第44卷 第3期 岩 石 矿 物 学 杂 志 Vol. 44, No. 3: 737~744
2025年5月 ACTA PETROLOGICA ET MINERALOGICA May, 2025

Doi: 10.20086/j.cnki.yskw.2025.4056

·学术快讯·

个旧花岗岩体北缘铟成矿带发现及其意义

叶 彬[1], 王加昇[1], 郑晓军[2], 洪鑫科[1,3], 江小均[1], 王 蓉[1], 周耘东[4], 李浩宇[1]

(1. 昆明理工大学国土资源与工程学院, 云南 昆明 650093; 2. 云南省有色地质局, 云南 昆明 650051; 3. 云南省核工业二〇九地质大队, 云南 昆明 650106; 4. 昆明理工大学城市学院, 云南 昆明 650051)

摘 要: 稀散元素铟(In)属于关键金属,是新兴产业技术和国防安全领域的重要原料。我国是铟资源大国,滇东南地区是我国最重要的铟资源基地。本文对云南个旧花岗岩体北缘普雄铅锌成矿带中的挣财洞和老鹰窝等典型矿床开展了铟分布规律和赋存形式研究,闪锌矿 LA-ICP-MS 原位微量元素测试结果表明,挣财洞矿床闪锌矿中铟的含量在 $37.71\times10^{-6}\sim403.88\times10^{-6}$ 之间,均值为 157.44×10^{-6},老鹰窝铅锌矿床的闪锌矿中铟含量在 $378.58\times10^{-6}\sim1\,060.08\times10^{-6}$ 之间,均值为 631.46×10^{-6},与国内典型富铟矿床闪锌矿中铟的含量属于一个数量级,明显高于国外典型富铟矿床。此外,普雄铅锌成矿带内还分布众多其他铅锌矿床(点),而闪锌矿又是铟的重要载体矿物,据此本文认为该铅锌成矿带也是重要的铟成矿带,有重要的研究和利用价值。

关键词: 滇东南普雄地区; 铅锌矿成矿带; 个旧花岗岩体北缘; 铟; 超常富集

中图分类号: P618.82 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6524(2025)03-0737-08

The discovery and significance of the indium metallogenic belt in the northern margin of Gejiu granite

YE Bin[1], WANG Jia-sheng[1], ZHENG Xiao-jun[2], HONG Xin-ke[1,3], JIANG Xiao-jun[1], WANG Rong[1], ZHOU Yun-dong[4] and LI Hao-yu[1]

(1. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 2. Yunnan Province Nonferrous Geological Bureau, Kunming 650051, China; 3. No. 209 Geological Brigade, Geological Bureau of Yunnan Nuclear Industry, Kunming 650106, China; 4. City College, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China)

Abstract: Indium (In), a crucial metal, serves as a significant raw material in the domains of emerging industrial technologies as well as national defense and security. China is one of the most important countries of indium resources in the world, and southeast Yunnan plays the same role in our country. In this paper, the distribution and occurrence of indium in typical deposits such as Zhengcaidong and Laoyingwo in the Puxiong Pb-Zn metallogenic belt at the northern margin of Gejiu granite in Yunnan Province have been studied. LA-ICP-MS in situ trace element test of sphalerite shows that the indium content of sphalerite in Zhenngcaidong deposit ranges from 37.71×10^{-6} to 403.88×10^{-6}, with an average of 157.44×10^{-6}. The indium content of sphalerite in Laoyingwo Pb-Zn deposit ranges from 378.58×10^{-6} to $1\,060.08\times10^{-6}$, with an average of 631.46×10^{-6}. The indium content in sphalerite

收稿日期: 2024-02-06; **接受日期:** 2024-11-26; **编辑:** 郝艳丽

基金项目: 云南省科技计划项目(202202AG050006); 云南省万人计划青年拔尖人才项目(云人社通[2020]150号)

作者简介: 叶 彬(1997-), 男, 硕士研究生, 资源勘查工程与技术专业, E-mail: 18387260794@163.com; 通讯作者: 王加昇(1985-), 男, 教授, 主要从事矿床学、矿床地球化学研究, E-mail: jiashengwang@126.com。

网络首发时间: 2025-03-17; **网络首发地址:** http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1966.p.20250317.1014.002.html

is an order of magnitude higher than that in indium-rich deposits abroad. In addition, many Pb-Zn deposits (occurrences) occur in the Puxiong Pb-Zn metallogenic belt, and sphalerite is the dominate indium-bearing mineral in this region. Therefore, we suggest that the Puxiong Pb-Zn metallogenic belt is also an important indium metallogenic belt, which has important research and utilization values.

Key words: Puxiong district in southeast Yunnan Province; Pb-Zn ore metallogenic belt; north margin of Gejiu granite; indium; supernormal enrichment

Fund support: Science and Technology Plan Project of Yunnan Province (202202AG050006); Youth Top Talent Project of Ten Thousand Talents Plan of Yunnan Province (Yunrenshetong [2020] No. 150)

