

青海“三稀”矿床成矿系列、成矿规律与找矿方向

王进寿¹⁾, 潘彤^{2)*}, 薛万文¹⁾, 安永尉¹⁾, 李善平¹⁾, 田永革¹⁾,
雷晓清¹⁾, 余福承¹⁾, 王树林¹⁾

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

2) 青海省地质矿产勘查开发局, 青海西宁 810001

摘 要: 青海“三稀”矿以稀有金属矿产和伴生稀散元素矿产为主, 稀土矿床分布于拉脊山成矿带和柴北缘成矿带, 类型仅有岩浆型(轻稀土)和岩浆热液型(轻稀土), 成矿于早古生代奥陶纪和志留纪, 成矿环境研究程度较低。稀有金属矿床主要出露于西秦岭成矿带和柴达木成矿带, 类型可分为与岩浆作用有关的岩浆型(铌、钽)、伟晶岩型(锂、铍、铈、钼)、岩浆热液型(铌、钽); 与沉积作用有关的蒸发沉积型(锂)和化学沉积型(锶), 岩浆作用矿床成矿高峰期中生代三叠纪, 成矿于古特提斯演化后碰撞环境, 沉积作用矿床成矿爆发期为新生代新近纪和第四纪, 与青藏高原强烈抬升所致的断陷成盆及干旱气候有关; 稀散元素矿床均为有色金属矿床的伴生矿, 广泛分布于北祁连成矿带、柴北缘成矿带、东昆仑成矿带、西秦岭成矿带和阿尼玛卿成矿带, 矿种多样, 已知成矿元素有 Ga、Ge、Cd、In、Se、Te 等, 矿床类型丰富, 主要包括海相火山岩型、接触交代型和陆相火山岩型, 成矿时代相对集中于早古生代奥陶纪、晚古生代二叠纪和中生代三叠纪, 可能形成于原特提斯演化弧后盆地、岩浆弧环境。依据矿床时空分布特征、成矿作用及成矿地质背景, 将青海“三稀”矿产划分为 10 个矿床成矿系列、18 个矿床成矿亚系列、20 个矿床式。基于“三稀”矿床区域成矿地质背景、区域成矿条件、已知矿化信息和研究程度分析, 提出了成矿区带不同类型“三稀”矿产找矿远景, 认为西秦岭成矿带、柴北缘成矿带和东昆仑成矿带为伟晶岩型锂、铍、铈、钼稀有金属找矿远景区, 柴达木成矿带为蒸发沉积型和化学沉积型锂、锶、铷找矿远景区; 对于研究程度较弱的稀散元素矿, 除在已知的矿集区着力稀散元素赋存状态、超常富集研究和资源量核算之外, 东昆仑成矿带牛苦头—野马泉砂卡岩型有色金属矿集区为稀散元素找矿的有利远景区。

关键词: “三稀”矿产; 矿床类型; 构造-成矿旋回; 成矿系列; 成矿规律; 找矿方向; 青海

中图分类号: P612 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2022.091901

Metallogenic Series, Metallogenic Regularity, and Prospecting Direction of Rare Earth, Rare Metal, and Rare-scattered Minerals in Qinghai Province

WANG Jin-shou¹⁾, PAN Tong^{2)*}, XUE Wan-wen¹⁾, AN Yong-wei¹⁾, LI Shan-ping¹⁾, TIAN Yong-ge¹⁾,
LEI Xiao-qing¹⁾, YU Fu-cheng¹⁾, WANG Shu-lin¹⁾

1) Qinghai Geological Survey Institute, Key Laboratory of the Northern Qinghai-Tibet Plateau Geological Processes and Mineral Resources, Xining, Qinghai 810012;

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

Abstract: The rare earth, rare metal, and rare-scattered mineral deposits in Qinghai are dominated by rare metal minerals and associated rare and scattered element minerals. Rare earth deposits are distributed in the Lajishan

本文由青海省科技基础研究计划项目(编号: 2021-ZJ-741)、中国地质调查局“中国矿产地志”项目(编号: DD20221695; DD20190379; DD20160346)和“青海学者”专项(编号: QHS201802)联合资助。

收稿日期: 2022-07-28; 改回日期: 2022-09-08; 网络首发日期: 2022-09-20。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 王进寿, 男, 1972 年生。博士, 教授级高级工程师。主要从事矿产普查和区域成矿规律研究。E-mail: wjsgao@sina.com。

*通讯作者: 潘彤, 男, 1966 生。博士, 教授级高级工程师。主要从事区域成矿规律研究。E-mail: pant66@163.com。

metallogenic belt and the metallogenic belt in the northern margin of Qaidam Basin. Only magmatic (light rare earth) and magmatic hydrothermal (light rare earth) types are present here. Mineralization occurred in the early Paleozoic during the Ordovician and Silurian, and research on the metallogenic environment of the region is limited. Rare metal deposits are mainly exposed in the West Qinling metallogenic belt and Qaidam metallogenic belt, and can be divided into magmatic type (Nb, Ta), pegmatite type (Li, Be, Nb, Ta) and magmatic hydrothermal type (Nb, Ta) in terms of magmatism, and evaporation deposition type (lithium) and chemical deposition type (strontium) in terms of sedimentation. The mineralization of magmatic deposits peaked in the Triassic during the Mesozoic era, originating in the collision environment after the evolution of the Paleo-Tethys. The metallogenic explosion period of sedimentary deposits occurred during the Neogene and Quaternary of the Cenozoic era, and is related to faulted basin formation and arid climate caused by the strong uplift of the Qinghai-Tibet Plateau. Rare and scattered element deposits are associated with non-ferrous metal deposits, which are widely distributed in the North Qilian metallogenic belt, the northern Qaidam metallogenic belt, the East Kunlun metallogenic belt, the West Qinling metallogenic belt and the Animaqing metallogenic belt, and comprise various minerals. The known metallogenic elements are Ga, Ge, Cd, In, Se, Te, et. The types of deposits are rich, mainly including marine volcanic rock type, contact metasomatic type, and continental volcanic rock type. The metallogenic age is concentrated in the early Paleozoic (Ordovician), late Paleozoic (Permian), and Mesozoic (Triassic), which may have formed in the back arc basin and magmatic arc environment during the evolution of the original Tethys. Based on the temporal and spatial distribution characteristics of deposits, mineralization, and metallogenic geological background, the rare earth, rare metal, and rare-scattered minerals in Qinghai are divided into 10 metallogenic series, 18 metallogenic subseries, and 20 metallogenic types. Based on the analysis of the regional metallogenic geological background, regional metallogenic conditions, known mineralization information, and research of the rare earth, rare metal, and rare-scattered minerals deposits, the prospecting prospects of different types of rare earth, rare metal, and rare-scattered mineral deposits in the metallogenic belt are put forward. The western Qinling metallogenic belt, northern Qaidam metallogenic belt, and eastern Kunlun metallogenic belt are considered to be prospecting areas for pegmatite lithium, beryllium, niobium, tantalum, rubidium. The Qaidam metallogenic belt is of evaporative deposition type with a chemical deposition of lithium and strontium, and is a prospecting area for rubidium ore. For poorly studied rare and scattered element deposits, in addition to focusing on the occurrence state of rare and scattered elements, abnormal enrichment research and resource accounting is necessary in the known ore concentration areas in the Niukutou Yemaquan skarn type nonferrous metal ore concentration area. The eastern Kunlun metallogenic belt is a favorable area for rare and scattered element prospecting.

Key words: rare earth, rare metal and rare-scattered minerals; deposit type; tectonic-metallogenic cycle; metallogenic series of deposit; metallogenic regularity; prospecting direction; Qinghai

“三稀”是对稀土、稀有和稀散元素的简称(王登红等, 2013), 属于关键矿产的核心组成(侯增谦等, 2020), 因其特殊的理化性能而广泛应用于高精尖科学技术领域, 对国防军工、新兴产业发展具有重要的战略意义, 但这些金属在自然界的储量相对较少且分布高度不均, 存在较高供应风险(Gulley et al., 2018)。随着市场供需矛盾加剧和部分“三稀”资源持久居高的对外依存度(翟明国等, 2019; 李文昌等, 2022), 已然成为各国矿产资源国际博弈的焦点。

青海“三稀”矿产勘查最早可追溯至 1956 年, 对柴达木盆地大风山地区化学沉积型天青石矿(锶)的发现首开盐湖型(蒸发沉积型和化学沉积型)稀有金属调查之旅, 之后陆续在全省范围不断取得硬岩型(伟晶岩型、岩浆型、岩浆热液型)稀有金属铌、钽、锂、铍、铷(潘彤等, 2021)和岩浆型稀土元素钆

(王进寿等, 2015)等矿种的找矿成果。近年来, 以茶卡北山伟晶岩型锂铍矿床(王秉璋等, 2020)、交通社岩浆型铌钽矿床(乔建峰, 2018)、草陇伟晶岩型锂铍矿点(李五福等, 2021a)、大格勒岩浆型铌磷矿点(李五福等, 2021b)为代表的稀有金属勘查新进展和成矿地质环境、矿床类型、成矿时代研究表明, 青海“三稀”矿产成矿条件优越, 具有较大找矿潜力。然而, 青海“三稀”矿床成矿系列、成矿规律及成矿作用等科研工作起步较晚, 较大程度上制约着成矿找矿成果取得及后期的成矿预测及靶区优选。

本文通过整合大量前人测试数据, 充分分析各成矿单元不同矿床类型成矿作用特征与控制地质要素, 以《中国成矿区带划分方案》(徐志刚等, 2008)和全国重要区域成矿规律研究(王登红等, 2014)为基础, 从青海“三稀”矿床成矿地质背景及成矿环境出发, 探讨了成矿动力学及成矿旋回划分, 结合

矿床类型与矿床时空分布特征梳理,建立了区域成矿系列,总结了矿产成矿规律,划分了成矿远景区,指出了进一步找矿区域和方向,希冀助推青海“三稀”矿产勘查取得突破性进展。

1 成矿地质背景

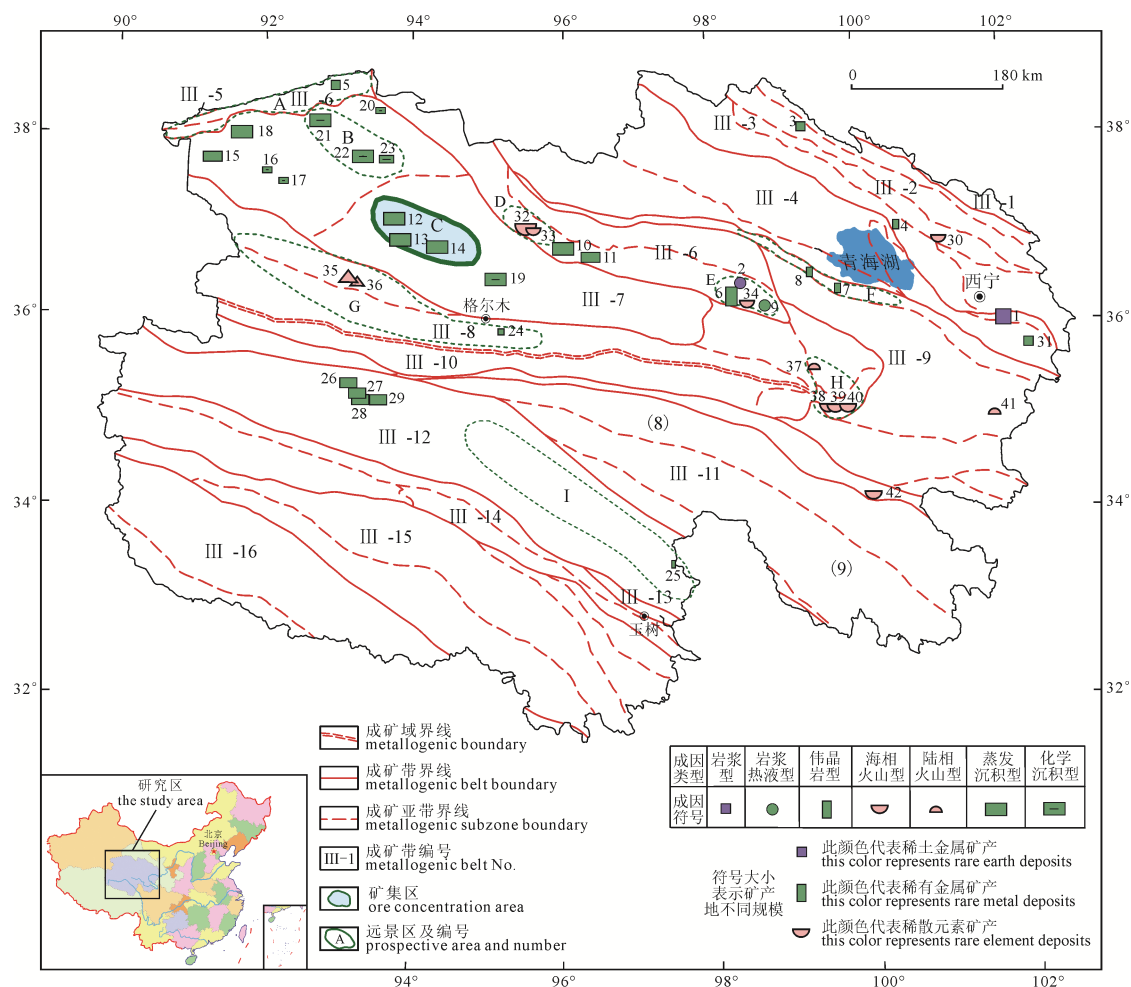
青海地处青藏高原东北部,以康西瓦—南昆仑—玛多玛沁—勉县—略阳对接带为界,纵跨秦-祁-昆多岛弧盆系构造区(以下简称秦祁昆区)和羌塘-三江岛弧盆系构造区(以下简称三江区),各构造区内夹杂多条蛇绿混杂岩带,主体属特提斯构造域(潘桂棠等, 2009; 宋述光等, 2019; 吴福元等, 2020; 刘勇等, 2022)。在原特提斯洋演化期,秦祁昆区各弧后洋盆的扩张期为震旦纪晚期—早奥陶世,火山岩浆弧形成于中奥陶世—志留纪,于早古生代时期构造转换为造山系(宋述光等, 2013, 2015; 潘桂棠等, 2016, 2022),晚志留世 A 型流纹岩的喷发表明构造已处于碰撞后伸展环境(雷勇亮等, 2021); 石炭纪—三叠纪处于古特提斯洋演化期(潘彤, 2019; 王进寿等, 2022),东昆仑复合岩浆弧广泛出露俯冲/碰撞(后)花岗岩(刘云华等, 2006; 罗明非等, 2014; 陈国超等, 2018),祁漫塔格构造带(东昆北)晚三叠世 A 型花岗岩的侵入指示后碰撞的环境(陈国超等, 2019),赛什塘-兴海发育增生杂岩带(秦岭南带)(C-P)(刘勇等, 2022)为海相火山岩型伴生稀散元素的可有金属矿床提供了岩石学条件,东昆仑东段鄂拉山地区则分布着碰撞环境下的陆相中酸性火山

岩(张洪美等, 2011); 印支期末于祁连、柴达木等陆块边缘产出有后碰撞环境下的伟晶岩型、岩浆型、岩浆热液型铌钽锂铍稀有金属矿床(点)(潘彤等, 2020; 李善平等, 2021),在东昆仑东段见有陆相溢流的高 Nb-Ta 流纹岩(丁烁等, 2011); 三江区从晚古生代到中生代经历了弧后扩张、多岛弧盆系发育、弧-弧碰撞、弧-陆碰撞转化为造山系的演化史,火山岩浆弧形成于早二叠世晚期—中三叠世(潘桂棠等, 2016, 2022)。晚中生代秦祁昆区和三江区均已进入陆内演化阶段,自古近纪以来,伴随印度板块与欧亚大陆的碰撞,青藏高原进入强烈隆升阶段(潘彤等, 2022; 王进寿等, 2022),青海南部发育青藏高原新生代后碰撞及陆内汇聚背景下的火山岩(潘桂棠等, 2022),三江区出露可能含稀有金属矿产的碱性火山熔岩,而青海北部则形成柴达木等成盐断陷盆地(魏新俊和姜继学, 1993),为新生代稀有金属的沉积作用矿床形成创造了有利成矿环境。

潘彤(2017)以青海成矿大地构造单元的三级划分为基础,根据区域成矿地质构造环境、矿床时空分布规律及区域成矿作用之特征、产物、强度等矿化信息,结合《中国成矿区带划分方案》(徐志刚等, 2008),进而自北向南厘定出秦祁昆和特提斯两大成矿域,祁连、柴达木、东昆仑、西秦岭、可可西里-巴颜喀拉、“三江”北段 6 个成矿省和 16 个Ⅲ级成矿带(图 1、表 1)。青海大多数“三稀”矿产产生出于柴达木盆地北缘 Au-Pb-Zn-Ti-Mn-Fe-Cr-Cu-W-稀有-煤-石棉-滑石-硫铁矿-石灰岩-大理岩成矿带(Ⅲ-6)、

表 1 青海Ⅲ级成矿带划分(据潘彤, 2017, 2019 修改)
Table 1 Division of tertiary metallogenic units in Qinghai Province (modified from PAN, 2017, 2019)

