

西藏冈底斯-喜马拉雅造山系区域地球化学元素背景特征及找矿预测

李洪梁¹, 刘洪^{2,3}, 黄勇¹, 郑强¹, 黄岗¹

(1. 中国地质调查局军民融合地质调查中心, 四川成都 610036; 2. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川成都 610218; 3. 成都理工大学地球科学学院, 四川成都 610059)

摘要: 区域地球化学元素背景值是区域找矿预测的重要地球化学指标。选取西藏冈底斯-喜马拉雅造山系, 整理统计区域地球化学数据, 以算术平均值(X)加减3倍标准差(S)进行迭代剔除离群值, 统计剩余数据中位数(m), 查明了不同次级单元中 Au、Ag、Cu 等 39 种元素的背景值及富集特征, 并进行找矿预测。结果显示, 西藏冈底斯-喜马拉雅造山系区域地球化学 39 种元素背景变化较大, 差异显著, 具体表现为喜马拉雅地块富集 Li、Be、Sn、W、Au、Sb、Pb、Zn 等成矿元素, 雅鲁藏布江结合带主要富集 Au、Cr; 拉达克-冈底斯-察隅弧盆系 Cu、Mo、Pb、Zn、Au、Ag 等成矿元素富集明显, 且从北向南富集程度逐渐增高。综合分析认为, 不同大地构造单元差异化的构造-岩浆演化过程导致元素差异富集, 进而发育不同成矿元素组合类型的成矿作用。以此为基础, 结合元素组合特征, 圈定 I 类找矿远景区 7 处、II 类找矿远景区 9 处和 III 类远景区 17 处。研究结果对新一轮找矿战略突破行动具有一定的指导意义。

关键词: 背景值; 找矿预测; 区域地球化学; 冈底斯-喜马拉雅; 找矿远景区

中图分类号: P618.41

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2024)06-1484-29

Regional geochemical element background characteristics and prospecting prediction of the Gangdese-Himalayan orogenic system in Xizang

LI Hong-liang¹, LIU Hong^{2,3}, HUANG Yong¹, ZHENG Qiang¹ and HUANG Gang¹

(1. Civil-Military Integration Center of China Geological Survey, Chengdu 610036, China; 2. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610218, China; 3. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Background value of geochemical elements is an important geochemical index for regional prospecting prediction. The Gangdese-Himalayan orogenic system in Xizang was selected to collate and clean the regional geochemical data. The outliers were iterated using the mean value (X) plus and minus three times standard deviation (S) as the threshold value, and the median (m) of the remaining data was calculated to find out the background values and enrichment characteristics of 39 elements in different secondary units, then the prospecting prediction was made. The results show that the geochemical background of 39 elements of Gangdese-Himalaya in Xizang is highly varied and differentially enriched. Metallogenic elements such as Li, Be, Sn, W, Au, Sb, Pb and Zn are enriched in the Himalayan terrane, while Au and Cr are mainly enriched in the Yarlung Zangbo River suture zone. The Ladakh-Gangdese-Chayu arc basin system is enriched with Cu, Mo, Pb, Zn, Au, Ag and other ore-forming elements, and the enrichment degree increases gradually from north to south. The comprehensive analysis shows that the different tectonic-magmatic evolution processes of different tectonic units lead to the differential enrichment

收稿日期: 2024-08-12; 接受日期: 2024-10-22; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20243086, DD20240014, DD20243084)

作者简介: 李洪梁(1990-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事青藏高原区域及矿产地质研究, E-mail: amsep@qq.com; 通讯作者: 黄岗(1984-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事矿产地质调查及相关科研工作, E-mail: huangg523@163.com。

of elements, and then develop different types of mineralization. On this basis, according to the combination characteristics of elements, 7 prospecting prospects of class I, 9 prospecting prospects of class II and 17 prospecting prospects of class III are delineated. The results of the study have certain guiding significance for the new round of prospecting strategy breakthrough action.

Key words: background; prospecting prediction; regional geochemistry; Gangdese-Himalaya; prospecting potential area

Fund support: China Geological Survey Project (DD20243086, DD20240014, DD20243084)

西藏冈底斯-喜马拉雅造山系地处班公湖-怒江对接带以南、印度次大陆以北的广袤区域,主体为冈瓦纳大陆北缘中生代多岛弧盆系转化而来的造山系(Pan *et al.*, 2012),历经特提斯演化和印度-亚洲大陆碰撞造山过程,造就了区内多期次构造-岩浆活动和多类型、大规模成矿作用。已有研究及找矿勘查成果显示,冈底斯-喜马拉雅造山系成矿地质条件优越,矿产资源丰富,矿种齐全,截至目前已发现 Cu、Mo、Pb、Zn、Sb、Fe、Au、Cr 等各类矿床(点)近 1 700 处,找矿潜力巨大,是大力推进矿产资源调查评价的重要成矿带(李光明等, 2017a)。带内分布有基础调查区、重点调查区、重点勘查区和重要矿山深部等“四区”重点区块 29 个,具多个巩固和拟新增的大型资源基地。