关键金属(critical metals)和关键矿产资源(critical minerals)是最近几年国际上提出的新概念,对战略性新兴产业的发展至关重要,其成矿特点和成矿机制已成为国际矿床学研究的热点之一(毛景文等, 2019; 翟明国等, 2019; 胡瑞忠等, 2020; 蒋少涌等, 2022)。关键金属主要包括稀有金属(Li、Be、Rb、Cs、Nb、Ta、Zr、Hf、W)、稀土金属(La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu、Sc、Y)、稀散金属(Ga、Ge、Se、Cd、In、Te、Re、Tl)和部分稀贵金属(PGE、Cr、Co等)(侯增谦等, 2020)。铟(In)是关键矿产稀散金属中的一种,在地核、下地幔、上地幔、地壳、洋壳中的丰度分别为 0.50×10^{-6}、0.01×10^{-6}、0.06×10^{-6}、0.056×10^{-6} 及 0.072×10^{-6}(Rudnick and Gao, 2014; 温汉捷等, 2019)。21世纪以来,铟在高新技术(红外探测、微波通讯、太阳能电池、靶材ITO等)、电子工业以及医疗、国防、新能源等领域的应用日益广泛,尤其是在新兴产业技术和国防安全领域的作用极为重要,对国民经济、国家安全和科技发展具有重要的战略意义,金属铟业已成为支撑我国战略性新兴产业蓬勃发展的重要金属材料之一(徐净等, 2018; 蒋少涌等, 2019; 胡瑞忠等, 2020)。

全球赋铟矿床主要位于太平洋板块西缘俯冲带边缘、南美洲板块东部以及阿尔卑斯造山带(成永生, 2013),太平洋板块西缘分布有日本的Toyoha、Ashio、Ikuno、Akenobe等浅成低温热液型矿床以及韩国的Ulsan矽卡岩型矿床等;南美洲板块东部分布有玻利维亚的Potosi、Bolivar等浅成低温热液型矿床以及秘鲁的Ayawilca等矽卡岩型矿床(李晓峰等, 2007; 徐净等, 2018);阿尔卑斯造山带分布有德国的Tellerhauser、Erzgebirge等矽卡岩型矿床和Rammelsberg等SEDEX型矿床以及葡萄牙的Neves Corvo等块状硫化物型矿床。我国是铟资源大国,资源量占全球铟资源量的18.2%(Werner *et al.*, 2017),主要分布于扬子地块南-西南缘和华北地台北缘(成永生, 2012),在扬子地块南-西南缘分布有广西大厂、云南都龙和个旧等具有代表性的矽卡岩型富铟矿床(图1a),在华北地台北缘分布有内蒙古孟恩陶勒盖等热液脉型富铟矿床(张乾等, 2004)。其中,矽卡岩型和块状硫化物型矿床(主要分布于俄罗斯、加拿大、澳大利亚)均是铟资源的主要来源,分别占全球铟资源量的29.2%和28%,其次为浅成低温热液型和SEDEX型,分别占全球铟资源量的19.9%和18.0%(Werner *et al.*, 2017; 徐净等, 2018; 李晓峰等, 2020)。

已有的研究表明,铟有在活火山喷气口富集以及赋存于与岩浆有亲缘性矿床中的特点,说明铟可能是岩浆来源的,其成矿作用与岩浆作用密切相关(李晓峰等, 2009; Cook *et al.*, 2011; Ishihara *et al.*, 2011a, 2011b),与岩浆岩相关的富铟矿床可作为铟来自岩浆系统的直接证据,例如我国广西大厂、云南都龙和个旧、芬兰Wiborg batholith矿床、日本Toyoha矿床、法国Charrier矿床、巴西Mangabeira矿床、加拿大Mount Pleasant矿床、瑞典Langban矿床等均与花岗岩有密切关系(徐净等, 2018)。

众所周知,在云南个旧花岗岩体东侧发育有世界级的个旧超大型Sn多金属矿床(毛景文等, 2008),而在岩体的其他方向(北、西、南侧)则相形见绌,鲜有大型矿床出露,仅最近在个旧岩体北东侧碱性岩中发现的离子风化型REE矿达大型规模(李余华等, 2019; 王敏等, 2020)。值得注意的是,在个旧岩体北部及其接触带,云南省建水县普雄乡境内,发育九头山、挣财洞、老鹰窝、象头山、阳朝冲、石缸冲、黑山、普雄等一系列铅锌矿床(点)(图1b),但由于规模不大,受关注程度不高。最近,笔者团队在普雄铅锌成矿带中的九头山铅锌矿床发现了铟的超常富集现象(王加昇等, 2024),认为该成矿带具有重要的铟资源潜力,因此,结合前期研究工作,本文对该区带内另外两个典型矿床(挣财洞、老鹰窝)开