成矿域及编号	成矿省及编号	成矿带及编号	
秦祁昆成矿域 (I-1)	祁连成矿省 (II-1)	河西走廊 Cu-Pb-煤成矿带(III-1)(以下简称北祁连成矿带)	
		北祁连 Cu-Pb-Zn-Fe-Cr-Au-Ag-硫铁矿-石棉成矿带(III-2)	
		中祁连 Fe-Cu-Cr-Ni-W-Mo-Pb-Zn-P-石英岩-白云岩成矿带(III-3)	
		南祁连 W-Pb-Zn-Au-Cu-Ni-Cr-Ag-稀土-砂金成矿带(III-4)(以下简称南祁连成矿带)	
	阿尔金 Au-Cu-Ni-Cr-稀土-石棉-玉石成矿带(III-5)(以下简称阿尔金成矿带)		
柴达木成矿省(II-2)	柴达木盆地北缘 Au-Pb-Zn-Ti-Mn-Fe-Cr-Cu-W-稀有-煤-石棉-滑石-硫铁矿-石灰岩-大理岩成矿带(III-6)(以下简称柴北缘成矿带)		
	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(III-7)(以下简称柴达木盆地成矿带)		
特提斯成矿域 (I-2)	东昆仑成矿省(II-3)	东昆仑 Ni-Fe-Pb-Zn-Cu-Co-Au-W-Sn-玉石-硅灰石成矿带(III-8)(以下简称东昆仑成矿带)	
	西秦岭成矿省(II-4)	西秦岭 Pb-Zn-Cu(Fe)-Au-Sb-稀有-煤-大理岩-盐-泥炭成矿带(III-9)(以下简称西秦岭成矿带)	
	可可西里—巴颜喀拉成矿省(II-5)	阿尼玛卿 Cu-Co-Zn-Au-Ag-S-煤-蛇纹岩成矿带(III-10)(以下简称阿尼玛卿成矿带)	
		北巴颜喀拉—马尔康 Au-Sb-Fe-Ni-砂金-泥炭成矿带(III-11)(以下简称北巴颜喀拉成矿带)	
		南巴颜喀拉 Li-Be-Au-Cu-Zn-水晶-白云母-石盐成矿带(III-12)(以下简称南巴颜喀拉成矿带)	
三江北成矿省(II-6)	哈秀—直门达 Au-Ag-Pb-Zn-Cu-Sn-Hg-Sb-W-Be 成矿带(III-13)		
	西金乌兰-巴塘 Fe-Cu-Pb-Zn 成矿带(III-14)		
	玛章错钦湖—囊谦 Cu-Pb-Zn-Ag-Au-Fe-Hg-Sb-石膏-煤-盐类成矿带(III-15)(以下简称囊谦成矿带)		
	小唐古拉山 Fe-Cu-Pb-Zn-Au-水晶-石膏成矿带(III-16)		



A—柴北缘阿尔金成矿远景区; B—柴达木尖顶山—大风山成矿远景区; C—柴达木—里坪—东台吉乃尔湖成矿远景区;
D—柴北缘锡铁山成矿远景区; E—柴北缘沙柳泉成矿远景区; F—西秦岭茶卡北山—石乃亥成矿远景区;
G—东昆仑西段牛苦头成矿远景区; H—东昆仑鄂拉山成矿远景区; I—南巴颜喀拉山成矿远景区。

A—Altun metallogenic prospective area in the northern margin of Qaidam Basin; B—Jiandingshan—Dafengshan metallogenic prospective area in Qaidam Basin; C—Yiliping—Dongtaijinaer lake metallogenic prospective area in Qaidam Basin; D—Xitieshan metallogenic prospective area in the northern edge of Qaidam Basin; E—Shaliuquan metallogenic prospective area in the northern edge of Qaidam Basin; F—Chakabeishan—Shinaihai metallogenic prospective area in west Qinling; G—Niukutou metallogenic prospective area in west section east Kunlun; H—Elashan metallogenic prospective area in east Kunlun; I—South Bayankara mountain area.

图 1 青海“三稀”矿产及远景区分布图

Fig. 1 Distribution of rare earth, rare metal, and rare-scattered mineral deposits and prospective areas in Qinghai Province

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 (III-7)、东昆仑 Ni-Fe-Pb-Zn-Cu-Co-Au-W-Sn-玉石-硅灰石成矿带 (III-8) 和南巴颜喀拉 Li-Be-Au-Cu-Zn-水晶成矿带 (III-12)。

2 资源概况

截止 2020 年, 青海共统计有“三稀”矿产地 52 处, 其中稀土矿产 8 处、稀有矿产 19 处、稀散元素矿产 25 处, 达到矿床规模的矿产地为 23 处 (表 2), 稀有金属矿产呈现出数量和规模上的明显优势。“三稀”矿产共涉及 30 个元素, 包括 17 个稀土元素, 锂、铷、铯、钽、铌、铍、锆等 7 种稀有金属元素及镓、锗、铟、硒、锑、碲等 6 种分散元素 (青海省区调队, 1987; 潘彤等, 2021)。稀土金属主要为轻稀土, 且以伴生矿种为主, 规模较小; 与盐湖有

关的稀有金属锂矿、铷矿形成独立矿床, 规模超大型者居多, 而伟晶岩型铷矿和铍矿共伴生, 规模小, 铷、钽矿均为小型矿床; 稀散元素未发现独立矿床, 均伴生于铜铅锌等有色金属矿床, 规模多为中、小型。锂矿、铷矿资源储量居全国第一位, 铷钽矿、铷矿资源储量排名全国分别为第三、第七位, 稀土矿资源储量居全国第十位 (潘彤等, 2022)。

3 矿床类型

本文依据前人成矿地质背景、主要矿床地质特征、成岩成矿同位素测年、矿产空间分布规律等资料梳理, 侧重分析控矿要素和成矿作用特征, 结合《中国矿产地质志》矿床类型划分要求 (中国矿产地质志项目办公室和中国地质科学院矿产资源研究所, 2016), 将青海省“三稀”矿床类型初步厘定为 8 种:

表 2 青海省“三稀”主要矿产地一览表(截止 2020 年底)
Table 2 List of major mineral-producing areas of rare earth, rare metal, and rare-scattered minerals in Qinghai Province (by the end of 2020)

类型	产地名称	主(伴生)矿种	主(伴生)矿种规模	赋矿围岩	矿床类型	成矿时代(同位素年龄)	成矿单元
稀土金属	1.海东市上庄磷铁稀土矿床	P(Fe、LREE、Sc)	大型(LREE 小型)	镁铁质岩	岩浆型	Є-O(493~441 Ma) (Wang et al., 2017)	III-4
	2.乌兰县查香卡钼多金属矿床	U(Th、Nb、LREE)	中型	钠长岩	岩浆热液型?	S?	III-6
稀有金属	3.祁连县牛心山南支沟钨钼矿床	Nb、Ta(Mo)	小型	花岗岩	岩浆型	S(435 Ma) (吴才来等, 2010)	III-2
	4.天峻县团堡山-达坂山铷矿床	Rb	小型	伟晶岩	伟晶岩型	T	III-4
	5.茫崖市交通社钨矿床	Nb、Ta(LREE)	小型	花岗岩	岩浆型	O (453 Ma) (乔建峰, 2018)	III-5
	6.乌兰县沙柳泉钨钼矿床	Rb(Nb、Ta、Li)	大型(Nb、Ta 小型)	伟晶岩	伟晶岩型	T	III-6
	7.共和县石乃亥钨矿床	Nb、Ta	小型	伟晶岩	伟晶岩型	T	III-9
	8.天峻县茶卡北山钨钼矿床	Li、Be	小型	伟晶岩	伟晶岩型	T(217~241 Ma) (王秉璋等, 2020; Pan et al., 2021; 李善平等, 2021)	III-9
	9.乌兰县夏日达乌钨钼矿床	Nb、Ta(La、Ce)	小型	花岗岩类	岩浆热液型	O?	III-6
	10.大柴旦行委大柴旦湖硼矿床	B(Li)	超大型	盐湖	蒸发沉积型	Q(郑绵平等, 1989; 高春亮等, 2015)	III-6
	11.大柴旦行委小柴旦湖硼矿床	B(Li)	大型	盐湖	蒸发沉积型	Q(郑绵平等, 1989; 高春亮等, 2015)	III-6
	12.茫崖市一里坪锂矿床	Li	超大型	盐湖	蒸发沉积型	Q(余俊清等, 2018; 胡宇飞等, 2021)	III-7
	13.大柴旦行委西台吉乃尔湖锂矿床	Li	超大型	盐湖	蒸发沉积型	Q(余俊清等, 2018; 胡宇飞等, 2021)	III-7
	14.格尔木市东台吉乃尔湖锂矿床	Li	超大型	盐湖	蒸发沉积型	Q(余俊清等, 2018; 胡宇飞等, 2021)	III-7
	15.茫崖市尕斯库勒钾矿床	K(Li)	大型	盐湖	蒸发沉积型	Q(余俊清等, 2018; 胡宇飞等, 2021)	III-7
	16.茫崖市大浪滩-黑北凹地 深层卤水钾矿床	K(Li)	小型	盐湖	化学沉积型	Q(韩佳君, 2013)	III-7
	17.冷湖镇昆特依深层卤水钾矿床	K(Li)	小型	盐湖	化学沉积型	Q	III-7
	18.茫崖市大浪滩钾田	K(Li)	超大型	盐湖	蒸发沉积型	Q	III-7
	19.格尔木市察尔汗钾镁盐矿床	K、Mg、Na(Rb)	超大型	盐湖	蒸发沉积型	Q	III-7
	20.茫崖市南翼山矿区深层卤水 硼钾矿床	Li、B、K	小型	钙质泥岩	化学沉积型	N(韩佳君, 2013)	III-7
	21.茫崖市尖顶山硼矿床	Sr	超大型	钙质泥岩	化学沉积型	N(魏新俊和姜继学, 1993)	III-7
	22.茫崖市大风山硼矿床	Sr	超大型	钙质泥岩	化学沉积型	N(魏新俊和姜继学, 1993)	III-7
	23.茫崖市碱 1 井-碱山硼矿床	Sr	中型	钙质泥岩	化学沉积型	N	III-7
	24.格尔木市大格勒硼矿床	Nb、P(Ta、LREE)	矿点	碱性杂岩	岩浆型	T?	III-8
	25.治多县草院锂矿点	Li、Be、Rb	矿点	伟晶岩	伟晶岩型	T(204~200 Ma)(李五福等, 2021a)	III-12
	26.治多县库赛湖东小湖锂盐矿点	Li	矿点	盐湖	蒸发沉积型	Q(潘彤等, 2022)	III-12
	27.治多县海丁诺尔锂盐矿点	Li	矿点	盐湖	蒸发沉积型	Q(潘彤等, 2022)	III-12
	28.治多县海丁诺尔南锂盐矿点	Li	矿点	盐湖	蒸发沉积型	Q(潘彤等, 2022)	III-12
	29.治多县盐湖锂盐矿点	Li	矿点	盐湖	蒸发沉积型	Q(潘彤等, 2022)	III-12

续表2

类型	矿产地名	主(伴生)矿种	主(伴生)矿种规模	赋矿围岩	矿床类型	成矿时代(同位素年龄)	成矿单元
稀 散 元 素	30.门源县红沟铜矿床	Cu(Se)	小型(Se小型)	中基性海相火山岩	海相火山岩型	O(443 Ma)(王国强等, 2011)	III-2
	31.化隆县拉水峡铜镍钴矿床	Cu、Ni(Co、Te)	小型	超镁铁质岩	岩浆型	O(449.8 Ma)(张照伟等, 2015)	III-4
	32.锡铁山铅锌矿床	Pb、Zn(Ag、Ga、In、Cd)	超大型(In、Cd中型)	中基性海相火山岩	海相火山岩型	O(486-440 Ma) (付建刚等, 2014; 戴磊果, 2019; 魏俊浩等, 2021)	III-6
	33.柴达木锡铁山铅锌矿床中间沟矿区	Pb、Zn(Ag、Ga、In、Cd)	小型	中基性海相火山岩	海相火山岩型	O	III-6
	34.都兰县太子沟铜矿床	Cu、Zn(Ga、In、Cd)	小型	中基性海相火山岩	海相火山岩型	O(杨生德和潘彤, 2013)	III-6
	35.格尔木市牛苦头矿区 M1 磁异常区铁多金属矿床	Zn、Fe、Pb(Cd)	中型	砂卡岩	接触交代型	T(375-353Ma) (王新雨等, 2021)	III-8
	36.格尔木市牛苦头矿区 M4 磁异常区铁多金属矿床	Fe、Zn(Cd)	小型	砂卡岩	接触交代型	T(375-353 Ma) (王新雨等, 2021)	III-8
	37.兴海县索拉沟铜铅锌银矿床	Cu、Pb、Zn(Ag、Ga、Cd)	小型(Ga、Cd小型)	酸性火山熔岩	陆相火山岩型	T(聂鑫等, 2014)	III-8
	38.兴海县日龙沟矿区铜铅锌锡矿床	Sn、Pb、Zn(Cd)	中型	中基性火山岩	海相火山岩型	P(卫岗和王移生, 2010)	III-8
	39.兴海县铜峪沟铜矿床	Cu、Pb、Zn(Ge、Ga、Cd、Se)	中型(Ge、Ga中型)	中基性火山岩	海相火山岩型	P	III-8
	40.兴海县赛什塘铜矿床	Cu(Ga、Cd、Se)	中型(Ga、Cd小型, Se中型)	中基性火山岩	海相火山岩型	P(李东生等, 2009)	III-8
	41.泽库县老藏沟铅锌锡矿床	Pb、Zn、Sn(In、Cd)	小型(In、Cd小型)	酸性火山熔岩	陆相火山岩型	T(李义伟等, 1989)	III-9
	42.玛沁县德尔尼铜钴矿床	Cu、Co(Se)	大型(Se大型)	基性火山岩	海相火山岩型	P(295.5 Ma)(焦建刚等, 2013; 段俊等, 2014)	III-10

岩浆型、岩浆热液型、伟晶岩型、蒸发沉积型、化学沉积型、海相火山岩型、陆相火山岩型和接触交代型(表 2; 图 2)。稀土金属矿仅有岩浆型(王进寿等, 2015; 李童斐等, 2018)和岩浆热液型(钟军等, 2018; Zhong et al., 2019); 稀有金属内生矿床类型较为丰富, 但主要为与岩浆作用有关的伟晶岩型(王秉璋等, 2020; 李善平等, 2021; 潘彤等, 2022)和岩浆型(乔建峰, 2018), 外生矿床则为大型盐湖沉积作用产物(郑绵平等, 2013; 李洪普等, 2015; 潘彤等, 2022); 稀散元素成矿均与岩浆作用有关, 多数矿床受海相火山岩控制(卫岗和王移生, 2010; 孙华山等, 2012; 焦建刚等, 2013; 曾小华和周宗桂, 2014; 段俊等, 2014; 李小虎等, 2014; 李鹏, 2019; 姚希柱等, 2019; 冯志兴等, 2020; 许冲等, 2022), 接触交代型(王新雨等, 2020, 2021)和陆相火山岩型(张雪亭等, 2014; 周红智, 2019)占据一席之地。因而, 青海内生“三稀”矿产以伟晶岩型与海相火山岩型矿床最为重要, 蒸发沉积型和化学沉积型矿床则在沉积作用矿床中居首要位置(图 2), 此四种类型矿床可作为今后“三稀”矿产勘查的主攻方向。

4 矿产分布时空特征

4.1 成矿时代特征

根据已获得的放射性同位素成岩、成矿年龄数据(表 2), 上庄磷铁稀土矿床成岩成矿年龄为 493~441 Ma(Wang et al., 2017), 查查香卡铀-稀土矿床成矿年龄晚于中奥陶世(荣晓等, 2022), 可能形成于志留纪后碰撞环境(王进寿等, 2022)。以茶卡北山伟晶岩型锂铍矿为典型矿床的 Li-Be 矿成矿年龄为 217~241 Ma 等(锆石、锰钽铁矿等单矿物 U-Pb), 以交通社岩浆型铌钽矿床为代表的 Nb-Ta 矿赋矿花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 453 Ma; 与盐湖沉积作用有关的稀有金属 Sr、Li、Rb 为新生代成矿旋回产物。稀散元素矿产成矿时代较为复杂, 大致可分为奥陶纪、二叠纪和三叠纪三个成矿阶段(图 3), 与矿床所在成矿单元的地质背景演化期岩浆作用关系密切, 例如, 牛苦头矿区 M1、M4 矿段控制成矿的花岗闪长岩锆石 U-Pb 定年(LA-ICP-MS)为 375~353 Ma, 对应于海西期(王新雨等, 2021)。

总体来看, 稀土矿床主要形成于古生代(图 3); 中生代伟晶岩型锂矿床成矿的高峰期, 盐湖沉积作用锂矿床的成矿时代主要为新近纪和第四纪(潘彤等, 2022); 稀散元素矿床成矿与主矿种有色金属矿床成矿时代一致, 早古生代奥陶纪和晚古生代二叠纪为海相火山岩型矿床成矿的重要时期, 接触交代型和陆相火山岩型矿床以中生代三叠纪为主要成矿时期。

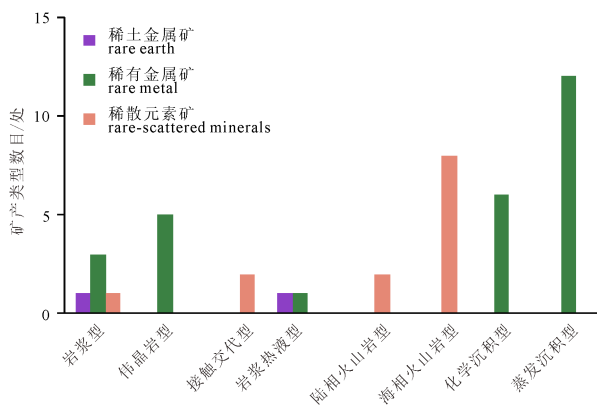


图 2 青海“三稀”矿产主要类型

Fig. 2 Main types of rare earth, rare metal, and rare-scattered minerals in Qinghai Province

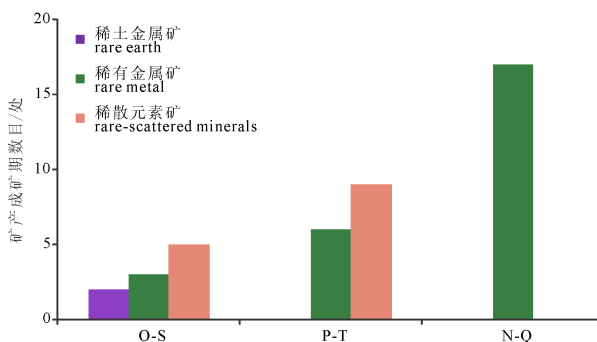


图 3 青海“三稀”矿产主要成矿期分布

Fig. 3 Distribution of main metallogenic periods of rare earth, rare metal, and rare-scattered minerals in Qinghai Province

