.
- GAO Xiao-fen, LIN Xiao, ZHANG Zhi-yong, et al. Spatial-temporal Distribution Characteristics and Ore-controlling Factors of Quaternary Potash Deposits on the Tibetan Plateau[J]. Geological Bulletin of China, 2013, 32(1): 186-194.
- [84] 张雨航.柴达木盆地蒸散量的估算及其影响因素分析[D].北京:中国地质大学,2012.
- ZHANG Yu-hang. Evapotranspiration Estimation of Qaidam Basin and Its Impact Factors[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2012.
- [85] 王永贵,郭宏业,李 健,等.柴达木盆地地下水资源及其环境问题调查评价[M].北京:地质出版社,2008.
- WANG Yong-gui, GUO Hong-ye, LI Jian, et al. Investigation and Assessment of Groundwater Resources and Their Environmental Issues in the Qaidam Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008.
- [86] 肖 勇.柴达木盆地南缘地下水循环演化模式及其变化趋势研究[D].北京:中国地质大学,2018.
- XIAO Yong. Groundwater Circulation Patterns and Its Change Trending Southern Qaidam Basin, Northwest China[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2018.
- [87] 杨海娇,魏加华,任倩慧.柴达木盆地典型流域地表水-地下水转化关系及水化学特征[J].干旱区研究,2022,39(5):1543-1554.
- YANG Hai-jiao, WEI Jia-hua, REN Qian-hui. Interaction Between Surface Water and Groundwater and Hydrochemical Characteristics in the Typical Watersheds of the Qaidam Basin [J]. Arid Zone Research, 2022, 39(5): 1543-1554.
- [88] 杨生德,潘 彤.青海省矿产资源潜力评价成矿地质背景研究报告[R].西宁:青海省地质矿产勘查开发局,2013.
- YANG Sheng-de, PAN Tong. Research Report on Evaluation of Mineral Resources Potential and Metallogenic Geological Background in Qinghai Province[R]. Xining: Bureau of Geological Exploration & Development of Qinghai Province, 2013.
- [89] 杜忠明,樊龙刚,武国利,等.柴达木盆地东部新生代盆地结构与演化[J].地球物理学报,2016,59(12):4560-4569.
- DU Zhong-ming, FAN Long-gang, WU Guo-li, et al. Cenozoic Architecture and Structural Development of the Eastern Qaidam Basin[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(12): 4560-4569.