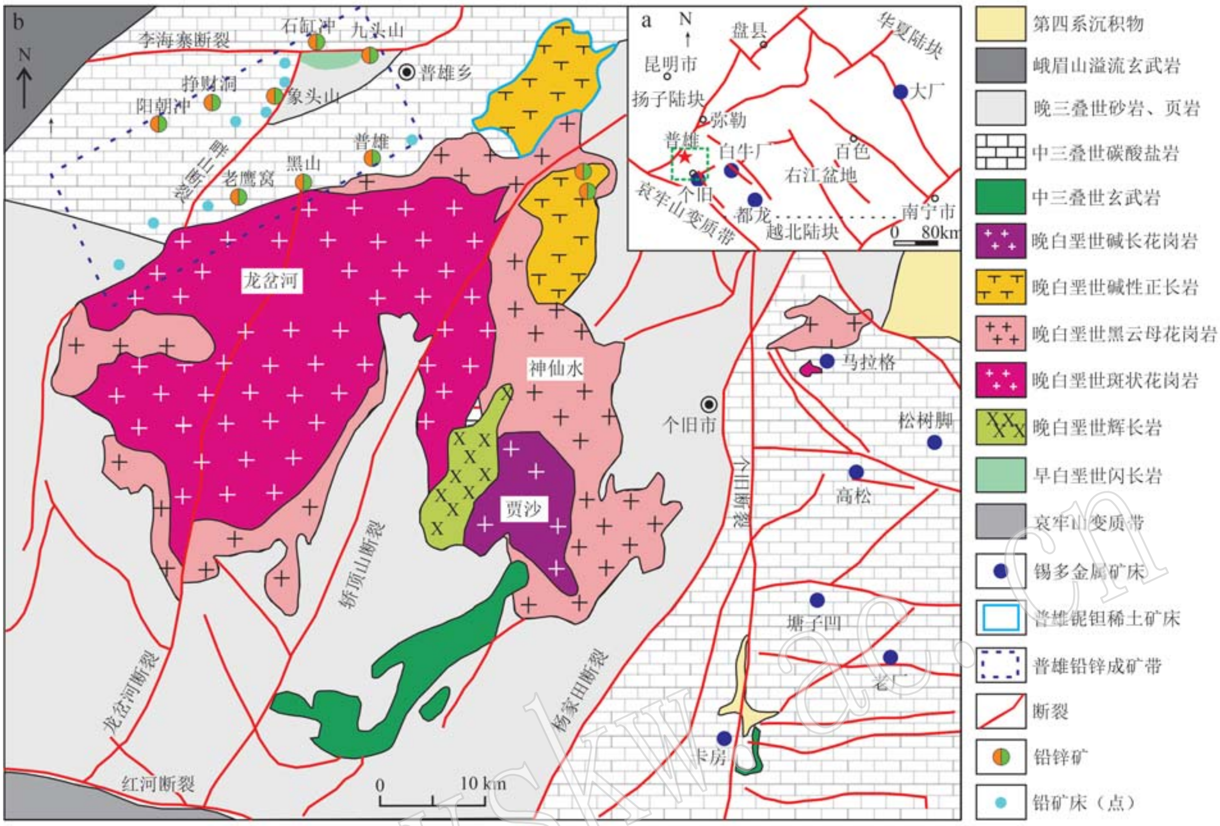

图 1　研究区区域地质图(a)和普雄铅锌矿成矿带地质简图(b)(据张银平等, 2022; Zhao *et al.*, 2022 修改)

Fig. 1　Regional geological map of the study area(a) and geological sketch map of the Puxiong Pb-Zn deposit metallogenic belt (b)(modified from Zhang Yinping *et al.*, 2022; Zhao *et al.*, 2022)

展了铟赋存规律研究,以期对该区的铟资源潜力进行评价。

普雄铅锌成矿带位于华南褶皱系滇东褶皱带个旧-石屏褶断束西南部,南西为红河大断裂,与哀牢山变质地块相衔接,北东以弥勒-师宗大断裂相连(图 1a)。该成矿带主要受东西向李海寨断裂和个旧岩体所夹持,呈北东-南西向展布,南北宽约 15 km,东西长近 30 km(图 1b)。区内以断裂为主,褶皱不发育,地层整体在断层间呈单斜,其他小褶皱为断层的伴生褶皱,主要出露中三叠统个旧组(T_2g)浅海相碳酸盐岩,分布于矿区西北部,呈北东向展布,该组地层铟明显富集(郭志娟等, 2020);下三叠统飞仙关组(T_1f)陆相泥页岩、砂岩分布于矿区东南部,呈近南北向展布;下三叠统永宁镇组(T_1y)泥岩夹炭质泥岩、泥灰岩分布于矿区中南部。矿区内少见岩浆岩出露,仅在南中部见少量辉绿岩脉侵入,但在矿区外围南部分布有燕山晚期的龙岔河中细粒黑云母花岗岩体,是个旧花岗岩体的西缘部分。已有的研究表明,该成矿带内铅锌矿化与燕山期岩浆热液活动关系密切,形成沿断层裂隙、断裂空间热液充填型铅锌矿体,次级断裂及小褶皱发育,为区内铅锌矿的形成提供了良好的成矿空间(云南省核工业二〇九地质大队, 2018a, 2018b; 王加昇等, 2024)。

挣财洞铅锌矿床位于该成矿带中北部,为中小型规模,其中铅品位为 4.58%,锌品位为 7.51%(云南省核工业二〇九地质大队, 2018a)。矿床中主要金属矿物为闪锌矿和方铅矿,黄铁矿次之,含少量黄铜矿,非金属矿物以方解石为主,有少量石英(图 2a~2c)。其中闪锌矿存在两种类型,在显微镜下内反射色分别呈淡黄色-黄色和红褐色-棕红色(图 2b),并在铟的富集程度上也存在明显差异,深色闪锌矿更富集铟。老鹰窝铅锌矿床位于该成矿带中南部,也为中小型规模,其中铅平均品位为 6.96%,锌平均品位为 8.14%(云南省核工业二〇九地质大队, 2018b)。矿床中主要的金属矿物为方铅矿与闪锌矿,黄铁矿次之,闪锌矿在镜下多呈不透明状,部分