4.2 成矿空间特征

在空间上, 青海“三稀”矿产分布较为广泛(图 1, 图 4), 以目前掌握资料看, 相对集中于秦祁昆成矿带(I-1), 但矿床地质特征总体研究程度较低。稀散元素矿床主要分布于柴北缘成矿带(III-6)和东昆仑成矿带(III-8)有色金属矿集区, 前者以锡铁山铅锌矿集区较为典型, 后者以日龙沟-铜峪沟-赛什塘有色金属矿集区具代表性; 与沉积作用有关的稀有金属矿床主要聚集于柴达木盆地成矿带(III-7)中、西部现代盐湖或干盐湖盐类矿产矿集区(潘彤等, 2022), 而与岩浆作用有关的铌钽矿床零星见于北

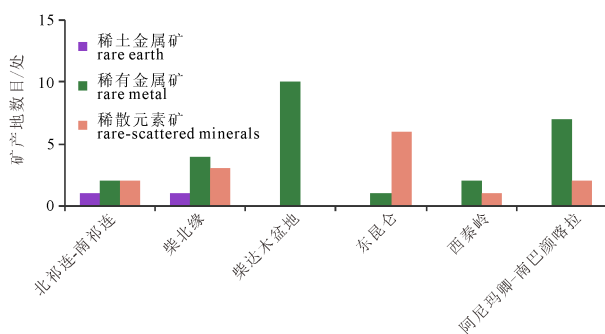


图 4 青海“三稀”矿产地分布

Fig. 4 Distribution of rare earth, rare metal, and rare-scattered mineral areas in Qinghai Province

祁连成矿带(III-1)、阿尔金成矿带(III-5)和柴北缘成矿带(III-6)。随着近年来勘查成果不断积累与研究程度的提高,西秦岭成矿带(III-9)宗务隆山地区和南巴颜喀拉成矿带(III-12)伟晶岩型锂铍矿(化)点逐渐增多(王秉璋等, 2020; 李善平等, 2021; 李五福等,

2021a), 李五福等(2021b)披露在东昆仑成矿带(III-8)大格勒一带零星发现与碳酸岩有关的铌钽矿化点。

概言之, 稀土矿床空间分布均产出于蛇绿混杂带, 尽管已知 2 处矿产地成矿构造环境迥异(王进寿等, 2015, 2021, 2022; 陈擎等, 2021), 但都与早古生

表 3 青海Ⅲ级成矿单元“三稀”矿床成矿系列划分方案
Table 3 Division scheme of rare earth, rare metal, and rare-scattered mineral metallogenic series of tertiary metallogenic unit in Qinghai Province

成矿 旋回	矿床成矿 系列组合	矿床成矿系列	矿床成矿亚系列	矿床式	代表性矿床(点)
E-Q		新生代与断陷盆地湖相沉积作用有关的 K-B-Mg-稀有(Li、Sr、Rb)-石盐矿床成矿系列(据潘彤, 2017, 2019, 2022; 王进寿等, 2022 修改)	柴达木盆地第四纪蒸发沉积型 B-Li-K 矿床成矿亚系列	大柴旦湖式、东台式、一里坪式	大柴旦镇大柴旦湖硼矿区, 茫崖市一里坪锂矿区, 格尔木市东台吉乃尔湖锂矿区
			柴达木盆地第四纪蒸发沉积型 K-Mg-Na-Rb 矿床成矿亚系列	察尔汗式	格尔木市察尔汗钾镁盐矿床
			柴达木盆地背斜构造第四纪化学沉积型深层卤水 K-Li 矿床成矿亚系列	昆特依式	茫崖市大浪滩—黑北凹地深层卤水钾矿床, 冷湖镇昆特依深层卤水钾矿区
			柴达木盆地干盐湖新近纪化学沉积型 Sr 矿床成矿亚系列	大风山式、尖顶山式	茫崖市大风山锶矿床, 茫崖市尖顶山锶矿床
			柴达木盆地裂隙充填新近纪化学沉积型深层卤水 Li-B-K 矿床成矿亚系列	南翼山式	茫崖市南翼山矿区深层卤水锂硼钾矿床
			南巴颜喀拉西部第四纪盐湖蒸发沉积型 Li 矿床成矿亚系列		治多县海丁诺尔锂盐矿点
C-T	晚古生代—早中生代与岩浆作用有关的稀有金属(Nb-Ta-Li-Be-Rb)-有色金属矿-(伴生稀散元素 Ga-Ge-Cd-Se-Te)矿床成矿系列组合	南祁连成矿带三叠纪伟晶岩型 Rb 矿床成矿系列			天峻县团保山—达坂山钨矿床
		西秦岭成矿带三叠纪与岩浆岩有关的稀有金属-有色金属-伴生稀散元素矿床成矿系列	宗务隆山地区伟晶岩型 Li-Be-Nb-Ta 矿床成矿系列		共和县石乃亥铌钽矿床, 天峻县茶卡北山锂铍矿床
		柴北缘成矿带三叠纪伟晶岩型 Rb-Nb-Ta-Li 矿床成矿系列	同仁地区陆相火山岩型 Pb-Zn-Sn-(In-Cd)矿床成矿亚系列	老藏沟式	泽库县老藏沟铅锌锡矿床
			二叠纪海相火山岩型 Cu-Pb-Zn-Sn-(Ge-Ga-Cd-Se)矿床成矿亚系列	赛什塘式, 铜峪沟式	乌兰县沙柳泉铷钽铊矿床, 兴海县日龙沟矿区铜铅锌锡矿床, 兴海县赛什塘铜矿床, 兴海县铜峪沟铜矿床
		东昆仑成矿带二叠纪—三叠纪与岩浆活动有关的稀有-伴生稀散元素矿床成矿系列	三叠纪陆相火山岩型 Cu-Pb-Zn-Ag-(Ga-Cd)矿床成矿亚系列	索拉沟式	兴海县索拉沟铜铅锌银矿床
			三叠纪接触交代型 Fe-Pb-Zn-(Cd)矿床成矿亚系列	牛苦头式	格尔木市牛苦头矿区 M1 磁异常区铁多金属矿床, 格尔木市牛苦头矿区 M4 磁异常区铁多金属矿床
			阿尼玛卿成矿带海相火山岩型 Cu-Co-(Se)矿床成矿系列	德尔尼式	玛沁县德尔尼铜钴矿床
		南巴颜喀拉成矿带三叠纪伟晶岩型 Li-Be-Rb 矿床成矿系列			治多县草陇锂铍矿点
Nh-D	早古生代与岩浆作用有关的轻稀土金属-稀有金属(Nb-Ta)-La-Ce-有色金属-(伴生稀散元素 Ga-Cd-In-Se-Te)矿床成矿系列组合	北祁连成矿带奥陶纪与岩浆活动有关的 Nb-Ta-(Mo)-Cu-(Se)矿床成矿系列	志留纪与酸性花岗岩有关的岩浆型 Nb-Ta-Mo 矿床成矿系列		祁连县牛心山南支沟钨钼矿床
			达坂山奥陶纪弧后盆地与中基性火山岩有关的海相火山岩型 Cu-(Se)矿床成矿亚系列	红沟式	门源县红沟铜矿床
		南祁连成矿带奥陶纪与岩浆活动有关的 P-Fe-LREE-Sc-Cu-Ni-(Te)矿床成矿系列	拉脊山蛇绿混杂带与镁铁质岩有关的岩浆型 P-Fe-LREE-Sc 矿床成矿亚系列	上庄式	海东市上庄磷铁稀土矿床
			化隆微地块与超镁铁质岩有关的岩浆型 Cu-Ni-Co-(Te)矿床成矿亚系列	拉水峡式	化隆县拉水峡铜镍钴矿床
		柴北缘成矿带奥陶纪—志留纪与岩浆活动有关的 LREE-U-Th-Nb-Ta 矿床成矿系列	阿尔金地区岩浆弧奥陶纪岩浆型 Nb-Ta-(LREE)矿床成矿亚系列	交通社式	茫崖市交通社铌钽矿床
			柴北缘蛇绿混杂带志留纪岩浆热液型 U-Th-Nb-Ta-(LREE)矿床成矿亚系列		乌兰县查查香卡铀多金属矿床, 乌兰县夏日达乌铌钽矿床
			柴北缘奥陶纪弧后盆地海相火山岩型 Pb-Zn-Ag-Cu-(Ga-In-Cd)矿床成矿亚系列	锡铁山式	锡铁山铅锌矿床, 柴达木锡铁山铅锌矿床中间沟矿区, 都兰县太子沟铜锌矿床

代岩浆作用成矿有关。盐湖沉积作用矿床(蒸发沉积型和化学沉积型)稀有金属 Sr、Li 集中汇聚于柴达木盆地成矿带(III-7); 岩浆作用矿床(伟晶岩型、岩浆型、岩浆热液型)稀有金属 Nb、Ta、Rb、Li、Be 主要出露于柴北缘成矿带(III-6); 海相火山岩型、接触交代型及陆相火山岩型稀散元素矿床相对集中于柴北缘成矿带(III-6)和东昆仑成矿带(III-8)。除盐湖沉积作用矿床外, 青海内生“三稀”矿产多处于弧盆系褶皱造山带。

5 青海“三稀”矿床成矿系列厘定

矿床成矿系列是指在一定的地质历史时期或构造运动阶段, 在一定的地质构造单元及构造部位, 与一定的地质成矿作用有关, 形成一组具有成因联系的矿床的自然组合(程裕淇等, 1979, 1983; 陈毓川, 1994, 1997; 陈毓川等, 2006, 2015, 2016, 2020), 属于矿床的一种基本自然分类, 具体反映特定成矿带矿床成矿期、成矿地质环境、成矿作用及矿床类型组合的特征和规律, 其可以研究不同地质历史阶段和特定构造环境下的成矿作用和矿床组合, 该理论的“全位成矿、缺位找矿”思维方法对后期的区域成矿预测及靶区优选具有重要指导意义(陈毓川, 1994; 陈毓川等, 2006, 2016, 2020)。

潘彤等(2022)对青海锂矿成矿系列有过初步划分, 并指出青海省锂矿成矿系列分布于中生代和新生代, 对本次划分裨益较大。本文依照成矿系列理论, 以成矿单元、矿产时空分布特征及成矿作用为划分依据, 将青海“三稀”矿产厘定为 10 个矿床成矿系列、18 个矿床成矿亚系列、20 个矿床式(表 3)。

6 重要矿床成矿系列基本特征

依据厘定矿床成矿系列的“四个一”(陈毓川等, 2016, 2020)条件分析, 青海“三稀”矿床成矿系列具有鲜明的时空分布特征, 其形成与区域构造-成矿演化相耦合, 时间上可划分为早古生代奥陶纪—志留纪构造-成矿期、晚古生代—早中生代的二叠纪—三叠纪构造-成矿期、新生代的新近纪—第四纪构造-成矿期; 空间上相对集中于柴北缘成矿带、柴达木盆地成矿带、东昆仑成矿带; 成矿作用主要与岩浆作用和沉积作用密切相关; 矿种以稀有金属锂、铌、钽和伴生稀散元素镓、锗、铟、镉、硒为主(图 5)。

潘彤等(2022)对柴北缘成矿带三叠纪伟晶岩型铌、钽、锂矿床成矿系列, 西秦岭成矿带宗务隆地区三叠纪伟晶岩型锂、铍、铌、钽矿床成矿系列, 南巴颜喀拉成矿带与三叠纪岩浆作用有关锂、铍矿床成矿系列, 以及柴达木成矿带与新生代沉积作用有关的钾、硼、锂、盐类矿产矿床成矿系列特征有过阐明(详见其论文), 本文不再赘述, 仅对包含矿床数量众多、研究程度较高、类型重要、矿床典型、找矿潜力较大的主要矿床成矿(亚)系列予以概述。

6.1 柴北缘成矿带奥陶纪—志留纪与岩浆活动有关的轻稀土-铀-钍-铌-钽矿床成矿系列

为原特提斯洋壳俯冲过程的岩浆作用成矿产物, 产出于岩浆弧、蛇绿混杂岩带和弧后盆地。主要有三个亚系列, 阿尔金地区岩浆弧奥陶纪岩浆型 Nb-Ta-(轻稀土)矿床成矿亚系列, 在阿尔金发现与奥陶纪花岗岩有关的岩浆型铌钽(轻稀土)矿, 含矿

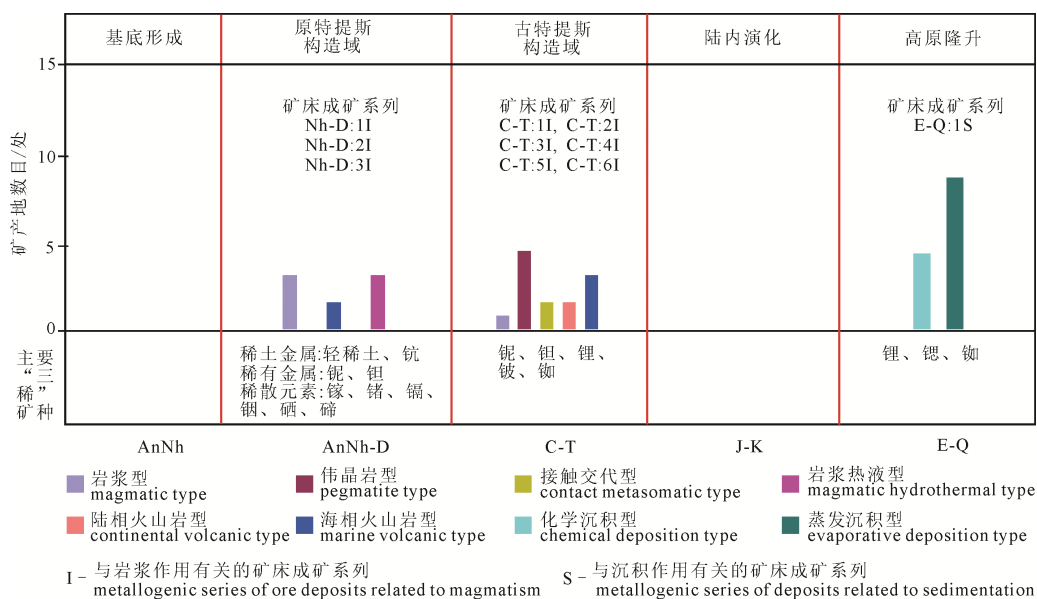


图 5 青海“三稀”矿床成矿系列与成矿作用(底图据王进寿等, 2022)

Fig. 5 Metallogenic series and mineralization of rare earth, rare metal, and rare-scattered minerals deposit in Qinghai Province (base map according to WANG et al., 2022)

岩体主要为奥陶纪偏碱性花岗岩,产于下元古界达肯大坂岩群基底变质地层中的岩浆型稀有金属矿床,代表性矿产地为茫崖市交通社铌钽矿床;柴北缘蛇绿混杂带志留纪岩浆热液型 U-Th-Nb-Ta-(轻稀土)矿床成矿亚系列,代表性矿产地仅有乌兰县查查香卡铀多金属矿床和(钟军等, 2018)乌兰县夏日达乌铌钽矿床,但目前矿产地研究程度较低,成矿时代和成因类型尚不明确;柴北缘奥陶纪弧后盆地海相火山岩型 Pb-Zn-Ag-Cu-(Ga-In-Cd)矿床成矿亚系列,成矿作用与弧后扩张环境沉积的滩间山群火山-沉积组合地层有关(孙华山等, 2012; 戴荔果, 2019; 魏俊浩等, 2021), 铅、锌、铜等为有色金属矿床的主矿种, 镓、铟、镉等稀散元素为伴生矿种具储量规模, 其中铟、镉达中型(青海省国土资源厅, 2016)。

6.2 东昆仑成矿带二叠纪—三叠纪与岩浆活动有关的稀有-伴生稀散元素矿床成矿系列

由一系列与古特提斯俯冲-碰撞造山过程岩浆作用相关的有色金属伴生稀散元素矿床构成, 产出于东昆仑构造带二叠纪增生杂岩带(杨生德和潘彤, 2013; 王辉, 2016; 潘桂棠等, 2022)、三叠纪陆缘弧(聂鑫等, 2014; 王新雨等, 2020, 2021)等构造环境。有三个亚系列, 二叠纪海相火山岩型 Cu-Pb-Zn-Sn-(Ge-Ga-Cd-Se)矿床成矿亚系列, 赋矿地层为二叠纪切吉组海相火山-沉积岩系, 包括玄武岩、凝灰岩、硅质岩等, 矿床主矿种铜铅锌等资源量规模较大, 伴生稀散元素富集, 储量较为可观, 代表性矿床有兴海县日龙沟矿区铜铅锌锡矿床、兴海县赛什塘铜矿床、兴海县铜峪沟铜矿床; 三叠纪陆相火山岩型 Cu-Pb-Zn-Ag-(Ga-Cd)矿床成矿亚系列, 分布于东昆仑东部鄂拉山岩浆弧, 矿体围岩为晚三叠世鄂拉山组(张雪亭等, 2014)流纹岩、英安岩等中酸性陆相火山岩, 镓、镉为伴生元素, 达小型规模(潘彤等, 2021), 代表性矿床为兴海县索拉沟铜铅锌银矿床; 三叠纪接触交代型 Fe-Pb-Zn-(Cd)矿床成矿亚系列, 主要发现于东昆仑成矿带西段牛苦头地区, 成矿与中酸性花岗岩侵入于奥陶系、石炭系碳酸盐岩建造接触变质岩有关, 矿床中稀散元素 Cd 超常富集成矿, 代表性矿床为格尔木市牛苦头矿区 M1 磁异常区铁多金属矿床(王新雨等, 2021)。最近, 李五福等(2021b)在东昆仑中段大格勒地区首次发现了 Nb、Ta、P 和 REE 矿化碱性杂岩体, 初步勘查圈定出 Nb、P 矿化体一条, Ta 和 REE 也伴有矿化, 显示出较大的成矿潜力。