西藏冈底斯-喜马拉雅造山系东西绵延逾 2 000 km,但一方面因成矿地质条件的差异,已发现的各类金属矿产资源主要分布在日喀则以东地区(图 1),如与高氧逸度的含硫、富水埃达克质岩浆有关的 Cu-Mo-Au 矿床(李光明等, 2005; 刘洪等, 2019a, 2019b; 唐菊兴, 2019; Zhang *et al.*, 2020; Zheng *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2023; Tang *et al.*, 2024),受控于晚碰撞(40~26 Ma)近东西向挤压构造和后碰撞(25~0 Ma)近南北向伸展构造的 Pb-Zn-Ag-(Sb)矿床(Duan *et al.*, 2016; 李洪梁等, 2020; Cao *et al.*, 2023),与大洋俯冲-大陆碰撞相关的造山型 Au 矿床(李洪梁等, 2019a, 2021; Zhang *et al.*, 2020),以及近年来新发现的与喜马拉雅淡色花岗岩密切相关的 Li-Be-Sn-W 多金属矿床(李光明等, 2017b, 2022)等,而具有相似成矿地质背景的日喀则以西地区,地质工作程度整体偏低,目前仅有朱诺 Cu 矿、尼雄和隆格尔 Fe 矿、马攸木 Au 矿等几处中-大型矿床。另一方面,大量矿床(点)还停留在找矿线索阶段,未作预查以上评价,因此西藏冈底斯-喜马拉雅的资源家底有待进一步摸清。

获取成矿元素背景作为地球化学测量的主要工

作内容之一,是指导区域找矿预测的重要参数。林才浩等(1996)统计了福建省水系沉积物微量元素含量特征,并进行了成矿远景预测;杜佩轩等(2001)统计了新疆地区西伯利亚板块、准噶尔板块和塔里木板块等 I 级构造单元水系沉积物元素背景值;程志中等(2011)计算了中国南方地区 76 种元素的平均值;刘驰等(2013)计算了我国森林沼泽景观区水系沉积物 39 种元素的系列参数;史长义等(2016)计算了中国水系沉积物 39 种元素系列背景值,为矿产资源远景评价提供了参考依据。尽管以往的区域性地球化学测量工作积累了海量高质量数据,但研究成果区域跨度大,或以省份、景观区等为单元计算相关参数,而对控制成矿地质背景的地体或构造单元等次级单元有所弱化,因此有必要进一步梳理数据,细化不同构造单元的各元素背景值,为矿产勘查提供基础性地球化学数据。本文选取西藏冈底斯-喜马拉雅造山系为研究区,对 1:20 万和 1:50 万区域地球化学数据进行了整理,查明不同次级单元各元素的背景参数、富集特征及其与成矿作用类型的关联,进而实现找矿远景预测,以更好地服务新一轮找矿战略突破行动。

1 区域地质概况

1.1 地质背景

冈底斯-喜马拉雅造山系位于青藏高原南部,起源于冈瓦纳大陆北缘,是中生代以来众多微地体经多期次镶嵌拼贴、碰撞形成的近东西向复合块体(Kapp *et al.*, 2007; Pan *et al.*, 2012; 张泽明等, 2019)。以印度河-雅鲁藏布江结合带为界,冈底斯-喜马拉雅造山系可分为南侧的喜马拉雅地块和北侧的拉达克-冈底斯-察隅弧盆系(图 1)。早-中三叠世,冈底斯岛弧带从冈瓦纳大陆北缘裂离,形成雅鲁藏布江洋初始洋盆。晚三叠世,冈底斯岛弧带中北部进一步拉张,发育狮泉河-纳木错-嘉黎弧间洋盆,