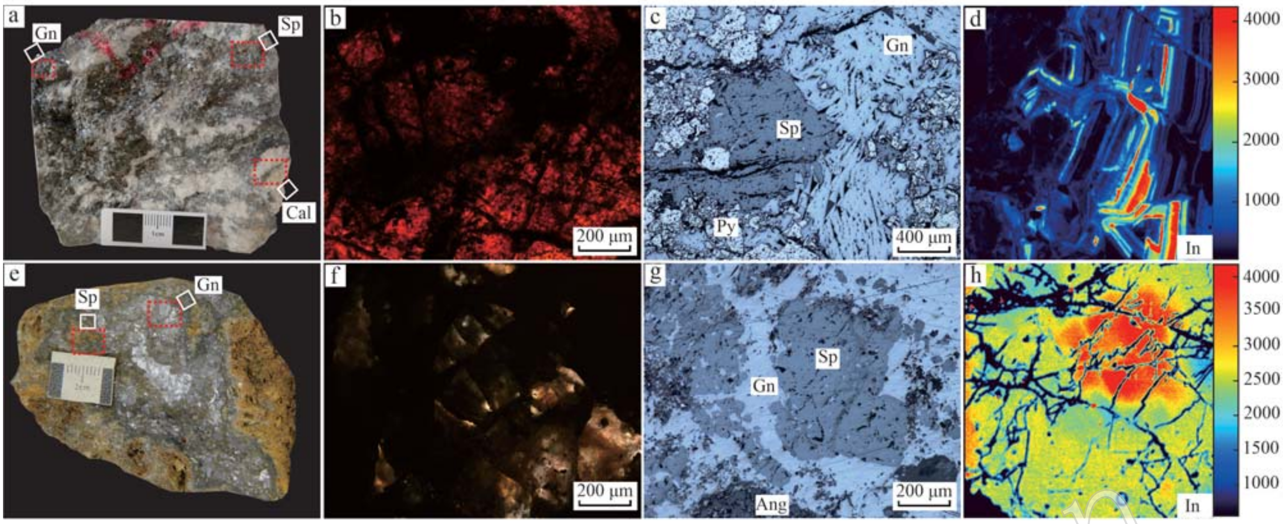

图 2 挣财洞铅锌矿与老鹰窝铅锌矿矿石手标本及镜下照片

Fig. 2 The hand specimens and microscopic photographs of ores in Zhengcaidong and Laoyingwo Pb-Zn deposits

a—挣财洞铅锌矿矿石; b—挣财洞闪锌矿,透射光; c—挣财洞铅锌矿矿石,反射光; d—挣财洞矿床闪锌矿,面扫描; e—老鹰窝铅锌矿矿石; f—老鹰窝闪锌矿,透射光; g—老鹰窝铅锌矿矿石,反射光; h—老鹰窝矿床闪锌矿,面扫描; Sp—闪锌矿; Gn—方铅矿; Py—黄铁矿; Ang—铅矾; Cal—方解石

a—Pb-Zn mine ore in Zhengcaidong; b—sphalerite in Zhengcaidong, transmitted light; c—Pb-Zn mine ore in Zhengcaidong, reflected light; d—sphalerite in Zhengcaidong, scanning image; e—Pb-Zn ore in Laoyingwo; f—sphalerite in Laoyingwo, transmitted light; g—Pb-Zn ore in Laoyingwo, reflected light; h—sphalerite in Laoyingwo deposit, scanning image; Sp—sphalerite; Gn—galena; Py—pyrite; Ang—anglesite; Cal—calcite

闪锌矿呈黄褐色-棕黄色(图 2e),方铅矿边缘常发育有灰色-暗灰色的铅矾,为方铅矿溶解氧化形成,矿区主要非金属矿物为方解石,含少量石英(图 2d~2f)。

本文对挣财洞、老鹰窝两个铅锌矿床不同类型的硫化物矿石进行采集,并对闪锌矿进行了原位 LA-ICP-MS 微量元素测试和 LA-TOF-ICP-MS 面扫描分析,其中原位 LA-ICP-MS 微量元素测试在西安矿谱超净实验室完成,闪锌矿 LA-TOF-ICP-MS 面扫描在中国上海 Chemlab 科技公司完成。对比前期九头山铅锌矿床的研究成果发现,九头山铅锌矿床的闪锌矿铟含量为 $36.85\times10^{-6}\sim2\,712.92\times10^{-6}$(均值为 668.09×10^{-6})(王加昇等, 2024),挣财洞矿床闪锌矿中铟的含量为 $37.71\times10^{-6}\sim403.88\times10^{-6}$,均值为 157.44×10^{-6},在红褐色-棕红色的闪锌矿中铟含量均大于 100.00×10^{-6},在浅黄色-黄色闪锌矿中铟含量相对较低;老鹰窝铅锌矿床的闪锌矿中铟含量为 $378.58\times10^{-6}\sim1\,060.08\times10^{-6}$,均值为 631.46×10^{-6},铟含量普遍较高(表 1)。从上述铟的分布特征来看,铅锌矿体离岩体越近,其闪锌矿颜色越深,铟的富集程度相对越高。

将普雄铅锌成矿带与扬子地块南-西南缘的大型-超大型富铟矿床(都龙多金属矿床中闪锌矿铟含量为 $3.30\times10^{-6}\sim3\,535.00\times10^{-6}$,均值为 426.08×10^{-6};大厂锡多金属矿田中闪锌矿铟含量为 $92.92\times10^{-6}\sim1\,421.00\times10^{-6}$,平均为 998.00×10^{-6};个旧锡多金属矿床中闪锌矿铟含量为 $198.30\times10^{-6}\sim1\,570.00\times10^{-6}$)对比可见,其闪锌矿中的铟含量处于一个数量级(图 3)(皮桥辉等, 2015; Li *et al.*, 2015; 叶霖等, 2017);与国外典型铟矿床,如韩国 Ulsan 矿床(铟含量为 10×10^{-6})、秘鲁 Ayawilca 矿床(铟含量为 68×10^{-6})、加拿大 East Kemptville 矿床(铟含量为 15.4×10^{-6})、德国 Tellerhauser 矿床(铟含量为 71×10^{-6})、美国 West Desert 矿床(铟含量为 23×10^{-6})等(Schwarz-Schampera and Herzig, 2002; Werner *et al.*, 2017; 徐净等, 2018)相比,普雄铅锌成矿带闪锌矿铟含量明显高于其数十倍,据此本文认为个旧花岗岩体北缘的普雄铅锌成矿带是重要的铟成矿带并有着重要的研究和开采价值。