6.3 宗务隆山地区伟晶岩型 Li-Be-Nb-Ta 矿床成矿亚系列

位于西秦岭构造带宗务隆山晚古生代陆缘裂谷(潘桂棠等, 2009), 属西秦岭成矿带。稀有金属成

矿作用与印支期造山(郭安林等, 2009; 高万里等, 2021)环境花岗伟晶岩有关(王秉璋等, 2020; Pan et al., 2021; Liu et al., 2022), 成矿时代为中—晚三叠世。近年来在该地区发现了天峻县茶卡北山锂铍矿床, 含矿伟晶岩脉成群分布, 岩石主要为含绿柱石锂辉石伟晶岩和含绿柱石花岗伟晶岩, 岩石稀土元素配分曲线具 W 型“四分组”效应(王秉璋等, 2020), 富集 Li、Cs、Rb、Be、Ta 和 Nb, 组成矿物主要有石英、钠长石、锂辉石、绿柱石等, 根据伟晶岩稀有金属矿物的明显富集特征(Černý, 1991; Černý and Ercit, 2005), 可归类于 LCT(Li-Cs-Ta)型伟晶岩(李善平等, 2021), 本文推测其为过铝质花岗岩岩浆高程度结晶分异产物(London, 2018)。该矿床为青藏高原北缘稀有金属矿勘查的重要成果。邻地尚产出有铌钽矿床, 代表性矿床为共和县石乃亥铌钽矿床。

6.4 拉脊山蛇绿混杂带与镁铁质岩有关的岩浆型 P-Fe-LREE-Sc 矿床成矿亚系列

分布于南祁连构造带拉脊山早古生代蛇绿混杂岩带(Wang et al., 2017), 矿床与地幔岩浆活动镁铁质岩有关, 控矿岩性主要为黑云母透辉石岩、磷灰石黑云母透辉石岩等, 为岩浆型 P-Fe-LREE 矿床, 稀土元素主要赋存于磷灰石、榍石、磁铁矿、锆石等矿物(杨合群, 2020), 后发现异常高含量的钐(王进寿等, 2015), 富钐矿物相为透辉石。代表性矿床为海东市上庄磷铁稀土矿床。该矿床成矿亚系列仅在南祁连拉脊山蛇绿混杂带见及, 但因与其具相似成矿条件的成矿单元在青海分布广泛, 因而, 对该矿床成矿系列的厘定有着较为重要的找矿地质意义。

7 区域构造演化与“三稀”矿成矿作用

根据地壳演化、岩浆岩带复合、叠加等特点, 青海省自太古代至第四纪经历的漫长地质构造演化划分为五个成矿构造演化旋回(潘彤, 2019; 潘彤等, 2021; 王进寿等, 2022)(表 4), 即前南华纪基底形成(AnNh)、南华纪—泥盆纪(Nh-D)原特提斯形成、石炭纪—三叠纪(C-T)古特提斯形成、侏罗纪—白垩纪(J-K)特提斯演化和古近纪—第四纪(E-Q)高原碰撞隆升演化。其中, 早古生代奥陶纪—志留纪、晚古生代二叠纪—早中生代晚三叠世阶段是青海“三稀”内生矿床成矿的高峰期, 新生代新近纪—第四纪为稀有金属外生矿床的主要成矿期。

7.1 原特提斯“三稀”成矿作用

南华纪—泥盆纪柴北缘处于原特提斯洋演化旋回(张建新等, 2015), 为秦祁昆造山系最重要的加里东造山运动期, 历经裂解、俯冲消减、碰撞-碰撞后伸展三个阶段(夏林圻等, 2016), 为柴北缘成矿

表 4 青海省成矿构造演化旋回划分
Table 4 Division of metallogenic tectonic evolution cycles in the northern margin of Qinghai Province

地质时代		旋回	阶段
代	纪		
新生代(Cz)	第四纪(Q)	青藏高原隆升	强烈隆升(2.59 Ma—今)
	新近纪(N)		隆升(65.5—2.59 Ma)
	古近纪(E)		
中生代(Mz)	白垩纪(K)	特提斯洋演化	陆内造山(199.6—65.5 Ma)
	侏罗纪(J)		
	三叠纪(T)		
晚古生代(Pz ₂)	二叠纪(P)	古特提斯洋演化	板内海相及复合岩浆弧/陆内裂谷(359.2—199.6 Ma)
	石炭纪(C)		
	泥盆纪(D)		
早古生代(Pz ₁)	志留纪(S)	原特提斯洋演化	碰撞-碰撞后伸展(430—390 Ma) (Yu et al., 2014)
	奥陶纪(O)		俯冲消减(500—423 Ma) (张建新等, 2015; 夏林圻等, 2016)
	早—晚寒武世(Є ₂ —Є ₄)		
	底寒武世(Є ₁)		
	震旦纪(Z)		
新元古代(Pt ₃)	南华纪(Nh)	裂解(> 510 Ma)(张建新等, 2015)	裂解(> 510 Ma)(张建新等, 2015)
	青白口纪(Qb)		
	待建纪		
中元古代(Pt ₂)	蓟县纪(Jx)	基底演化	基底盖层形成(1600—780 Ma)
	长城纪(Ch)		
古元古代(Pt ₁)	蓟沱纪(Ht)		
新太古代(Ar ₃)			结晶基底形成(> 1600 Ma)
成矿域		秦祁昆成矿域、特提斯成矿域	

带、东昆仑成矿带构造-成岩-成矿的高峰期, 尤以奥陶纪—志留纪俯冲阶段为海相火山岩型伴生稀散矿床的形成提供了优越地质环境。陆-陆碰撞过程对深部结构的扰动、物质结构的改造等机制是成矿作用的重要约束条件(潘桂棠等, 2022), 柴北缘、东昆仑志留纪造山背景下局部形成岩浆热液型伴生稀土矿和稀有金属矿等。

柴北缘构造带于俯冲末期(O₃)弧后(内)盆地(史仁灯等, 2004; 张孝攀等, 2015)扩张, 发育海相火山-沉积成矿系统, 形成海相火山岩型铅锌(银)矿床(Zhao et al., 2021), 其中伴生的镓、铟、镉稀散元素发生超常富集成矿; 该时期阿尔金成矿带主要匹配与偏碱性花岗岩有关的岩浆型铌钽矿床。志留纪—泥盆纪, 柴北缘处于碰撞-碰撞后伸展阶段, 志留纪形成与侵入岩有关的岩浆热液型铀-稀土多金属矿产; 南祁连构造带拉脊山蛇绿混杂岩带局部生成与(超)镁铁质岩有关的岩浆型磷铁稀土矿床。

7.2 古特提斯构造域“三稀”成矿作用

该成矿时期青海三江构造带、东昆仑构造带、西秦岭构造带属古特提斯构造域的重要组成部分, 以往成岩成矿时代同位素年龄研究证实, 大规模成矿集中于二叠纪—三叠纪(李东生等, 2009; 焦建刚等, 2013; 聂鑫等, 2014; 付长垒等, 2016; 孙鹏飞, 2017; 王新雨等, 2021), 与海西晚期—印支期古特

提斯洋俯冲/闭合及大陆碰撞造山作用密切相关, 伴随俯冲板片脱水富集的巨量流体作用活跃运移于中、上地壳不同部位, 二叠纪—三叠纪在柴北缘构造带、东昆仑构造带均发育醒目的岩浆弧花岗岩带(潘彤, 2019); 阿尼玛卿蛇绿混杂岩带岩浆岩成岩年龄表明其活动于石炭纪—三叠纪(焦建刚等, 2013)。

在东昆仑构造带东部鄂拉山地区正处于阿尼玛卿洋向北俯冲而形成的弧后盆地环境, 西段牛苦头一带印支期陆内岩浆活动强烈, 侵入于石炭纪、奥陶纪碳酸盐岩建造。因而, 东昆仑成矿带形成海相火山岩型 Cu、Pb、Zn、Sn(Ga、Ge、Cd、Se)矿床、接触交代型 Fe、Pb、Zn(Cd)多金属矿以及陆相火山岩型 Cu、Pb、Zn(Ga、Cd)等矿产, 易于构成与岩浆作用有关的矿床成矿系列, 包括海相火山岩型、陆相火山岩型、接触交代型矿床成矿亚系列较为普遍, 矿种主要有铅、锌、铁、稀有金属、伴生稀散元素等, 柴北缘成矿带代表性矿床为沙柳泉铀钽钼矿床(李善平等, 2016; 潘彤等, 2021)。阿尼玛卿成矿带形成与洋壳裂张活动岩浆作用有关的海相火山岩型 Cu、Co(Se)矿床(段俊等, 2014; 李小虎等, 2014)成矿以二叠纪为主。

西秦岭造山带西端宗务隆地区韧性剪切带中白云母和黑云母 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 坪年龄分别为 245.8 Ma、238.5 Ma, 代表着宗务隆印支期造山活动的时限(高

万里等, 2021), 造山作用可能与宗务隆有限洋盆闭合后, 南祁连地块与欧龙布鲁克地块的斜向碰撞有关(郭安林等, 2009)。成矿年代学与成矿岩石地球化学研究表明, 三叠纪时宗务隆构造带岩浆活动处于后碰撞环境, 伟晶岩脉大量穿插发育, 形成伟晶岩型 Li-Be、Nb-Ta 矿床, 典型矿床有共和县石乃亥铌钽矿床、天峻县茶卡北山锂铍矿床(王秉璋等, 2020; Pan et al., 2021; 李善平等, 2021)。

7.3 古近纪—第四纪高原隆升与稀有金属成矿作用

自 65 Ma 印度板块与欧亚板块碰撞以来, 昆仑山、阿尔金山等柴周缘高大山脉不断隆起, 山间发育柴达木等大型断陷盆地, 在强烈的差异性构造升降运动下, 盆山耦合形成高山深湖相互依存的地形地貌特征, 山区物理风化作用强烈, 低洼湖盆则接受厚层河湖相沉积。

新近纪, 柴达木大型沉积盆地及其边缘进入发育成熟期, 周缘山脉基岩遭受风化剥蚀并由水系迁移 K、Na、Mg 等流入湖盆, 为盐类矿产成矿提供了有利物质条件。部分盐湖中硼、锂、铯等深源组分由浅部岩浆地热活动携入湖盆成矿, 例如大柴旦湖硼(锂)矿床(郑绵平, 2001), 而一里坪盐湖、东台吉乃尔盐湖、西台吉乃尔盐湖中的锂、硼等元素源自于东昆仑洪水河-那陵格勒河水系补给(朱允铸等, 1989)。

已有研究表明, 大浪滩、察汗斯拉图凹陷距今约 4 Ma 前已开始有盐类沉积。早更新世、中更新世时, 柴达木各独立次级盆地大多出现了盐湖相和干盐湖相的石盐、石膏、白钠镁矾、芒硝、泻利盐等大量盐类沉积, 各凹地普遍形成了盐矿层(魏新俊和姜继学, 1993)。更新世晚期(距今约 30 ka), 区域上发生的“华西运动”导致柴达木盆地南、北山区大幅度不均一抬升, 山前冲积平原形成机械沉积型粘土矿产, 而在大柴旦地区则沉积了丰富的石盐、芒硝、固体硼矿层。全新世时期干旱气候条件下蒸发作用剧烈, 在大柴旦、小柴旦地区沉积了丰富的硼矿层(高春亮等, 2015)。因而, 这一时期出现大量蒸发沉积型的矿产, 构成第四纪河湖相沉积有关的稀有金属矿床成矿系列。

8 找矿方向

8.1 稀土金属找矿方向

青海独立稀土金属矿床发现较少, 已知两处稀土矿床中稀土元素均为伴生矿种。上庄磷铁稀土矿床成矿时代、矿床类型及成矿作用较清晰(王进寿等, 2015; 杨合群, 2020), 稀土元素主要为轻稀土, 储量达小型规模, 矿体赋存于蛇绿混杂带(超)镁铁质岩等成矿地质条件暗示出, 在秦祁昆成矿域和特

提斯成矿域蛇绿混杂带中寻找类似的岩浆型稀土、钽矿具有较大可能(王进寿等, 2021); 相较而言, 查查香卡铀多金属矿研究程度低, 成矿年龄和矿床类型不明, 目前仅依据控矿要素较为明确的赋矿偏碱性花岗岩(钠长岩/高分异花岗岩?)和断裂构造(钟军等, 2018)判断, 成矿可能与后碰撞环境岩浆作用高分异花岗岩有关, 因而, 在柴北缘成矿带、阿尔金成矿带和东昆仑成矿带中的志留纪—泥盆纪原特提斯演化碰撞造山阶段、三叠纪古特提斯演化碰撞造山阶段的偏碱性花岗岩(钠长岩/高分异花岗岩?)出露区域, 需关注岩浆热液型稀土矿产出的可能。总体而言, 青海稀土金属矿基础地质矿产资料的缺乏给成矿规律总结和找矿预测造成较大困难。

8.2 稀有金属找矿方向

青海稀有金属分布特征随成矿单元及其成矿地质背景差异明显, 例如, 与岩浆作用有关的稀有金属矿产生于碰撞造山(潘彤等, 2022), Li 在岩浆过程中表现为中度不相容元素, 倾向于在岩浆晚期富集, 往往随着挥发分的增加而富集, 在晚期结晶的伟晶岩中往往具有高的 Li 含量, 主要形成伟晶岩型锂、铍碱金属元素和铌、钽等高场强元素矿种; 而与沉积作用有关的稀有金属矿成矿于青藏高原隆升背景, 不断抬升的高原山脉遭受强烈风化剥蚀有利于基岩中 Li 等成矿元素运移汇聚, 尤其是在含锂云母、锂辉石的花岗岩或伟晶岩风化形成的土壤中 Li 元素具有高的含量(薛颖瑜等, 2021), 这些高 Li 含量的土壤被迁移至临近的储藏构造(如封闭的盆地)成矿; 或者由中浅层构造地热温泉热液补给成矿元素(郑绵平, 2001), 叠加逐渐趋于干旱化的气候等因素, 使得新生代有利于形成以锂、铯、铷等碱金属为主的稀有金属矿种。目前, 由于花岗伟晶岩型(花岗岩型)和卤水型是全球锂矿床的主要类型, 占锂矿床总量的 84%(London, 2014, 2016, 2018; 许志琴等, 2018), 因而, 本文也将青海稀有金属找矿方向的重点集中于盐湖沉积作用矿床和伟晶岩型稀有金属矿产。

柴达木盆地为青藏高原主要赋锂盐湖群集中区域, 分布有 8 处超大型、2 处大型盐类矿床, 其中铯矿床 3 处、锂矿床 3 处。盐湖锂矿床主要为硫酸盐型(郑绵平等, 2013), 是由溶解大量锂的含盐地下水堆积而成, 矿床中的锂赋于晶间卤水、孔隙卤水及地表卤水中(潘彤等, 2022)。柴达木盆地新生代凹陷内的第四纪盐湖沉积物中, 以全新统和上更新统盐层卤水中含锂较高(潘彤等, 2022)。平面上以柴达木盆地中部一里坪—达布逊湖区一线为锂浓集中心, 构成多处大型矿床, 其它相邻盐湖中含量较低(高峰等, 2011), 一里坪、西台吉乃尔湖和东台吉乃尔

湖卤水中的锂含量最高, 该地区众多盐湖湖表卤水含 LiCl 普遍较高, 找矿前景较大(潘彤等, 2022)。此外, 在柴达木盆地西部的古近纪—新近纪背斜构造新发现深层含锂卤水, 深层卤水矿床具有锂含量高、镁锂比低、原卤矿化度低等诸多优势特点(李洪普等, 2015)。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(潘彤等, 2022)。

近年来, 在西秦岭西部宗务隆山印支期造山带发现了茶卡北山锂铍矿等多处矿床(点)(王秉璋等, 2020; 李善平等, 2021), 成矿元素除 Li、Be 外, Nb、Ta 也具有较大找矿潜力。王秉璋等(2020)认为宗务隆山构造带是青藏高原北部一条重要的锂、铍成矿带, 有望成为新的锂铍等稀有金属资源勘查基地, 出于学界对 LCT 型伟晶岩是全球最重要的 Li 元素储库之一的普遍认识, 笔者圈定宗务隆成矿带为青海今后伟晶岩型锂矿勘查的重要远景区; 而南巴颜喀拉成矿带是青藏高原“马尔康—雅江—喀喇昆仑巨型锂矿带”(许志琴等, 2018; Jiang et al., 2020)的重要组成部分, 该成矿带东侧发现的草陇锂铍矿与川西甲基卡超大型锂矿有着相似成矿地质条件(李五福等, 2021b), 拓展了青藏高原北部伟晶岩型锂铍矿的找矿空间。

8.3 稀散元素找矿方向

通常而言, 稀散金属以地壳丰度极低(多为 ppb 级), 在岩石中极为分散, 难以富集为特征, 因而有学者认为其不能形成“独立矿床”(涂光炽和高振敏, 2003), 稀散元素“稀、伴、细”的特点决定了其成矿难度很大, 成矿富集需要特殊成矿条件及控制因素。中国的镓资源主要均伴生于各类矿床中, 包括铝土矿型伴生镓矿床、铅锌矿型伴生镓矿床和煤型伴生镓矿床; 锗资源则主要来自“煤型”含锗矿床和“铅锌型”含锗矿床, 其中前者可形成独立锗矿床; 镉主要来自铅锌矿床, 而低温矿床(如 MVT 铅锌矿床)中具有最高的镉含量, 中低温的铅锌矿床易于形成 Cd 等稀散元素超常富集(温汉捷等, 2020)。铟因其特殊的地球化学性质导致其难以形成独立的矿床, 常以伴生矿产的形式产出于相对贫锡的海底(火山)热液系统, 铟矿床广泛分布于活动大洋或大陆板块边缘, 有利的构造背景为弧后环境和裂谷环境, 成因与喷流沉积岩块状硫化物矿床相关(徐净和李晓峰, 2018; 李晓峰等, 2019, 2020), 火山环境更有利于铟的富集(Ishihara et al., 2011)。越来越多的研究表明, 与铟矿化有关的块状硫化物矿床(VMS)中铟富集明显(Ishihara and Endo-Bull, 2007)。