目前已发现的富铟矿床几乎都与花岗岩体和富锡多金属矿床相伴产出,而且富铟矿床具有成带成片分布的特点,前人据此认为我国下一步富铟矿床的找矿方向应该以隐伏花岗岩体和富锡多金属矿床

表 1　挣财洞、老鹰窝、九头山 Pb-Zn 矿床闪锌矿及其他典型富铟矿床闪锌矿微量元素组成

Table 1　Trace element composition of sphalerite in Zhengcaidong, Laoyingwo, Jiutoushan Pb-Zn deposits and other typical indium-rich deposits

$w_B/10^{-6}$

矿床	统计	w(Fe)/%	Mn	Co	Ni	Cu	Ga	As	Cd	In	Sn	Sb	Pb	Bi	数据来源
挣财洞 (n=25)	最小值	0.15	0.004	–	–	43.82	–	–	1 163.03	26.13	5.84	–	0.98	0.003	本文
	最大值	9.44	629.7	0.24	311.88	6 346.69	3.02	0.09	3 216.23	403.88	36.81	12.95	158.41	0.05	
	平均值	3.07	214.02	0.13	44.93	794.97	0.87	0.09	1 980.86	157.44	14.59	3.21	21.44	0.02	
老鹰窝 (n=16)	最小值	0.09	–	–	–	219.05	21.03	1.37	1 347.36	378.58	158.49	3.17	12.28	–	本文
	最大值	0.66	154.67	0.48	7.62	1 487.82	115.03	83.47	1 842.99	1 060.08	1 424.54	294.07	98 328.52	0.02	
	平均值	0.25	35.85	0.3	4.08	547.68	55.41	10.89	1 462.28	631.46	432.11	30.71	11 083.08	0.01	
九头山	最小值	9.64	497.82	5.37	–	57.61	0.22	–	1 755.63	36.85	5.62	–	1.13	–	王加昇等，2024
	最大值	22.59	1 482.09	26.38	478.12	4 139.89	3.12	0.46	3 271.88	2 712.92	77.28	24.75	43.38	0.02	
	平均值	13.89	831.53	15.74	75.54	838.77	1.27	0.23	2 332.82	668.09	17.81	4.09	7.67	0.01	
都龙	最小值	8.97	601	3.26	1.77	65.94	0.7	134.7	1 157	3.3	4.23	4.77	11.77	1.06	叶霖等，2017
	最大值	12.37	3 434	687.8	34.18	19 310	7.51	24 360	2 276	3 535	105.8	48.36	74 250	329	
	平均值	10.81	1 600.19	122.11	9.17	4 422.29	2.65	2 357.74	1 664.07	426.08	34.12	14.61	5 267.01	107.85	
大厂	最小值	7.06	1 905	0.38	1.35	502	2.51	27.9	3 484	92.92	8.88	38	39.4	0.09	皮桥辉等，2015
	最大值	13.02	4 059	172	7.88	8 525	29.6	9 011	4 718	1 421	2 451	12 100	1 2351	97.1	
	平均值	10.48	3 175	14.95	3.3	2 392	10.52	1 462.1	4 247.36	903.07	411.13	1 190.44	1 308.9	20.63	
个旧	最小值	21.67	343	–	1.8	703.4	6.3	6	564.7	198.3	4.7	2	3.16	30.9	Li *et al.*，2015
	最大值	45.13	3 146	40.9	5.7	3 523	50	6 442	1 627	1 570	432.1	153.2	35 640	1 011	
	平均值	31.2	1 853.2	35.53	3.23	2 243.84	22.16	1 892.21	1 129.87	557.06	137.69	30.93	6 100.65	530.54	

–表示数值低于检测限。

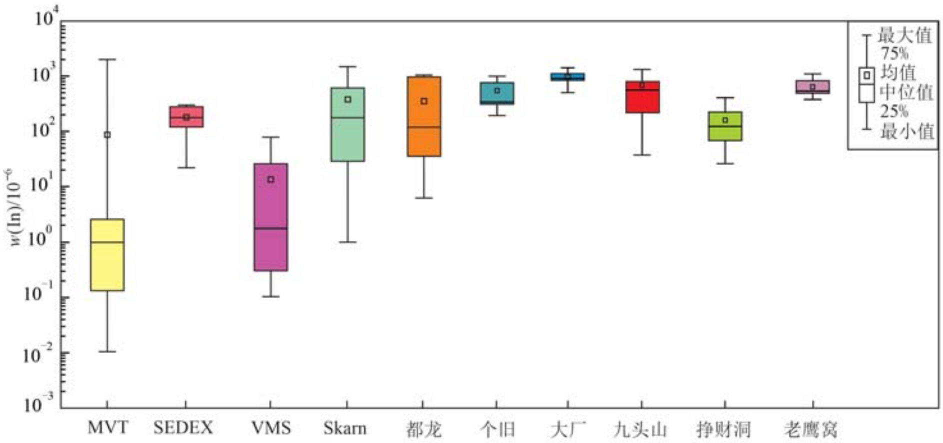

图 3 挣财洞、老鹰窝 Pb-Zn 矿床与不同类型 Pb-Zn 矿床中闪锌矿铟含量 LA-ICP-MS 原位分析对比图

Fig. 3 In situ analysis of LA-ICP-MS indium content of sphalerite in Zhengcaidong and Laoyingwo and different types of Pb-Zn deposits

MVT 型铅锌矿床数据据 Cook 等(2009)、Ye 等(2011); SEDEX 型铅锌矿床据 Ye 等(2011)、张瑞杰(2020); VMS 型铅锌矿床据 Cook 等(2009)、张辉善等(2018); Skarn 型铅锌矿床据 Ye 等(2011)、皮桥辉等(2015); 都龙矿床据田静等(2022); 个旧矿床据 Li 等(2015); 大厂矿床据皮桥辉等(2015); 九头山矿床据王加昇等(2024)

MVT Pb-Zn deposit according to Cook *et al.*, 2009; Ye *et al.*, 2011; SEDEX Pb-Zn deposit according to Ye *et al.*, 2011; Zhang Ruijie, 2020; VMS Pb-Zn deposit according to Cook *et al.*, 2009; Zhang Huishan *et al.*, 2018; Skarn Pb-Zn deposit according to Ye *et al.*, 2011; Pi Qiaohui *et al.*, 2015; Dulong deposit according to Tian Jing *et al.*, 2022; Gejiu deposit according to Li *et al.*, 2015; Dachang deposit according to Pi Qiaohui *et al.*, 2015

为线索进一步寻找大型-超大型富铟矿床(张乾等, 2019)。由于闪锌矿是铟主要的赋存矿物,全球95%的铟均来自闪锌矿(温汉捷等, 2019; 李晓峰等, 2019),因此,从本文对普雄铅锌矿成矿带中铟超常富集的发现和资源潜力评价来看,寻找富铟矿床的关键是在花岗岩体与富锡多金属矿床外围寻找与其关系密切的大中型铅锌矿床,并且离岩体和富锡多金属矿床越近、闪锌矿颜色越深的铅锌矿体是最重要的铟资源找矿靶区。

References

Cheng Yongsheng. 2012. A preliminary study on the law of rich-integrated ore of dispersed element indium[J]. Acta Mineralogica Sinica, 32(S1): 18~19(in Chinese).

Cheng Yongsheng. 2013. Discussion on distribution characteristics and production law of indium-rich deposits[J]. Acta Mineralogica Sinica, 33(S2): 199~200(in Chinese).

Cook N J, Ciobanu C L, Pring A, *et al.* 2009. Trace and minor elements in sphalerite: A LA-ICPMS study[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 73(16): 4 761~4 791.

Cook N J, Sundblad K, Valkama M, *et al.* 2011. Indium mineralisation in A-type granites in southeastern Finland: Insights into mineralogy and partitioning between coexisting minerals[J]. Chemical Geology, 284(1~2): 62~73.

Guo Zhijuan, Song Yuntao, Xu Renting, *et al.* 2020. Indium distribution and enrichment characteristics in Gejiu Sn-polymetallic orefield area in Yunnan Province[J]. Geoscience, 34(5): 908~916(in Chinese with English abstract).

Hou Zengqian, Chen Jun and Zhai Mingguo. 2020. Current status and frontiers of research on critical mineral resources[J]. Chinese Science Bulletin, 65(33): 3 651~3 652(in Chinese with English abstract).

Hu Ruizhong, Wen Hanjie, Ye Lin, *et al.* 2020. Metallogeny of critical metals in the southwestern Yangtze Block[J]. Chinese Science Bulletin, 65(33): 3 700~3 714(in Chinese with English abstract).

Ishihara S, Murakami H and Li X F. 2011a. Indium concentration in zinc ores in plutonic and volcanic environments: Examples at the Dulong and Dachang mines, South China[J]. Bulletin of the Geological Survey of Japan, 62(7~8): 259~272.

Ishihara S, Murakami H and Marquez-Zavalia M F. 2011b. Inferred indium resources of the Bolivian tin-polymetallic deposits[J]. Resource Geology, 61(2): 174~191.

Jiang Shaoyong and Wang Wei. 2022. How does the strategic key metal produce super-rich integrated ore? [J]. Earth Science, 47(10): 3 869~3 871(in Chinese).

Jiang Shaoyong, Wen Hanjie, Xu Cheng, *et al.* 2019. Earth sphere cycling and enrichment mechanism of critical metals: Major scientific issues for future research[J]. Bulletin of National Natural Science

Foundation of China, 33(2): 112~118(in Chinese with English abstract).

Li Xiaofeng, Watanabe Yasushi and Mao Jingwen. 2007. Research situation and economic value of indium deposits[J]. Mineral Deposits, 26(4): 475~480(in Chinese with English abstract).

Li Xiaofeng, Xu Jing, Zhu Yiting, *et al*. 2019. Critical minerals of indium: Major ore types and scientific issues[J]. Acta Petrologica Sinica, 35(11): 3 292~3 302(in Chinese with English abstract).

Li Xiaofeng, Yang Feng, Chen Zhenyu, *et al*. 2009. Preliminary study on the genetic mechanism of indium in Dachang tin mine in Guangxi [J]. Acta Mineralogica Sinica, 29(S1): 124~125(in Chinese).

Li Xiaofeng, Zhu Yiting and Xu Jing. 2020. Indium as a critical mineral: A research progress report[J]. Chinese Science Bulletin, 65(33): 3 678~3 687(in Chinese with English abstract).