青海在稀散元素矿产勘查中取得了较大进展, 在已探明分布于东昆仑成矿带、柴北缘成矿带的铜铅锌等有色金属矿床中, 大多数伴生 Ga、Ge、Cd、

In、Se 等稀散元素达工业综合利用品位, 元素似乎对矿床类型无特向性偏好, 而主要和主矿种元素紧密关联, 这与元素的荷载矿物特性有关, 如镓、锗在铅锌矿床中富集, 镉一般赋存在(含)锌矿物中或者钙和锰的氧化物中, 与闪锌矿作为镓、锗、镉、铟的最主要载体矿物(涂光炽和高振敏, 2003; Bauer et al., 2019)不无关系, 镉以类质同象取代锌进入闪锌矿(Cook et al., 2009), 闪锌矿中铟含量可高达 24.73%(Bauer et al., 2019), 全球具有经济价值的含锗矿物以闪锌矿为主(Höll et al., 2007)。稀散元素的超常富集与成矿规模可能随矿床类型和主矿种规模不同而有所差异, 统计表明, 海相火山岩型矿床伴生镓、锗、铟、硒规模较大, 而陆相火山岩型矿床和接触交代型矿床伴生镓、锗、铟资源量较小, 这主要可能由稀散元素的亲硫特性决定。因而, 赋矿围岩为中基性岩的矿床中稀散元素含量大于以中酸性花岗岩为含矿围岩的矿床, 同时, 主矿种规模较小则伴生稀散元素成矿规模也小。

柴北缘成矿带奥陶纪弧后扩张盆地发育海相火山-沉积成矿系统, 形成海相火山岩型铅锌(银)矿床, 其中伴生镓铟镉稀散元素发生了超常富集成矿。除锡铁山铅锌矿床外, 该成矿带中海相火山岩型铅锌矿床尚有大柴旦镇双口山铅锌矿、都兰县太子沟铜矿床等, 具有伴生稀散元素镓铟镉等的潜力。与柴北缘成矿带相比, 在长达近 900 km 的东昆仑成矿带, 成矿地质环境复杂, 海沟、弧后盆地、岩浆弧发育, 东段鄂拉山地区和西段牛苦头地区富含锌矿物的多金属矿床多达近百处, 伴生稀散元素种类丰富, 有镓、锗、镉、硒, Liu et al.(2016)在赛什塘-铜峪沟-日龙沟铜多金属矿区发现硫铜矿, 矿石中 In 含量为 $0.03 \times 10^{-6} \sim 131 \times 10^{-6}$, $\text{In}/\text{Zn} > 0.1 \sim 480$; 矿床类型多样, 有海相火山岩型、陆相火山岩型、接触交代型等, 但目前探明稀散元素储量的矿产地数量与良好的成矿条件却不匹配, 有待于进一步拓展稀散元素找矿空间。东昆仑成矿带西段牛苦头—野马泉地区矽卡岩型铁多金属矿床(赵一鸣等, 2017), 成矿与印支期中酸性侵入岩(刘建楠等, 2013)侵入于石炭系碳酸盐岩建造有关, 在牛苦头矿区 M1、M4 磁异常区铁多金属矿床伴生富集可工业综合利用的 Cd 元素。该地区铁多金属矿床矿化普遍伴生 Pb、Zn、Ag、Cu、Sn 等元素, 其中 Pb、Zn 多金属矿有望接近大型(赵一鸣等, 2017), 因而, 推测伴生的稀散元素可能具有较好远景, 可作为稀散元素矿的综合找矿关注区域。

此外, 三江北成矿省囊谦成矿带为镉资源主要分布区之一(温汉捷等, 2020), 区域内已知有多个 MVT 型铅锌矿床(点)(宋玉财等, 2015), 流体包裹体

研究表明其为低温热液矿床。刘长征等(2011)在长江源沱沱河多才玛超大型铅锌矿床一带,圈定出巨大的Cd单元素地球化学异常块体指示钼的良好找矿前景,而位于囊谦成矿带中部的然者涌大型铅锌矿床伴生Cd平均含量达 0.013×10^{-6} (安永尉等, 2020),似乎已指明了该区域MVT型铅锌矿床中Cd富集伴生成矿的可能性。因而,通过对青海稀疏元素矿产的成矿作用分析,本文认为柴北缘成矿带、东昆仑成矿带和囊谦成矿带稀疏元素成矿条件优越,可作为进一步勘查的区域。

另外,随着对“煤型”含锆矿床研究的不断深入,学者观察到作为锆资源大国的中国“煤型”含锆矿床十分发育,在已有的富锆煤矿中,锆主要富集于煤化程度较低的长焰煤和褐煤中(王婷灏等, 2016)。李瑞琼(2018)在木里煤田西部的外力哈达矿区曲古沟井田以及海塔尔矿区,圈定了Ga含量超过边界品位的部分区域,镓主要富集于煤层顶、底板及夹矸中,含矿地层为中侏罗统碎屑岩地层, Ga元素富集主要受控于陆源区母岩性质、植物种类、沉积相、古气候条件和物源运移形式等因素,与主量元素Al呈正相关性,可能为周缘山脉富Al的基岩风化产物运移至成煤盆地与沉积物腐殖酸发生生物化学反应聚沉,使得煤层中Ga超常富集(陈磊, 2019)。祁连成矿省和柴达木成矿省侏罗纪为重要成煤期,尤其在柴北缘成矿带鱼卡、大煤沟等地含煤地层广泛出露,周缘山系(过)铝质花岗岩风化强烈。因而,可以推测柴北缘成矿带含煤地层分布区可能存有Ga元素富集成矿,形成生物化学沉积型锆矿,可作为今后值得关注的找矿方向。

9 结论

青海“三稀”矿产资源主要为稀有金属矿和伴生稀疏元素矿,近年来在西秦岭成矿带宗务隆山地区取得了印支期伟晶岩型锂、铍矿,以及柴达木成矿带新生代深层卤水化学沉积型锂找矿的较好进展,但总体矿床学特征研究程度偏低。通过本次对青海“三稀”矿产成矿系列、成矿规律与找矿方向研究,获得如下认识:

(1)稀土矿床分布于拉脊山成矿带和柴北缘成矿带,类型仅有岩浆型(轻稀土)和岩浆热液型(轻稀土),成矿于早古生代奥陶纪和志留纪。在柴北缘成矿带、阿尔金成矿带和东昆仑成矿带偏碱性花岗岩(钠长岩/高分异花岗岩?)出露区域,具有寻找岩浆热液型稀土矿的可能。

(2)稀有金属矿床主要出露于西秦岭成矿带和柴达木成矿带,类型有岩浆型(铌、钽)、伟晶岩型(锂、铍、铌、钽)、岩浆热液型(铌、钽)、蒸发沉积

型(锂)和化学沉积型(铌),岩浆作用矿床成矿于三叠纪,沉积作用矿床成矿于新近纪和第四纪。西秦岭成矿带、柴北缘成矿带和东昆仑成矿带为伟晶岩型锂、铍、铌、钽、铷稀有金属找矿远景区,柴达木成矿带为蒸发沉积型和化学沉积型锂、铌、铷找矿远景区。

(3)稀疏元素矿床均为伴生矿,广泛分布于北祁连成矿带、柴北缘成矿带、东昆仑成矿带、西秦岭成矿带和阿尼玛卿成矿带,已知成矿元素有Ga、Ge、Cd、In、Se、Te等,矿床类型包括海相火山岩型、接触交代型和陆相火山岩型,成矿时代相对集中于奥陶纪、二叠纪和三叠纪。柴北缘成矿带、东昆仑成矿带牛苦头—野马泉砂卡岩型有色金属矿集区、囊谦成矿带稀疏元素成矿条件优越,可作为进一步勘查的重点方向,另外,不应忽视柴北缘成矿带与含煤地层有关的生物化学沉积型(“煤型”)稀疏元素矿的调查。

(4)依据矿床时空分布特征、成矿作用及成矿地质背景,将青海“三稀”矿产划分为10个成矿系列、18个矿床成矿亚系列、20个矿床式。

致谢:本文为《中国矿产地质志·青海卷》的部分研究成果,成文过程中得到中国地质科学院王登红研究员和黄凡博士的悉心指导帮助,在此致以诚挚谢意!

Acknowledgements:

This study was supported by Qinghai Province (Nos. 2021-ZJ-741 and QHS201802), and China Geological Survey (Nos. DD20221695, DD20190379 and DD20160346).

参考文献:

- 安永尉,周鹏,马鸿颖,喇品贤,李玉龙,马永成,王进寿. 2020. 青海三江成矿带然者涌铅锌银矿床地质特征及找矿方向[J]. 矿产勘查, 11(11): 2380-2390.
- 曾小华,周宗桂. 2014. 青海省兴海县铜峪沟铜矿床成矿物质和流体来源的地球化学探讨[J]. 现代地质, 28(2): 348-358.
- 陈国超,裴先治,李瑞保,李佐臣,刘成军,陈有炘,裴磊,李小兵. 2018. 东昆仑东段可日正长花岗岩年龄和岩石成因对东昆仑中三叠世构造演化的制约[J]. 岩石学报, 34(3): 567-585.
- 陈国超,裴先治,李瑞保,李佐臣,裴磊,刘成军,陈有炘,王盟,高峰,李小兵. 2019. 东昆仑古特提斯后碰撞阶段伸展作用:来自晚三叠世岩浆岩的证据[J]. 地学前缘, 26(4): 191-208.
- 陈磊. 2019. 煤中镓元素的赋存特征与富集机理—以青海木里和新疆准东煤田为例[D]. 成都:成都理工大学: 1-93.
- 陈擎,赵如意,康利刚,叶雷刚,刘林,王继斌,鲁宝龙. 2021. 青海查香卡铀多金属矿床钠长岩脉地质特征及其对矿床

- 成因的约束[J]. 矿床地质, 40(5): 1029-1044.
- 陈毓川, 裴荣富, 王登红, 黄凡. 2016. 矿床成矿系列——五论矿床的成矿系列问题[J]. 地球学报, 37(5): 519-527.
- 陈毓川, 裴荣富, 王登红, 黄凡. 2020. 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, 39(5): 745-753.
- 陈毓川, 裴荣富, 王登红, 王平安. 2015. 论矿床的自然分类——四论矿床的成矿系列问题[J]. 矿床地质, 34(6): 1092-1106.
- 陈毓川, 裴荣富, 王登红. 2006. 三论矿床的成矿系列问题[J]. 地质学报, 80(10): 1501-1508.
- 陈毓川. 1994. 矿床的成矿系列[J]. 地学前缘, 1(3-4): 90-94.
- 陈毓川. 1997. 矿床的成矿系列研究现状与趋势[J]. 地质与勘探, 33(1): 21-25.
- 程裕淇, 陈毓川, 赵一鸣, 宋天锐. 1983. 再论矿床的成矿系列问题——兼论中生代某些矿床的成矿系列[J]. 地质论评, 29(2): 127-139.
- 程裕淇, 陈毓川, 赵一鸣. 1979. 初论矿床的成矿系列问题[J]. 地球学报, 1(1): 32-58.
- 戴荔果. 2019. 青海省滩间山—锡铁山地区金铅锌成矿系统[D]. 武汉: 中国地质大学: 1-126.
- 翟明国, 吴福元, 胡瑞忠, 蒋少涌, 李文昌, 王汝成, 王登红, 齐涛, 秦克章, 温汉捷. 2019. 战略性关键金属矿产资源: 现状与问题[J]. 中国科学基金, (2): 106-111.
- 丁烁, 黄慧, 牛耀龄, 赵志丹, 喻学惠, 莫宣学. 2011. 东昆仑高Nb-Ta 流纹岩的年代学、地球化学及成因[J]. 岩石学报, 27(12): 3603-3614.
- 段俊, 钱壮志, 黄喜峰, 董富权, 赵晓健, 鲁浩. 2014. 青海德尔尼铜(钴)矿床矿石矿物特征及其地质意义[J]. 地球科学与环境学报, 36(1): 201-209.
- 冯志兴, 陈正乐, 李正明, 展卫露, 石永红, 陈柏林, 江万, 刘博, 李季霖, 谭人文. 2020. 柴北缘锡铁山铅锌矿床控矿构造特征及找矿预测[J]. 地质力学学报, 26(3): 329-344.
- 付建刚, 梁新权, 王策, 蒋英, 周云, 潘传楚, 钟永生, 杨永强, 王泽利. 2014. 柴北缘锡铁山滩间山群c 岩性组的时代归属及其物源特征[J]. 地质学报, 88(6): 1081-1092.
- 付长奎, 闫臻, 郭现轻, 牛漫兰, 陈雷, 夏文静. 2016. 西秦岭与赛什塘铜矿床有关的花岗质岩石岩浆源区特征及大地构造背景探讨[J]. 岩石学报, 32(7): 1997-2014.
- 高春亮, 余俊清, 闵秀云, 成艾颖, 何先虎, 辛首臻, 洪荣昌, 刘永, 张丽莎. 2015. 柴达木盆地大柴旦矿床地质特征及成矿机理[J]. 地质学报, 89(3): 659-670.
- 高峰, 郑绵平, 乜贞, 刘建华, 宋彭生. 2011. 盐湖卤水锂资源及其开发进展[J]. 地球学报, 32(4): 483-492.
- 高万里, 王宗秀, 李磊磊, 钱涛, 崔明明. 2021. 青藏高原东北缘宗务隆韧性剪切带 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学及对印支期造山时限的制约[J]. 中国地质, 48(1): 149-160.
- 郭安林, 张国伟, 强娟, 孙延贵, 李广, 姚安平. 2009. 青藏高原东北缘印支期宗务隆造山带[J]. 岩石学报, 25(1): 1-12.
- 韩佳君. 2013. 柴达木盆地西部地下卤水起源演化与资源量评价[D]. 北京: 中国地质大学.
- 侯增谦, 陈骏, 翟明国. 2020. 战略性关键矿产研究现状与科学前沿[J]. 科学通报, 65(33): 3651-3652.
- 胡宇飞, 汪明泉, 赵艳军, 焦鹏程. 2021. 柴达木盆地一里坪盐湖成盐卤水成分变化及其意义——来自 LA-ICP-MS 分析石盐流体包裹体组成的证据[J]. 地质学报, 95(7): 2109-2120.
- 焦建刚, 鲁浩, 孙亚莉, 黄喜峰, 段俊. 2013. 青海德尔尼铜(钴)矿床 Re-Os 年龄及地质意义[J]. 现代地质, 27(3): 577-584.
- 雷勇亮, 戴佳文, 白强, 王凯兴, 孙立强, 刘晓东, 余驰达, 何世伟. 2021. 东昆仑造山带海拉乌拉铝质 A 型流纹岩成因及其意义[J]. 岩石学报, 37(7): 1964-1982.
- 李东生, 奎明娟, 古凤宝, 王建军, 柏红喜, 詹发余, 王发明, 马彦青. 2009. 青海赛什塘铜矿床的地质特征及成因探讨[J]. 地质学报, 83(5): 719-730.
- 李洪普, 郑绵平, 侯献华, 闫立娟. 2015. 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, 36(1): 41-50.
- 李鹏. 2019. 青海省锡铁山铅锌矿成矿控制因素矿化富集规律及找矿潜力评价[D]. 武汉: 中国地质大学: 1-153.
- 李瑞琼. 2018. 木里煤田镓元素富集规律研究[D]. 西安: 西安科技大学: 1-51.
- 李善平, 潘彤, 王秉璋, 严兴鹏, 任华, 余福承, 邱伟, 王建军, 唐健, 王进寿, 金婷婷. 2021. 柴达木盆地北缘锑墨格山含绿柱石花岗伟晶岩特征及构造意义[J]. 大地构造与成矿学, 45(3): 608-619.
- 李善平, 湛守智, 金婷婷, 陈静, 任华, 邱伟. 2016. 青海沙柳泉铌钽矿床伟晶岩稀土元素地球化学特征及物源分析[J]. 稀土, 37(1): 39-46.
- 李童斐, 夏庆霖, 汪新庆, 刘岳, 常力恒, 冷帅. 2018. 中国稀土矿资源成矿地质特征与资源潜力分析[J]. 地学前缘, 25(3): 95-106.
- 李文昌, 李建威, 谢桂青, 张向飞, 刘洪. 2022. 中国关键矿产现状、研究内容与资源战略分析[J]. 地学前缘, 29(1): 1-13.
- 李五福, 李善平, 王秉璋, 王春涛, 刘金恒, 张新远, 曹锦山, 许传兵, 刘建栋, 金婷婷. 2021a. 青海三江北段草陵(绿柱石-) 锂辉石花岗伟晶岩的发现及其 Li-Be 找矿意义[J]. 大地构造与成矿学. <https://doi.org/10.16539/j.ddgzyckx.2021.05.021>.
- 李五福, 王涛, 王秉璋, 张新远, 谭运鸿, 袁博武, 王春涛, 韩晓龙, 金婷婷, 郑英, 曹锦山, 王泰山, 张焜, 付长奎, 陈健, 刘建栋, 李青, 张启龙, 陈丽娟. 2021b. 东昆仑大格勒地区稀有和稀土矿化碱性杂岩体的发现及意义[J]. 大地构造与成矿. <https://doi.org/10.16539/j.ddgzyckx.2021.06.010>.
- 李小虎, 初凤友, 雷吉江, 余星, 张平萍. 2014. 青海德尔尼铜(钴)矿床硫化物 Cu 同位素组成及矿床成因探讨[J]. 地学前缘, 21(1): 196-204.
- 李晓峰, 徐净, 朱艺婷, 吕友虎. 2019. 关键矿产资源纲: 主要成矿类型及关键科学问题[J]. 岩石学报, 35(11): 3292-3302.
- 李晓峰, 朱艺婷, 徐净. 2020. 关键矿产资源纲研究进展[J]. 科学通报, 65(33): 3678-3687.
- 李义伟, 陈杰, 李惠文. 1989. 青海老藏沟多金属矿区火山岩岩石化学特征[J]. 成都地质学院学报, 16(2): 46-56.
- 刘建楠, 丰成友, 赵一鸣, 李大新, 肖晔, 周建厚, 马永寿. 2013.