Li Y B, Tao Y, Zhu F L, *et al*. 2015. Distribution and existing state of indium in the Gejiu tin polymetallic deposit, Yunnan Province, SW China[J]. Chinese Journal of Geochemistry, 34(4): 469~483.

Li Yuhua, Liu Fengxiang, Zhou Jiaxi, *et al*. 2019. Discovery and research significance of Puxiong niobium rare earth deposit in Jianshui, Yunnan Province[J]. Acta Mineralogica Sinica, 39(4): 484(in Chinese).

Mao Jingwen, Cheng Yanbo, Guo Chunli, *et al*. 2008. Gejiu tin polymetallic ore-field: Deposit model and discussion for several points concerned[J]. Acta Geologica Sinica, 82(11): 1 455~1 467(in Chinese with English abstract).

Mao Jingwen, Yuan Shunda, Xie Guiqing, *et al*. 2019. New advances on metallogenic studies and exploration on critical minerals of China in 21st century[J]. Mineral Deposits, 38(5): 935~969(in Chinese with English abstract).

Pi Qiaohui, Hu Ruizhong, Wang Denghong, *et al*. 2015. Enrichment of indium in west ore belt of Dachang orefield: Evidence from ore textures and sphalerite geochemistry[J]. Mineral Deposits, 34(2): 379~396(in Chinese with English abstract).

Rudnick R L and Gao S. 2014. Composition of the continental crust [C]// Turekian H D, Holland K K. Treatise on Geochemistry. 2nd ed. Oxford: Elsevier, 1~51.

Schwarz-Schampera U and Herzig P M. 2002. Indium: Geology, Mineralogy, and Economics[M]. Berlin, Heidelberg: Springer.

Tian Jing and Yang Guangshu. 2022. Trace element characteristics of sphalerite from Dulong tin-polymetallic deposit in southeast Yunnan and their geological significances[J]. Geotectonica et Metallogenia, 46(6): 1 148~1 166(in Chinese with English abstract).

Wang Jiasheng, Ye Bin, Jiang Xiaojun, *et al*. 2024. New discovery of extraordinary enrichment of indium in Jiutoushan lead-zinc deposit in Jianshui, southeastern Yunnan and its significance[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 43(2): 463~466(in Chinese).

Wang Min, Zhou Jiaxi, Liu Fengxiang, *et al*. 2020. Mineralogy and elemental geochemistry of the Puxiong Nb-REE deposit in Jianshui City, southeast Yunnan Province, SW China[J]. Acta Geologica Sinica, 94(12): 3 746~3 760(in Chinese with English abstract).

Wen Hanjie, Zhou Zhengbing, Zhu Chuanwei, *et al*. 2019. Critical scientific issues of super-enrichment of dispersed metals[J]. Acta Petrologica Sinica, 35(11): 3 271~3 291(in Chinese with English abstract).

Werner T T, Mudd G M and Jowitt S M. 2017. The world's by-product and critical metal resources part Ⅲ: A global assessment of indium [J]. Ore Geology Reviews, 86: 939~956.

Xu Jing and Li Xiaofeng. 2018. Spatial and temporal distributions, metallogenic backgrounds and processes of indium deposits[J]. Acta Petrologica Sinica, 34(12): 3 611~3 626(in Chinese with English abstract).

Ye L, Cook N J, Ciobanu C L, *et al*. 2011. Trace and minor elements in sphalerite from base metal deposits in South China: A LA-ICPMS study[J]. Ore Geology Reviews, 39(4): 188~217.

Ye Lin, Liu Yuping, Zhang Qian, *et al*. 2017. Trace and rare earth elements characteristics of sphalerite in Dulong super large Sn-Zn polymetallic ore deposit, Yunnan Province[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 47(3): 734~750(in Chinese with English abstract).

No. 209 Geological Party, Geological Bureau of Yunnan Nuclear Industry. 2018a. Verification Report of Resource Reserves of Pb-Zn Mine in Caidong, Puxiong Township, Jianshui County, Yunnan Province [R](in Chinese).

No. 209 Geological Party, Geological Bureau of Yunnan Nuclear Industry. 2018b. Verification Report of Laoyingwo Pb-Zn Mine Resource Reserves in Jianshui County, Yunnan Province[R] (in Chinese).

Zhai Mingguo, Wu Fuyuan, Hu Ruizhong, *et al*. 2019. Critical metal mineral resources: Current research status ang scientific issues[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 33(2): 106~111(in Chinese with English abstract).

Zhang Huishan, Li Yanguang, Quan Shoucun, *et al*. 2018. Geochemical characteristics of metallic sulfides from the Kaladaban deposit in Xinjiang and its implications for Pb-Zn ore-forming mechanism[J]. Acta Petrologica Sinica, 34(8): 2 295~2 311(in Chinese with English abstract).

Zhang Qian, Liu Zhihao, Zhan Xinzhi, *et al*. 2004. Trace element geochemistry of Meng'entaolegai Ag-Pb-Zn-in deposit, Inner Mongolia, China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 24(1): 39~47(in Chinese with English abstract).

Zhang Qian and Wang Dapeng. 2019. Metallogenic regularity and prospecting direction of indium-rich deposits in China[C]//Abstracts of the 9th National Metallogenic Theory and Prospecting Method Symposium(in Chinese with English abstract).

Zhang Ruijie. 2020. Metallogenic Metal Source of Jinding Giant Lead-Zinc Deposit, Yunnan Province: Constraints of Trace Elements of Sphalerite and Lead, Zinc and Strontium Isotopic Compositions[D]. China University of Geosciences (Beijing), 28~37(in Chinese with English abstract).

Zhang Yinping, Shao Yongjun, Xiong Yiqu, *et al*. 2022. Metallogenic indication from geochemical characteristics of garnet in Gejiu Sn-Cu ore-concentrated area, Yunnan Province[J]. Mineral Deposits, 41(4): 682~701(in Chinese with English abstract).

Zhao T P, Chen C, He X H, *et al*. 2022. A synthesis of the geology, spatial-temporal distribution and enrichment mechanism of granite-related indium deposits in China[J]. Ore Geology Reviews, 146: 104932.

附中文参考文献

成永生. 2012. 关于分散元素铟的富集成矿规律初步探讨[J]. 矿物学报, 32(S1): 18~19.

成永生. 2013. 关于富铟矿床分布特征及其产出规律的探讨[J]. 矿物学报, 33(S2): 199~200.

郭志娟, 宋云涛, 徐仁廷, 等. 2020. 云南个旧锡多金属矿集区稀散元素铟的分布富集特征[J]. 现代地质, 34(5): 908~916.

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): 3 651~3 652.

胡瑞忠, 温汉捷, 叶 霖, 等. 2020. 扬子地块西南部关键金属元素成矿作用[J]. 科学通报, 65(33): 3 700~3 714.

蒋少涌, 王 微. 2022. 战略性关键金属是如何发生超常富集成矿的?[J]. 地球科学, 47(10): 3 869~3 871.

蒋少涌, 温汉捷, 许 成, 等. 2019. 关键金属元素的多圈层循环与富集机理: 主要科学问题及未来研究方向[J]. 中国科学基金, 33(2): 112~118.

李晓峰, Watanabe Yasushi, 毛景文. 2007. 铟矿床研究现状及其展望[J]. 矿床地质, 26(4): 475~480.

李晓峰, 徐 净, 朱艺婷, 等. 2019. 关键矿产资源铟: 主要成矿类型及关键科学问题[J]. 岩石学报, 35(11): 3 292~3 302.

李晓峰, 杨 锋, 陈振宇, 等. 2009. 广西大厂锡矿铟的成因机制初探[J]. 矿物学报, 29(S1): 124~125.

李晓峰, 朱艺婷, 徐 净. 2020. 关键矿产资源铟研究进展[J]. 科学通报, 65(33): 3 678~3 687.

李余华, 刘凤祥, 周家喜, 等. 2019. 云南建水普雄铌稀土矿床的发现与研究意义[J]. 矿物学报, 39(4): 484.

毛景文, 程彦博, 郭春丽, 等. 2008. 云南个旧锡矿田: 矿床模型及若干问题讨论[J]. 地质学报, 82(11): 1 455~1 467.

毛景文, 袁顺达, 谢桂青, 等. 2019. 21世纪以来中国关键金属矿产找矿勘查与研究新进展[J]. 矿床地质, 38(5): 935~969.

皮桥辉, 胡瑞忠, 王登红, 等. 2015. 广西大厂锡多金属矿田西矿带稀散元素铟的富集规律研究——来自矿石组构和闪锌矿地球化学的证据[J]. 矿床地质, 34(2): 379~396.

田 静, 杨光树. 2022. 滇东南都龙锡多金属矿床中闪锌矿微量元素组成特征及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 46(6): 1 148~1 166.

王加昇, 叶 彬, 江小均, 等. 2024. 滇东南建水九头山铅锌矿床铟超常富集新发现及其意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 43(2): 463~466.

王 敏, 周家喜, 刘凤祥, 等. 2020. 滇东南建水普雄铌稀土矿床矿物学和元素地球化学特征[J]. 地质学报, 94(12): 3 746~3 760.

温汉捷, 周正兵, 朱传威, 等. 2019. 稀散金属超常富集的主要科学问题[J]. 岩石学报, 35(11): 3 271~3 291.

徐 净, 李晓峰. 2018. 铟矿床时空分布、成矿背景及其成矿过程[J]. 岩石学报, 34(12): 3 611~3 626.

叶 霖, 刘玉平, 张 乾, 等. 2017. 云南都龙超大型锡锌多金属矿床中闪锌矿微量及稀土元素地球化学特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 47(3): 734~750.

云南省核工业二〇九地质大队, 2018a. 云南省建水县普雄乡挣财洞铅锌矿资源储量核实报告[R].

云南省核工业二〇九地质大队, 2018b. 云南省建水县老鹰窝铅锌矿资源储量核实报告[R].

翟明国, 吴福元, 胡瑞忠, 等. 2019. 战略性关键金属矿产资源: 现状与问题. 中国科学基金, 33(2): 106~111.

张辉善, 李艳广, 全守村, 等. 2018. 阿尔金喀腊达坂铅锌矿床金属硫化物元素地球化学特征及其对成矿作用的制约[J]. 岩石学报, 34(8): 2 295~2 311.

张 乾, 刘志浩, 战新志, 等. 2004. 内蒙古孟恩陶勒盖银铅锌铟矿床的微量元素地球化学[J]. 矿物学报, 24(1): 39~47.

张 乾, 王大鹏. 2019. 中国富铟矿床的成矿规律及找矿方向[C]//第九届全国成矿理论与找矿方法学术讨论会论文摘要集.

张瑞杰. 2020. 云南金顶超大型铅锌矿床成矿金属来源——闪锌矿微量元素及铅、锌、锶同位素组成制约[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 28~37.

张银平, 邵拥军, 熊伊曲, 等. 2022. 云南个旧锡铜矿集区石榴子石地球化学特征及成矿指示[J]. 矿床地质, 41(4): 682~701.