- 青海野马泉砂卡岩铁锌多金属矿区侵入岩、交代岩及矿化蚀变特征[J]. 矿床地质, 32(1): 77-93.
- 刘勇, 李廷栋, 肖庆辉, 张克信, 朱小辉, 丁孝忠. 2022. 洋板块地质研究进展[J]. 地学前缘, 29(2): 79-93.
- 刘云华, 莫宣学, 喻学惠, 张雪亭, 许国武. 2006. 东昆仑野马泉地区景忍花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义[J]. 岩石学报, 22(10): 2457-2463.
- 刘长征, 陈岳龙, 许光, 赵娟, 李玥, 李琳业, 姬丙艳, 汪元奎. 2011. 地球化学块体理论在青海沱沱河地区铅锌资源潜力预测中的应用[J]. 地学前缘, 18(5): 271-282.
- 罗明非, 莫宣学, 喻学惠, 李小伟, 黄雄飞, 于峻川. 2014. 东昆仑香山德地区晚三叠世花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、岩石成因和构造意义[J]. 岩石学报, 30(11): 3229-3241.
- 聂鑫, 贾琇明, 张雪亭. 2014. 青海索拉沟铜多金属矿床地球化学特征及矿床成因讨论[J]. 中国煤炭地质, 26(12): 74-80.
- 潘桂棠, 陆松年, 肖庆辉, 张克信, 尹福光, 郝国杰, 骆满生, 任飞, 袁四化. 2016. 中国大地构造阶段划分和演化[J]. 地学前缘, 23(6): 10-23.
- 潘桂棠, 王立全, 尹福光, 耿全如, 李光明, 朱弟成. 2022. 青藏高原形成演化研究回顾、进展与展望[J]. 沉积与特提斯地质, 42(2): 151-175.
- 潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年, 邓晋福, 冯益民, 张克信, 张智勇, 王方国, 邢光福, 郝国杰, 冯艳芳. 2009. 中国大地构造单元划分[J]. 中国地质, 36(1): 1-28.
- 潘彤, 李善平, 任华, 王秉璋, 李五福, 王春涛, 金婷婷. 2020. 柴达木盆地北缘锂多金属矿成矿条件及找矿潜力[J]. 矿产勘查, 11(6): 1101-1116.
- 潘彤, 李善平, 王涛, 韩光, 贾建团. 2022. 青海锂矿成矿特征及找矿潜力[J]. 地质学报, 96(5): 1827-1854.
- 潘彤, 薛万文, 王贵仁, 王福德. 2021. 青海矿产地质[M]. 北京: 地质出版社: 151-205.
- 潘彤. 2017. 青海成矿单元划分[J]. 地球科学与环境学报, 39(1): 16-33.
- 潘彤. 2019. 青海矿床成矿系列探讨[J]. 地球科学与环境学报, 41(3): 297-315.
- 乔建峰. 2018. 青海省交通社铈、钼矿床地质地球化学特征及成因探讨[D]. 长春: 吉林大学: 6-44.
- 青海省国土资源厅. 2016. 青海省 2015 年度矿产资源储量统计工作报告[R]. 西宁: 青海省国土资源厅: 10-56.
- 青海省区调队. 1987. 青海省 J48E024001 上加幅、J48E024002 化隆回族自治县幅 1/5 万区域地质调查报告[R]. 西宁: 青海省区调队.
- 荣晓, 胡永兴, 陈擎, 康利刚, 王继斌, 叶雷刚, 陈斌, 张胜龙. 2022. 柴北缘查查香卡铀-钼-稀土矿区闪长岩年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. 铀矿地质, 38(2): 207-220.
- 史仁灯, 杨经绥, 吴才来, IIZUKA T, HIRATA T. 2004. 柴达木北缘超高压变质带中的岛弧火山岩[J]. 地质学报, 78(1): 52-64.
- 宋述光, 王梦珏, 王潮, 牛耀龄. 2015. 大陆造山带碰撞-俯冲-折返-垮塌过程的岩浆作用及大陆地壳净生长[J]. 中国科学: 地球科学, 45(7): 916-940.
- 宋述光, 吴珍珠, 杨立明, 苏犁, 夏小洪, 王潮, 董金龙, 周辰傲, 毕衡哲. 2019. 祁连山蛇绿岩带和原特提斯洋演化[J]. 岩石学报, 35(10): 2948-2970.
- 宋述光, 张贵宾, 张聪, 张立飞, 魏春景. 2013. 大洋俯冲和大陆碰撞的动力学过程: 北祁连-柴北缘高压-超高压变质带的岩石学制约[J]. 科学通报, 58(23): 2240-2245.
- 宋玉财, 侯增谦, 王贵仁, 李连松, 杨天南, 张洪瑞, 刘燕学, 杨竹森, 田世洪, 刘英超, 贾宗涌, 汪元奎, 刘群, 闫明, 何利. 2015. “三江”北段沱沱河地区的成矿规律与找矿方向[J]. 矿床地质, 34(1): 1-20.
- 孙华山, 赵立军, 吴冠斌, 宁钧陶, 陈巧妹, 姜楚灵. 2012. 锡铁山块状硫化物铅锌矿床成矿构造环境及矿区南部找矿潜力: 来自滩间山群火山岩岩石化学、地球化学证据[J]. 岩石学报, 28(2): 652-664.
- 孙朋飞. 2017. 青海省苦海-赛什塘地区容矿地层碎屑锆石及其地质意义[D]. 北京: 中国地质大学: 1-49.
- 涂光炽, 高振敏. 2003. 分散元素成矿机制研究获重大进展[J]. 中国科学院院刊, (5): 358-361.
- 王秉璋, 韩杰, 谢祥镭, 陈静, 王涛, 薛万文, 白宗海, 李善平. 2020. 青藏高原东北缘茶卡北山印支期(含绿柱石)锂辉石伟晶岩脉群的发现及 Li-Be 成矿意义[J]. 大地构造与成矿学, 44(1): 69-79.
- 王登红, 王瑞江, 李建康, 赵芝, 于扬, 代晶晶, 陈郑辉, 李德先, 屈文俊, 邓茂春, 付小方, 孙艳, 郑国栋. 2013. 中国三稀矿产资源战略调查研究进展综述[J]. 中国地质, 40(2): 361-370.
- 王登红, 徐志刚, 盛继福, 朱明玉, 徐珏, 袁忠信, 白鸽, 屈文俊, 李华芹, 陈郑辉, 王成辉, 黄凡, 张长青, 王永磊, 应立娟, 李厚民, 高兰, 孙涛, 付勇, 李建康, 武广, 唐菊兴, 丰成友, 赵正, 张大权. 2014. 全国重要矿产和区域成矿规律研究进展综述[J]. 地质学报, 88(12): 2176-2191.
- 王国强, 李向民, 徐学义, 余吉远, 孙吉明, 武鹏. 2011. 青海门源地区红沟铜矿床含矿基性火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄[J]. 地质通报, 30(7): 1060-1065.
- 王辉. 2016. 青海赛什塘铜矿成岩成矿作用与构造背景[D]. 北京: 中国地质科学院.
- 王进寿, 安永尉, 付彦文, 黄青华, 李善平, 严兴鹏. 2021. 青海省钽资源概况、瓶颈问题及应对策略刍议[J]. 青海科技, 28(6): 45-50.
- 王进寿, 潘彤, 李鹏, 田永革, 安永蔚, 余福承, 雷晓清. 2022. 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, 44(3): 391-412.
- 王进寿, 郑有业, 吴正寿, 李杰, 唐健. 2015. 青海拉脊山构造带钽矿床的发现[J]. 矿物学报, (Z1): 937.
- 王婷灏, 黄文辉, 闫德宇, 唐修义. 2016. 中国大型煤-锆矿床成矿模式研究进展: 以云南临沧和内蒙古乌兰图嘎煤-锆矿床为例[J]. 地学前缘, 23(3): 113-123.
- 王新雨, 祝新友, 李加多, 王玉往, 蒋斌斌, 吴锦荣, 黄行凯, 赵子烨. 2021. 青海牛苦头矿区两期岩浆岩及其砂卡岩型成矿作用[J]. 岩石学报, 37(5): 1567-1586.
- 王新雨, 祝新友, 李加多, 王玉往, 龙灵利, 李顺庭, 吴锦荣, 程细音, 蒋斌斌. 2020. 青海牛苦头矿区锰质黑柱石成因及其地质意义[J]. 地质学报, 94(8): 2279-2290.

- 卫岗, 王移生. 2010. 青海省兴海县日龙沟—赛什塘一带地质构造格架及其意义[J]. 西北地质, 43(3): 36-40.
- 魏俊浩, 李鹏, 李义邦, 陈丁杰, 王海丰, 钟永生, 冯志兴. 2021. 青海省锡铁山铅锌矿成矿元素物质场结构及深部找矿潜力[J]. 地质科技通报, 40(2): 1-12.
- 魏新俊, 姜继学. 1993. 柴达木盆地第四纪盐湖演化[J]. 地质学报, 67(3): 255-265.
- 温汉捷, 朱传威, 杜胜江, 范裕, 罗重光. 2020. 中国镓锗铊镉资源[J]. 科学通报, 65(33): 3688-3699.
- 吴才来, 徐学义, 高前明, 李向民, 雷敏, 郜源红, FROST R B, WOODEN J L. 2010. 北祁连早古生代花岗岩浆作用及构造演化[J]. 岩石学报, 26(4): 1027-1044.
- 吴福元, 万博, 赵亮, 肖文交, 朱日祥. 2020. 特提斯地球动力学[J]. 岩石学报, 36(6): 1627-1674.
- 夏林圻, 李向民, 余吉远, 王国强. 2016. 祁连山新元古代中—晚期至早古生代火山作用与构造演化[J]. 中国地质, 43(4): 1087-1138.
- 徐净, 李晓峰. 2018. 铜矿床时空分布、成矿背景及其成矿过程[J]. 岩石学报, 34(12): 3611-3626.
- 徐志刚, 陈毓川, 王登红, 陈郑辉, 李厚民. 2008. 中国成矿区带划分方案[M]. 北京: 地质出版社: 1-138.
- 许冲, 孙华山, 宋长顺, 唐亮, 黄志伟, 葛风建, 欧阳淑冰, 罗光杰, 张伟. 2022. 青海锡铁山矿区滩间山群 a-2 岩段与 d-2 岩段变质岩原岩恢复及对比[J]. 矿物学报, 42(2): 176-192.
- 许志琴, 王汝成, 赵中宝, 付小方. 2018. 试论中国大陆“硬岩型”大型锂矿带的构造背景[J]. 地质学报, 92(6): 1091-1106.
- 薛颖瑜, 刘海洋, 孙卫东. 2021. 锂的地球化学性质与富集机理[J]. 大地构造与成矿学, 45(6): 1202-1215.
- 杨合群. 2020. 青海上庄岩浆型磷矿[J]. 西北地质, 53(3): 209.
- 杨生德, 潘彤. 2013. 青海省矿产资源潜力评价研究报告[R]. 西宁: 青海省地质矿产勘查开发局: 1-216.
- 姚希柱, 杨涛, 朱志勇, 党奔, 丰志杰, 吴昌志. 2019. 黄铁矿 LA-ICP-MS 微量元素特征: 对青海锡铁山矿床成因的启示[J]. 高校地质学报, 25(6): 888-900.
- 余俊清, 洪荣昌, 高春亮, 成艾颖, 张丽莎. 2018. 柴达木盆地盐湖锂矿床成矿过程及分布规律[J]. 盐湖研究, 26(1): 7-14.
- 张洪美, 李海平, 冯乔, 焦鑫, 薛成. 2011. 柴达木盆地东南缘晚三叠世火山岩地球化学特征及构造环境分析[J]. 西北地质, 44(4): 15-22.
- 张建新, 于胜尧, 李云帅, 喻星星, 林宜慧, 毛小红. 2015. 原特提斯洋的俯冲、增生及闭合: 阿尔金-祁连-柴北缘造山系早古生代增生/碰撞造山作用[J]. 岩石学报, 31(12): 3531-3554.
- 张孝攀, 王权峰, 惠洁, 常鑫, 童海奎. 2015. 柴北缘滩间山群火山岩岩石化学特征及构造环境[J]. 矿物岩石, 35(1): 18-26.
- 张雪亭, 陈喜峰, 姚远, 郑杰, 吴华英. 2014. 青海索拉沟铜多金属矿含矿围岩主要特征[J]. 地质与勘探, 50(4): 659-665.
- 张照伟, 李文渊, 王亚磊, 高永宝. 2015. 南祁连化隆地区下什堂含铜镍矿基性-超基性岩体成因研究: 锆石年代学、地球化学和 Sr-Nd 同位素约束[J]. 岩石学报, 31(9): 2539-2548.
- 赵一鸣, 丰成友, 李大新. 2017. 中国矽卡岩矿床找矿新进展和时空分布规律[J]. 矿床地质, 36(3): 519-543.
- 郑绵平, 向军, 魏新俊, 郑元. 1989. 青藏高原盐湖[M]. 北京: 北京科学技术出版社: 306-329.
- 郑绵平, 张雪飞, 侯献华, 王海雷, 李洪普, 施林峰. 2013. 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, 34(2): 129-138.
- 郑绵平. 2001. 论中国盐湖[J]. 矿床地质, 20(2): 181-189.
- 中国矿产地质志项目办公室, 中国地质科学院矿产资源研究所. 2016. 中国矿产地质志省级地质志编编技术要求[R]. 北京: 中国地质科学院矿产资源研究所.
- 钟军, 陈擎, 范洪海, 史长昊. 2018. 柴北缘查查卡铀-钍-铀-稀土矿床地质特征及矿床成因: 一种与钠长岩相关的新矿化类型[J]. 地学前缘, 25(5): 222-236.
- 周红智. 2019. 青海省鄂拉山地区印支期岩浆演化及铜多金属成矿作用[D]. 武汉: 中国地质大学.
- 朱允铸, 李文生, 吴必豪, 刘成林. 1989. 青海省柴达木盆地一里坪和东、西台吉乃尔湖地质新认识[J]. 地质评论, 35(6): 558-565.

References:

- AN Yong-wei, ZHOU Peng, MA Hong-ying, LA Pin-xian, LI Yu-long, MA Yong-cheng, WANG Jin-shou. 2020. Geological characteristics and prospecting direction of the Ranzheyong lead-zinc-silver deposit in Sanjiang metallogenic belt, Qinghai Province[J]. Mineral Exploration, 11(11): 2380-2390(in Chinese with English abstract).
- BAUER M E, SEIFERT T, BURISCH M, KRAUSE J, RICHTER N, GUTZMER J. 2019. Indium-bearing sulfides from the Hämmerlein skarn deposit, Erzgebirge, Germany: evidence for late-stage diffusion of indium into sphalerite[J]. Mineralium Deposita, 54: 175-192.
- ČERNÝ P, ERCIT T S. 2005. The classification of granitic pegmatites revisited[J]. The Canadian Mineralogist, 43(6): 2005-2026.
- ČERNÝ P. 1991. Fertile granites of Precambrian rare-element pegmatite fields: is geochemistry controlled by tectonic setting or source lithologies?[J]. Precambrian Research, 51(1-4): 429-468.
- CHEN Guo-chao, PEI Xian-zhi, LI Rui-bao, LI Zuo-chen, LIU Cheng-jun, CHEN You-xin, PEI Lei, LI Xiao-bing. 2018. Age and lithogenesis of Keri syenogranite from eastern part of East Kunlun Orogenic Belt: Constraint on the Middle Triassic tectonic evolution of East Kunlun[J]. Acta Petrologica Sinica, 34(3): 567-585(in Chinese with English abstract).
- CHEN Guo-chao, PEI Xian-zhi, LI Rui-bao, LI Zuo-chen, PEI Lei, LIU Cheng-jun, CHEN You-xin, WANG Meng, GAO Feng, LI Xiao-bing. 2019. Lithospheric extension of the post-collision stage of the Paleo-Tethys oceanic system in the East Kunlun Orogenic Belt: insights from Late Triassic plutons[J]. Earth Science Frontiers, 26(4): 191-208(in Chinese with English abstract).
- CHEN Lei. 2019. Occurrence characteristics and enrichment

- mechanism of germanium and gallium in coal-A case of Muli Coalfield in Qinghai and Zhundong Coalfield in Xinjiang[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology: 1-93(in Chinese with English abstract).
- CHEN Qing, ZHAO Ru-yi, KANG Li-gang, YE Lei-gang, LIU Lin, WANG Ji-bin, LU Bao-long. 2021. Geological characteristics of albitite dikes and its constraint on genesis of Chachaxiangka U-polymetallic deposit in Qinghai Province[J]. Mineral Deposits, 40(5): 1029-1044(in Chinese with English abstract).
- CHEN Yu-chuan, PEI Rong-fu, WANG Deng-hong, HUANG Fan. 2016. Minerogenetic series for mineral deposits: Discussion on minerogenetic series(V)[J]. Acta Geoscientica Sinica, 37(5): 519-527(in Chinese with English abstract).
- CHEN Yu-chuan, PEI Rong-fu, WANG Deng-hong, HUANG Fan. 2020. Four-dimensional metallogeny in earth system and study trends of mineral deposits: A discussion on minerogenetic series(VII)[J]. Mineral Deposits, 39(5): 745-753(in Chinese with English abstract).
- CHEN Yu-chuan, PEI Rong-fu, WANG Deng-hong, WANG Ping-an. 2015. Natural classification of mineral deposits: Discussion on minerogenetic series of mineral deposits(IV)[J]. Mineral Deposits, 34(6): 1092-1106(in Chinese with English abstract).
- CHEN Yu-chuan, PEI Rong-fu, WANG Deng-hong. 2006. On minerogenetic (metallogenetic) series: Third discussion[J]. Acta Geologica Sinica, 80(10): 1501-1508(in Chinese with English abstract).
- CHEN Yu-chuan. 1994. Metallogenic series of ore deposits[J]. Earth Science Frontiers, 1(3-4): 90-94(in Chinese with English abstract).
- CHEN Yu-chuan. 1997. Present situation and trend of research on metallogenic series of ore deposits[J]. Geology and Prospecting, 33(1): 21-25(in Chinese with English abstract).
- CHENG Yu-qi, CHEN Yu-chuan, ZHAO Yi-ming, SONG Tian-rui. 1983. Further discussion on the problems of minerogenetic series of mineral deposits[J]. Geological Review, 29(2): 127-139(in Chinese with English abstract).
- CHENG Yu-qi, CHEN Yu-chuan, ZHAO Yi-ming. 1979. Preliminary discussion on the problems of minerogenetic series of mineral deposits[J]. Acta Geoscientica Sinica, 1(1): 32-58(in Chinese with English abstract).
- CHINA Mineral Geology Project Office, Institute of Mineral Resources Chinese Academy of Geological Sciences. 2016. Technical requirements for the compilation of provincial geological records of mineral geology of China[R]. Beijing: Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese).
- COOK N J, CIOBANU C L, PRING A, SKINNER W, SHIMIZU M, DANYUSHEVSKY L, SAINI-EIDUKAT B, MELCHER F. 2009. Trace and minor elements in sphalerite: A LA-ICPMS study[J]. Geochimica Cosmochimica Acta, 73(16): 4761-4791.
- DAI Li-guo. 2019. Metallogenic system of Au-Pb-Zn deposit in Tanjianshan-Xitieshan area in Qinghai Province[D]. Wuhan: China University of Geosciences: 1-126(in Chinese with English abstract).
- DING Shuo, HUANG Hui, NIU Yao-ling, ZHAO Zhi-dan, YU Xue-hui, MO Xuan-xue. 2011. Geochemistry, geochronology and petrogenesis of East Kunlun high Nb-Ta rhyolites[J]. Acta Petrologica Sinica, 27(12): 3603-3614(in Chinese with English abstract).
- DUAN Jun, QIAN Zhuang-zhi, HUANG Xi-feng, DONG Fu-quan, ZHAO Xiao-jian, LU Hao. 2014. Characteristics of ore minerals of De'erni Cu (Co) deposit in Qinghai and their geological significance[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 36(1): 201-209(in Chinese with English abstract).
- FENG Zhi-xing, CHEN Zheng-le, LI Zheng-ming, ZHAN Wei-lu, SHI Yong-hong, CHEN Bai-lin, JIANG Wan, LIU Bo, LI Ji-lin, TAN Ren-wen. 2020. Characteristics of ore-controlling structures and ore-prospecting of the Xitieshan lead-zinc deposit, northern edge of the Qaidam basin, NW China[J]. Journal of Geomechanics, 26(3): 329-344(in Chinese with English abstract).
- FU Chang-lei, YAN Zhen, GUO Xian-qing, NIU Man-lan, CHEN Lei, XIA Wen-jing. 2016. Magma source and tectonic setting of the granitoids associated with Saishitang Cu deposit in the West Qinling terrane[J]. Acta Petrologica Sinica, 32(7): 1997-2014(in Chinese with English abstract).
- FU Jian-gang, LIANG Xin-quan, WANG Ce, JIANG Ying, ZHOU Yun, PAN Chuan-chu, ZHONG Yong-sheng, YANG Yong-qiang, WANG Ze-li. 2014. Timing and characteristic of provenance of the c formation in the Tanjianshan group, Xitieshan, North Qaidam[J]. Acta Geologica Sinica, 88(6): 1081-1092(in Chinese with English abstract).
- GAO Chun-liang, YU Jun-qiang, MIN Xiu-yun, CHENG Ai-ying, HE Xian-hu, XIN Shou-zhen, HONG Rong-chang, LIU Yong, ZHANG Li-sha. 2015. Geological characteristics and minerogenetic mechanism of the borate deposit of Da Qaidam Salt Lake in Qaidam Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 89(3): 659-670(in Chinese with English abstract).
- GAO Feng, ZHENG Mian-ping, NIE Zhen, LIU Jian-hua, SONG Peng-sheng. 2011. Brine lithium resource in the salt lake and advances in its exploitation[J]. Acta Geoscientica Sinica, 32(4): 483-492(in Chinese with English abstract).
- GAO Wan-li, WANG Zong-xiu, LI Lei-lei, QIAN Tao, CUI Ming-ming. 2021. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ laser dating of the Zongwulong ductile shear zone in northeastern Tibetan Plateau: Constraints on the time of Indosinian orogeny[J]. Geology in China, 48(1): 149-160(in Chinese with English abstract).
- GULLEY A L, NASSAR N T, XUN S. 2018. China, the United States, and competition for resources that enable emerging technologies[J]. PNAS, 115(16): 4111-4115.
- GUO An-lin, ZHANG Guo-wei, QIANG Juan, SUN Yan-gui, LI

- Guang, YAO An-ping. 2009. Indosinian Zongwulong orogenic belt on the northeastern margin of the Qinghai-Tibet plateau[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(1): 1-12(in Chinese with English abstract).
- HAN Jia-jun. 2013. Hydrochemical characteristics, origin, evolution and resources of the subsurface brines in western Qaidam Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).
- HÖLL R, KLING M, SCHROLL E. 2007. Metallogenesis of germanium—A review[J]. *Ore Geology Reviews*, 30(3-4): 145-180.
- HOU Zeng-qian, CHEN Jun, ZHAI Ming-guo. 2020. Current status and frontiers of research on critical mineral resources[J]. *Chinese Science Bulletin*, 65(33): 3651-3652(in Chinese).
- HU Yu-fei, WANG Ming-quan, ZHAO Yan-jun, JIAO Peng-cheng. 2021. The variations of brine composition and its significance in the Yiliping area of the Qaidam basin—evidence from fluid inclusions in halite analysed by LA-ICP-MS[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(7): 2109-2120(in Chinese with English abstract).
- ISHIHARA S, ENDO Y. 2007. Indium and other trace elements in volcanogenic massive sulfide ores from the Kuroko, Besshi and other types in Japan[J]. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, 58(1-2): 7-22.
- ISHIHARA S, MURAKAMI H, LI Xiao-feng. 2011. Indium concentration in zinc ores in plutonic and volcanic environments: Examples at the Dulong and Dachangmines, South China[J]. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, 62(7-8): 259-272.
- JIANG Shao-yong, SU Hui-min, XIONG Yi-qu, LIU Tao, ZHU Kang-yu, ZHANG Lu. 2020. Spatial-temporal distribution, geological characteristic and ore formation controlling factors of major types of rare metal mineral deposits in China[J]. *Acta Geologica Sinica(English Edition)*, 94(6): 1757-1773.
- JIAO Jian-gang, LU Hao, SUN Ya-li, HUANG Xi-feng, DUAN Jun. 2013. Re-Os dating for Derni Cu(Zn-Co) ore deposit in Qinghai Province, China and its geological implication[J]. *Geoscience*, 27(3): 577-584(in Chinese with English abstract).
- Land and Resources Department of Qinghai Province. 2016. Report on mineral reserves statistics of Qinghai Province in 2015[R]. Xining: Land and Resources Department of Qinghai Province: 10-56(in Chinese).
- LEI Yong-liang, DAI Jia-wen, BAI Qiang, WANG Kai-xing, SUN Li-qiang, LIU Xiao-dong, YU Chi-da, HE Shi-wei. 2021. Genesis and implications of peraluminous A-type rhyolite in the Haidewula area, East Kunlun Orogen[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(7): 1964-1982(in Chinese with English abstract).
- LI Dong-sheng, KUI Ming-juan, GU Feng-Bao, WANG Jian-jun, BAI Hong-xi, ZHAN Fa-yu, WANG Fa-ming, MA Yan-qing. 2009. Geological characteristics and genesis of the Saishitang copper deposit in Qinghai Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(5): 719-730(in Chinese with English abstract).
- LI Hong-pu, ZHENG Mian-ping, HOU Xian-hua, YAN Li-juan. 2015. Control factors and water chemical characteristics of potassium-rich deep brine in Nanyishan structure of western Qaidam Basin[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 36(1): 41-50(in Chinese with English abstract).
- LI Peng. 2019. Ore-forming control factors, mineralization enrichment regularity and prospecting potential evaluation of the Xitieshan Pb-Zn polymetallic deposit, Qinghai Province[D]. Wuhan: China University of Geosciences: 1-153(in Chinese with English abstract).
- LI Rui-qiong. 2018. Study on gallium concentration of Muli coal-field[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology: 1-51(in Chinese with English abstract).
- LI Shan-ping, PAN Tong, WANG Bing-zhang, YAN Xing-peng, REN Hua, YU Fu-cheng, QIU Wei, WANG Jian-jun, TANG Jian, WANG Jin-shou, JIN Ting-ting. 2021. Characteristics and tectonic significance of beryl-bearing pegmatites in Qiemoge Mountain, northern margin of Qaidam Basin[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 45(3): 608-619(in Chinese with English abstract).
- LI Shan-ping, ZHAN Shou-zhi, JIN Ting-ting, CHEN Jing, REN Hua, QIU Wei. 2016. REE geochemical characteristics and provenance analysis of the Shaliuquan niobium tantalum pegmatite ore, Qinghai Province[J]. *Chinese Rare Earths*, 37(1): 39-46(in Chinese with English abstract).
- LI Tong-fei, XIA Qing-lin, WANG Xin-qing, LIU Yue, CHANG Li-heng, LENG Shuai. 2018. Metallogenic geological characteristics and mineral resource potential of rare earth element resources in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 25(3): 95-106(in Chinese with English abstract).
- LI Wen-chang, LI Jian-wei, XIE Gui-qing, ZHANG Xiang-fei, LIU Hong. 2022. Critical minerals in China: Current status, research focus and resource strategic analysis[J]. *Earth Science Frontiers*, 29(1): 1-13(in Chinese with English abstract).
- LI Wu-fu, LI Shan-ping, WANG Bing-zhang, WANG Chun-tao, LIU Jin-heng, ZHANG Xin-yuan, CAO Jing-shan, XU Chuan-bing, LIU Jian-dong, JIN Ting-ting. 2021a. Discovery of the (beryl-bearing) spodumene pegmatite in the Caolong Area in the Sanjiang northern section of the Qinghai: Implications for Li-Be mineralization[J]. *Geotectonica et Metallogenia*. <https://doi.org/10.16539/j.dgzycx.2021.05.021>(in Chinese with English abstract).
- LI Wu-fu, WANG Tao, WANG Bing-zhang, ZHANG Xin-yuan, TAN Yun-hong, YUAN Bo-wu, WANG Chun-tao, HAN Xiao-long, JIN Ting-ting, ZHENG Ying, CAO Jin-shan, WANG Tai-shan, ZHANG Kun, FU Chang-lei, CHEN Jian, LIU Jian-dong, LI qing, ZHANG Qi-long, CHEN Li-juan. 2021b. Discovery and significance of rare mineralized alkaline complex in Dagele area of east Kunlun[J]. *Geotectonica et Metallogenia*. <https://doi.org/10.16539/j.dgzycx.2021.06.010>(in Chinese with English abstract).
- LI Xiao-feng, XU Jing, ZHU Yi-ting, LÜ You-hu. 2019. Critical minerals of indium: Major ore types and scientific issues[J].

- Acta Petrologica Sinica, 35(11): 3292-3302(in Chinese with English abstract).
- LI Xiao-feng, ZHU Yi-ting, XU Jing. 2020. Indium as a critical mineral: A research progress report[J]. China Science Bulletin, 65(33): 3678-3687(in Chinese with English abstract).
- LI Xiao-hu, CHU Feng-you, LEI Ji-jiang, YU Xing, ZHANG Ping-ping. 2014. The copper isotopic composition of sulfide ores and deposit genesis of the Dur'ngoi Cu (Zn-Co) deposit in Qinghai Province, China[J]. Earth Science Frontiers, 21(1): 196-204(in Chinese with English abstract).
- LI Yi-wei, CHEN Jie, LI Hui-wen. 1989. Petrochemistry and geologic significance of volcanic rocks in the Laozanggou polymetallic area Qinghai Province[J]. Journal of Chengdu College of Geology, 16(2): 46-56(in Chinese with English abstract).
- LIU Chang-zheng, CHEN Yue-long, XU Guang, ZHAO Juan, LI Yue, LI Lin-ye, JI Bing-yan, WANG Yuan-kui. 2011. The application of geochemical block theory to lead and zinc resources assessment in Tuotuohe area of Qinghai Province[J]. Earth Science Frontiers, 18(5): 271-282(in Chinese with English abstract).
- LIU Jian-nan, FENG Cheng-you, ZHAO Yi-ming, LI Da-xin, XIAO Ye, ZHOU Jian-hou, MA Yong-shou. 2013. Characteristics of intrusive rock, metasomatites, mineralization and alteration in Yemaquan skarn Fe-Zn polymetallic deposit, Qinghai Province[J]. Mineral Deposits, 32(1): 77-93(in Chinese with English abstract).
- LIU Jian-ping, GU Xian-ping, SHAO Yong-jun, FENG Yu-zhou, LAI Jian-qing. 2016. Indium mineralization in copper-tin stratiform skarn ores at the Saishitang-Rilonggou ore field, Qinghai, Northwest China[J]. Resource Geology, 66(4): 351-367.
- LIU Jin-heng, WANG Qiang, XU Chuan-bing, ZHOU Jin-sheng, WANG Bing-zhang, LI Wu-fu, LI Shan-ping, HUANG Tong-yu, YAN Qing-he, SONG Tao-zhong, WANG Chun-tao, ZHENG Ying, WANG Jin-shou. 2022. Geochronology of the Chakabeishan Li-(Be) rare-element pegmatite, Zongwulong orogenic belt, northwest China: Constraints from columbite-tantalite U-Pb and muscovite-lepidolite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating[J]. Ore Geology Reviews, 146: 104930.
- LIU Yong, LI Ting-dong, XIAO Qing-hui, ZHANG Ke-xin, ZHU Xiao-hui, DING Xiao-zhong. 2022. Progress in geological study of oceanic plates[J]. Earth Science Frontiers, 29(2): 79-93(in Chinese with English abstract).
- LIU Yun-hua, MO Xuan-Xue, YU Xue-hui, ZHANG Xue-ting, XU Guo-wu. 2006. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the Jingren granite, Yemaquan region of the east Kunlun and its geological significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 22(10): 2457-2463(in Chinese with English abstract).
- LONDON D. 2014. A petrologic assessment of internal zonation in granitic pegmatites[J]. Lithos, 184-187: 74-104.
- LONDON D. 2016. Rare-element granitic pegmatites[C]//VERPLANCK P L, HITZMAN M W. Rare earth and critical elements in ore deposits. Littleton: Society of Economic Geologists: 165-193.
- LONDON D. 2018. Ore-forming processes within granitic pegmatites[J]. Ore Geology Reviews, 101: 349-383.
- LUO Ming-fei, MO Xuan-xue, YU Xue-hui, LI Xiao-wei, HUANG Xiong-fei, YU Jun-chuan. 2014. Zircon LA-ICP-MS U-Pb age dating, petrogenesis and tectonic implications of the Late Triassic granites from the Xiangride area, East Kunlun[J]. Acta Petrologica Sinica, 30(11): 3229-3241(in Chinese with English abstract).
- NIE Xin, JIA Xiu-ming, ZHANG Xue-ting. 2014. Discussion on geochemical characteristics and genesis of Solagol copper polymetallic ore deposit in Qinghai[J]. Coal Geology of China, 26(12): 74-80(in Chinese with English abstract).
- PAN Gui-tang, LU Song-nian, XIAO Qing-hui, ZHANG Ke-xin, YIN Fu-guang, HAO Guo-jie, LUO Man-sheng, REN Fei, YUAN Si-hua. 2016. Division of tectonic stages and tectonic evolution in China[J]. Earth Science Frontiers, 23(6): 10-23(in Chinese with English abstract).
- PAN Gui-tang, WANG Li-quan, YIN Fu-guang, GENG Quan-ru, LI Guang-ming, ZHU Di-cheng. 2022. Researches on geological-tectonic of Tibetan Plateau: A review, recent advances, and directions in the future[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 42(2): 151-175(in Chinese with English abstract).
- PAN Gui-tang, XIAO Qing-hui, LU Song-nian, DENG Jin-fu, FENG Yi-min, ZHANG Ke-xin, ZHANG Zhi-yong, WANG Fang-guo, XING Guang-fu, HAO Guo-jie, FENG Yan-fang. 2009. Subdivision of tectonic units in China[J]. Geology in China, 36(1): 1-28(in Chinese with English abstract).
- PAN Tong, DING Qing-feng, ZHOU Xuan, LI Shan-ping, HAN Jie, CHENG Long. 2021. Columbite-tantalite group mineral U-Pb geochronology of Chaqiabeishan Li-rich granitic pegmatites in the Quanji Massif, NW China: Implications for the genesis and emplacement ages of pegmatites[J]. Frontiers in Earth Science, 8: 606951.
- PAN Tong, LI Shan-ping, REN Hua, WANG Bing-zhang, LI Wu-fu, WANG Chun-tao, JIN Ting-ting. 2020. Metallogenic conditions and prospecting potential of Lithium polymetallic deposits in North Qaidam Basin[J]. Mineral Exploration, 11(6): 1101-1116(in Chinese with English abstract).
- PAN Tong, LI Shan-ping, WANG Tao, HAN Guang, JIA Jian-tuan. 2022. Metallogenic characteristics and prospecting potential of lithium deposits in the Qinghai Province[J]. Acta Geologica Sinica, 96(5): 1827-1854(in Chinese with English abstract).
- PAN Tong, XUE Wan-wen, WANG Gui-ren, WANG Fu-de. 2021. Geology mineral resources of Qinghai province[M]. Beijing: Geological Publishing House: 151-205(in Chinese).
- PAN Tong. 2017. Classification of metallogenic units in Qinghai, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 39(1): 16-33(in Chinese with English abstract).

- PAN Tong. 2019. Discussion on the minerogenetic series of deposits in Qinghai, China[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 41(3): 297-315(in Chinese with English abstract).
- QIAO Jian-feng. 2018. Geological and geochemical characteristics and genesis of Jiaotongshe niobium and tantalum deposits in Qinghai Province[D]. Changchun: Jilin University: 6-44(in Chinese with English abstract).
- Regional Geological Survey Team of Qinghai Province. 1987. Regional geological survey report of 1/50000 of J48E024001 Shangjiahe sheet and J48E024002 Hualong Hui Nationality Autonomous County in Qinghai province[R]. Xining: Regional Geological Survey Team of Qinghai Province.
- RONG Xiao, HU Yong-xing, CHEN Qing, KANG Li-gang, WANG Ji-bin, YE Lei-gang, CHEN Bin, ZHANG Sheng-long. 2022. Geochronological and geochemical characteristics of diorite and the geological significance in Chachaxiangka U-Nb-REE deposit at the northern margin of the Qaidam Basin[J]. *Uranium Geology*, 38(2): 207-220(in Chinese with English abstract).
- SHI Ren-deng, YANG Jing-sui, WU Cai-lai, IIZUKA T, HIRATA T. 2004. Island arc volcanic rocks in the North Qaidam UHP Metamorphic Belt[J]. *Acta Geologica Sinica*, 78(1): 52-64(in Chinese with English abstract).
- SONG Shu-guang, WANG Meng-jue, WANG Chao, NIU Yao-ling. 2015. Magmatism during continental collision, subduction, exhumation and mountain collapse in collisional orogenic belts and continental net growth: A perspective[J]. *Science China: Earth Sciences*, 45(7): 916-940(in Chinese).
- SONG Shu-guang, WU Zhen-zhu, YANG Li-ming, SU Li, XIA Xiao-hong, WANG Chao, DONG Jin-long, ZHOU Chen-ao, BI Heng-zhe. 2019. Ophiolite belts and evolution of the Proto-Tethys Ocean in the Qilian Orogen[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(10): 2948-2970(in Chinese with English abstract).
- SONG Shu-guang, ZHANG Gui-bin, ZHANG Cong, ZHANG Li-fei, WEI Chun-jing. 2013. Dynamic process of oceanic subduction and continental collision: petrological constraints of HP-UHP belts in Qilian-Qaidam, the northern Tibetan Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 58(23): 2240-2245(in Chinese).
- SONG Yu-cai, HOU Zeng-qian, WANG Gui-ren, LI Lian-song, YANG Tian-nan, ZHANG Hong-rui, LIU Yan-xue, YANG Zhu-sen, TIAN Shi-hong, LIU Ying-chao, JIA Zong-yong, WANG Yuan-kui, LIU Qun, YAN Ming, HE Li. 2015. Metallogenic regularity and ore exploration targeting in Tuotuohe area, northern Sanjiang orogenic belt[J]. *Mineral Deposits*, 34(1): 1-20(in Chinese with English abstract).
- SUN Hua-shan, ZHAO Li-jun, WU Guan-bin, NING Jun-tao, CHEN Qiao-mei, JIANG Chu-ling. 2012. Metallogenic tectonic setting and ore-finding potential of Xitieshan massive sulfide lead-zinc deposit: Evidence from lithochemistry and geochemistry of ore-hosted volcanic strata, Tanjianshan Group[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(2): 652-664(in Chinese with English abstract).
- SUN Peng-fei. 2017. Detrital zircon of host strata in Kuhai-Saishitang area, Qinghai Province, and its geological significance[D]. Beijing: China University of Geosciences: 1-49(in Chinese with English abstract).
- TU Guang-chi, GAO Zhen-min. 2003. Ore-forming mechanism of the dispersed elements[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, (5): 358-361(in Chinese with English abstract).
- WANG Bing-zhang, HAN Jie, XIE Xiang-lei, CHEN Jing, WANG Tao, XUE Wan-wen, BAI Zong-hai, LI Shan-ping. 2020. Discovery of the Indosinian(Beryl-bearing) spodumene pegmatitic dike swarm in the Chakaibeishan area in the northeastern margin of the Tibetan Plateau: Implications for Li-Be mineralization[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 44(1): 69-79(in Chinese with English abstract).
- WANG Deng-hong, WANG Rui-jiang, LI Jian-kang, ZHAO Zhi, YU Yang, DAI Jing-jing, CHEN Zheng-hui, LI De-xian, QU Wen-jun, DENG Mao-chun, FU Xiao-fang, SUN Yan, ZHENG Guo-dong. 2013. The progress in the strategic research and survey of rare earth, rare metal and rare-scattered elements mineral resources[J]. *Geology in China*, 40(2): 361-370(in Chinese with English abstract).
- WANG Deng-hong, XU Zhi-gang, SHENG Ji-fu, ZHU Ming-yu, XU Jue, YUAN Zhong-xin, BAI Ge, QU Wen-jun, LI Hua-qin, CHEN Zheng-hui, WANG Cheng-hui, HUANG Fan, ZHANG Chang-qing, WANG Yong-lei, YING Li-juan, LI Hou-min, GAO Lan, SUN Tao, FU Yong, LI Jian-kang, WU Guang, TANG Ju-xing, FENG Cheng-you, ZHAO Zheng, ZHANG Da-quan. 2014. Progress on study of regularity of major mineral resources and regional metallogenic regularity in China: A review[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(12): 2176-2191(in Chinese with English abstract).
- WANG Guo-qiang, LI Xiang-min, XU Xue-yi, YU Ji-yuan, SUN Ji-ming, WU Peng. 2011. LA-ICP-MS U-Pb dating of zircons from basic volcanic rocks in the Honggou copper polymetallic deposit, Menyuan area, Qinghai[J]. *Geological Bulletin of China*, 30(7): 1060-1065(in Chinese with English abstract).
- WANG Hui. 2016. Petrogenesis metallogeny and tectonic settings of the Saishitang Cu deposit in Qinghai Province, China[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese with English abstract).
- WANG Jin-shou, AN Yong-wei, FU Yan-wen, HUANG Qing-hua, LI Shan-ping, YAN Xing-peng. 2021. A rustic opinion about the overview, bottleneck problems and countermeasures of scandium resources in Qinghai Province[J]. *Qinghai Science and Technology*, 28(6): 45-50(in Chinese).
- WANG Jin-shou, PAN Tong, LI peng, TIAN Yong-ge, AN Yong-wei, YU Fu-cheng, LEI Xiao-qing. 2022. Metallogenic series of deposits in the northern Qaidam metallogenic belt of Qinghai Province, China[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 44(3): 391-412(in Chinese with English abstract).

- WANG Jin-shou, ZHENG You-ye, WU Zheng-shou, LI Jie, TANG Jian. 2016. The discovery of scandium deposit in the Lajishan ophioliticmelange belt in Qinghai Province and its geological significance[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, (Z1): 937(in Chinese).
- WANG Meng-xi, JIANG Chang-yi, XIA Ming-zhe, DU Wei. 2017. Petrogenesis of the Fe-P-REE mineralized Shangzhuang ultramafic intrusion in the Lajishan tectonic belt, South Qilian Belt: Implications for mantle metasomatism and tectonic setting[J]. *Geological Journal*, 52: 314-328.
- WANG Ting-hao, HUANG Wen-hui, YAN De-yu, TANG Xiu-yi. 2016. Progress of research on mineralization mode of large coal-Ge deposits in China: Coal-Ge deposit in Wulantuga of Inner Mongolia and Lincang of Yunnan[J]. *Earth Science Frontiers*, 23(3): 113-123(in Chinese with English abstract).
- WANG Xin-yu, ZHU Xin-you, LI Jia-duo, WANG Yu-wang, JIANG Bin-bin, WU Jin-rong, HUANG Xing-kai, ZHAO Zi-ye. 2021. Two stage magmatism and their skarn-type mineralization in the Niukutou ore district, Qinghai Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(5): 1567-1586(in Chinese with English abstract).
- WANG Xin-yu, ZHU Xin-you, LI Jia-duo, WANG Yu-wang, LONG Ling-li, LI Shun-ting, WU Jin-rong, CHENG Xi-yin, JIANG Bin-bin. 2020. Genesis and geological significance of manganilvaite in the Niukutou deposit, Qinghai Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(8): 2279-2290(in Chinese with English abstract).
- WEI Gang, WANG Yi-sheng. 2010. Geologic space planes and their significance of Rilonggou-Saishitang region, Xinghai County, Qinghai Province[J]. *Northwestern Geology*, 43(3): 36-40(in Chinese with English abstract).
- WEI Jun-hao, LI Peng, LI Yi-bang, CHEN Ding-jie, WANG Hai-feng, ZHONG Yong-sheng, FENG Zhi-xing. 2021. Material field structure of ore-forming elements and deep prospecting potential of Xitieshan lead-zinc deposit, Qinghai Province[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 40(2): 1-12(in Chinese with English abstract).
- WEI Xin-jun, JIANG Ji-xue. 1993. The evolution of the Quaternary salt lake in the Qaidam Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 67(3): 255-265(in Chinese with English abstract).
- WEN Han-jie, ZHU Chuan-wei, DU Sheng-jiang, FAN Yu, LUO Chong-guang. 2020. Gallium(Ga), germanium(Ge), thallium(Tl) and cadmium(Cd) resources in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 65(33): 3688-3699(in Chinese with English abstract).
- WU Cai-lai, XU Xue-yi, GAO Qian-ming, LI Xiang-min, LEI Min, GAO Yuan-hong, FROST R B, WOODEN J L. 2010. Early Palaeozoic granitoid magmatism and tectonic evolution in North Qilian, NW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(4): 1027-1044(in Chinese with English abstract).
- WU Fu-yuan, WAN Bo, ZHAO Liang, XIAO Wen-jiao, ZHU Ri-xiang. 2020. Tethyan geodynamics[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 36(6): 1627-1674(in Chinese with English abstract).
- XIA Lin-qi, LI Xiang-min, YU Ji-yuan, WANG Guo-qiang. 2016. Mid-Late Neoproterozoic to Early Paleozoic volcanism and tectonic evolution of the Qilian Mountain[J]. *Geology in China*, 43(4): 1087-1138(in Chinese with English abstract).
- XU Chong, SUN Hua-shan, SONG Chang-shun, TANG Liang, HUANG Zhi-wei, GE Feng-jian, OUYANG Shu-bing, LUO Guang-jie, ZHANG Wei. 2022. Restoration and comparison of metamorphic protoliths in the a-2 and d-2 rock members of the Tanjianshan Group in the Xitieshan mining area, Qinghai Province[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 42(2): 176-192(in Chinese with English abstract).
- XU Jing, LI Xiao-feng. 2018. Spatial and temporal distributions, metallogenic backgrounds and processes of indium deposits[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(12): 3611-3626(in Chinese with English abstract).
- XU Zhi-gang, CHEN Yu-chuan, WANG Deng-hong, CHEN Zheng-hui, LI Hou-min. 2008. Division scheme of the China metallogenic belt[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-138(in Chinese).
- XU Zhi-qin, WANG Ru-cheng, ZHAO Zhong-bao, FU Xiao-fang. 2018. On the structural backgrounds of the large-scale "hard-rock type" lithium ore belts in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 92(6): 1091-1106(in Chinese with English abstract).
- XUE Ying-yu, LIU Hai-yang, SUN Wei-dong. 2021. The geochemical properties and enrichment mechanism of lithium[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 45(6): 1202-1215(in Chinese with English abstract).
- YANG He-qun. 2020. Shangzhuang magmatic phosphate ore in Qinghai Province[J]. *Northwestern Geology*, 53(3): 209(in Chinese).
- YANG Sheng-de, PAN Tong. 2013. Report on metallogenic settings in mineral resources potentiality assesment in Qinghai Province[R]. Xining: Bureau of Geological Exploration and Development of Qinghai Province: 1-216(in Chinese).
- YAO Xi-zhu, YANG Tao, ZHU Zhi-yong, DANG Ben, FENG Zhi-jie, WU Chang-zhi. 2019. Characteristics of LA-ICP-MS trace elements in pyrite: Implications for the genesis of Xitieshan deposit in Qinghai Province[J]. *Geological Journal of China Universities*, 25(6): 888-900(in Chinese with English abstract).
- YU Jun-qing, HONG Rong-chang, GAO Chun-liang, CHENG Ai-ying, ZHANG Li-sha. 2018. Lithium brine deposits in Qaidam Basin: Constraints on formation processes and distribution pattern[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 26(1): 7-14(in Chinese with English abstract).
- YU Sheng-yao, ZHANG Jian-xin, MATTINSON C G, DEL REAL P G, LI Yun-shuai, GONG Jiang-hua. 2014. Paleozoic HP granulite-facies metamorphism and anatexis in the Dulan area of the North Qaidam UHP terrane, western China: Constraints from petrology, zircon U-Pb and amphibole Ar-Ar geochronology[J]. *Lithos*, 198-199: 58-76.
- ZENG Xiao-hua, ZHOU Zong-gui. 2014. Geochemistry constraint

- on ore-forming material and ore-forming fluids of Tongyugou copper deposit in Xinghai County, Qinghai Province[J]. *Geoscience*, 28(2): 348-358(in Chinese with English abstract).
- ZHAI Ming-guo, WU Fu-yuan, HU Rui-zhong, JIANG Shao-yong, LI Wen-chang, WANG Ru-cheng, WANG Deng-hong, QI Tao, QIN Ke-zhang, WEN Han-jie. 2019. Critical metal mineral resources: current research status and scientific issues[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, (2): 106-111(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Hong-mei, LI Hai-ping, FENG Qiao, JIAO Xin, XUE Cheng. 2011. Geochemical characteristics and tectonic environmental analysis of volcanic rocks from Late Triassic southeastern margin of the Qaidam Basin[J]. *Northwestern Geology*, 44(4): 15-22(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Jian-xin, YU Sheng-yao, LI Yun-shuai, YU Xing-xing, LIN Yi-hui, MAO Xiao-hong. 2015. Subduction, accretion and closure of Proto-Tethyan Ocean: Early Paleozoic accretion/collision orogeny in the Altun-Qilian-North Qaidam orogenic system[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 3(12): 3531-3554(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Xiao-pan, WANG Quan-feng, HUI Jie, CHANG Xin, TONG Hai-kui. 2015. Chemical characteristics of volcanic rocks from the Tanjianshan Group on the northern margin of the Qaidam Basin and its tectonic environment[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 35(1): 18-26(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Xue-ting, CHEN Xi-feng, YAO Yuan, ZHENG Jie, WU Hua-ying. 2014. Characteristics of ore-bearing wall rocks from the Suolagou copper polymetallic deposit, Qinghai Province[J]. *Geology and Exploration*, 50(4): 659-665(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Zhao-wei, LI Wen-yuan, WANG Ya-lei, GAO Yong-bao. 2015. The genesis study on Xiashentang basic-ultrabasic intrusion associated with Ni-Cu mineralization in Hualong, southern Qilian Mountains: Zircon geochronology, geochemistry and Sr-Nd isotopic constraints[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(9): 2539-2548(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Yi-ming, FENG Cheng-you, LI Da-xin. 2017. New progress in prospecting for skarn deposits and spatial-temporal distribution of skarn deposits in China[J]. *Mineral Deposits*, 36(3): 519-543(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Zhi-xin, WEI Jun-hao, LIANG Sheng-nan, GAO Tian. 2021. Sulfide remobilization and trace element redistribution during metamorphism and deformation at the Xitieshan Pb-Zn deposit, NW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 136: 104170.
- ZHENG Mian-ping, XIANG Jun, WEI Xin-jun, ZHENG Yuan. 1989. Saline lakes on the Qinghai-Xizang(Tibet) Plateau[M]. Beijing: Science and Technology of Beijing Press: 306-329(in Chinese).
- ZHENG Mian-ping, ZHANG Xue-fei, HOU Xian-hua, WANG Hai-lei, LI Hong-pu, SHI Lin-feng. 2013. Geological environments of the Late Cenozoic lakes and salt-forming and oil-gas pool-forming actions in the Tibetan Plateau[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 34(2): 129-138(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Mian-ping. 2001. On saline lakes of China[J]. *Mineral Deposits*, 20(2): 181-189(in Chinese with English abstract).
- ZHONG Jun, CHEN Qing, FAN Hong-hai, SHI Chang-hao. 2018. Geological characteristics and ore genesis of the Chachaxiangka U-Th-Nb-REE deposit in northeastern Qaidam Basin: a new mineralization type related to albitite[J]. *Earth Science Frontiers*, 25(5): 222-236(in Chinese with English abstract).
- ZHONG Jun, HU Chao-nan, FAN Hong-hai, CAI Yu-qi, CHEN Qing, CHEN Jin-yong, MENG Yan-ning. 2019. A new type U-Th-REE-Nb mineralization related to albitite: A case study from the Chachaxiangka deposit in the northeastern Qaidam Basin of China[J]. *China Geology*, 2(4): 422-438.
- ZHOU Hong-zhi. 2019. Indosinian magmatic evolution and Copper polymetallic mineralization in the Erashan area, Qinghai Province[D]. Wuhan: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).
- ZHU Yun-zhu, LI Wen-sheng, WU Bi-hao, LIU Cheng-lin. 1989. New recognition on the geology of the Yiliping lake and the east and west Taijnar lakes in the Qaidam Basin, Qinghai Province[J]. *Geological Review*, 35(6): 558-565(in Chinese with English abstract).