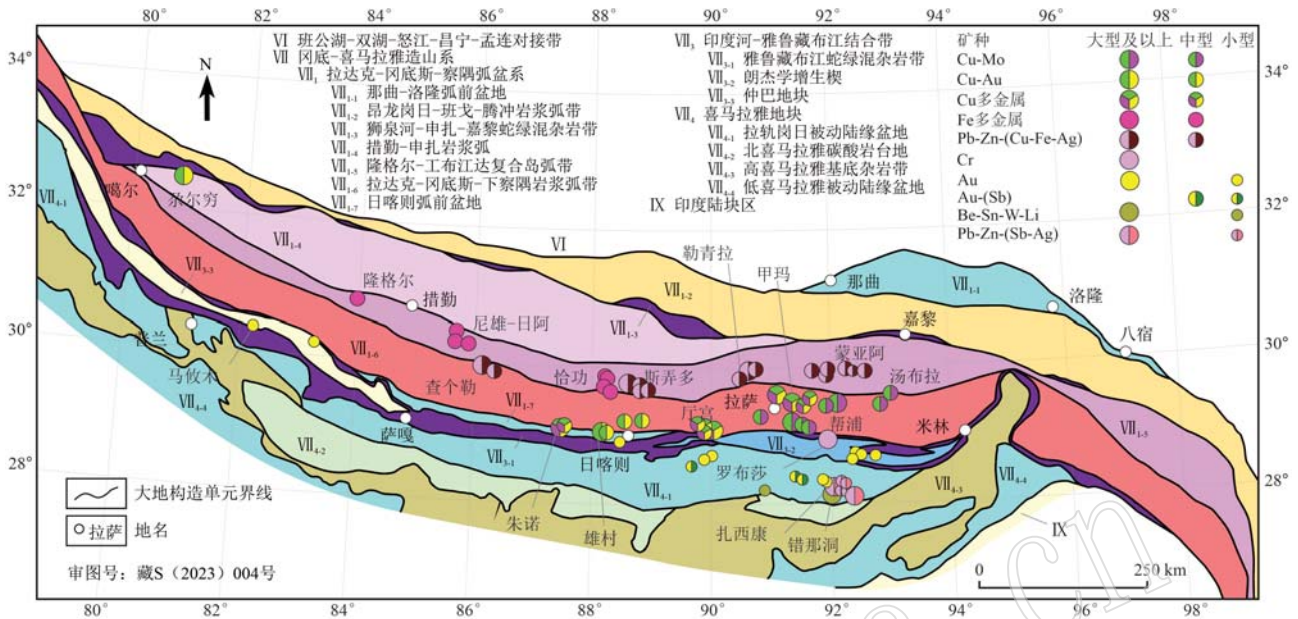


图1 西藏冈底斯-喜马拉雅大地构造单元区划与主要矿床(点)分布图

Fig. 1 Geotectonic division and distribution map of major ore deposits (spots) of Gangdese-Himalaya in Xizang
 地图投影参数: 兰伯特等角圆锥投影, 中央子午线 89°, 第一标准纬度 29°, 第二标准纬度 35°, 投影原点纬度 30°; 大地构造单元区划据 Pan *et al.* (2012) 改; 矿床(点)数据引自李光明等(2021), 谢富伟等(2022), 张志等(2022), Cao *et al.* (2023)
 map projection parameters: Lambert isometric conic projection, central meridian 89°, first standard latitude 29°, second standard latitude 35°, projection origin latitude 30°; tectonic unit zone was revised according to Pan *et al.* (2012); deposits (spots) data cited from Li Guangming *et al.* (2021), Xie Fuwei *et al.* (2022), Zhang Zhi *et al.* (2022) and Cao *et al.* (2023)

将冈底斯岛弧带进一步撕裂为南、北冈底斯岛弧带 (Pan *et al.*, 2012)。进入侏罗纪, 特别是中-晚侏罗世, 雅鲁藏布江洋强烈扩张, 冈瓦纳大陆北缘由被动大陆边缘逐渐转化为陆缘裂谷, 至此初步形成了冈底斯-喜马拉雅造山系的基本构造格架, 从南向北依次为喜马拉雅被动陆缘裂谷、雅鲁藏布江洋盆、南冈底斯岛弧带、狮泉河-纳木错-嘉黎洋盆和北冈底斯岛弧带。至白垩纪, 以雅鲁藏布江洋和狮泉河-纳木错-嘉黎洋为代表的新特提斯洋相继闭合 (Pan *et al.*, 2012; Domeier and Torsvik, 2014; Kapp and DeCelles, 2019; Zhu *et al.*, 2022), 标志着弧间、弧后洋盆消失, 弧-弧或弧-陆碰撞造山开启。新生代以来, 青藏高原内部各地块全面拼合, 进入陆内汇聚造山阶段, 形成了世界上最高的山脉, 时至今日仍在持续隆升, 因此也被称为“造山的高原” (许志琴等, 2006)。

喜马拉雅地块以大面积出露前寒武系变质岩和奥陶纪-白垩纪基本连续沉积的海相地层为特征。地块内岩浆活动相对较弱, 除前寒武纪变质岩系中的深成侵入体及基性火山岩外, 主要在二叠纪-白垩纪地层中分布以玄武岩为主的火山岩夹层, 以及奥

陶纪、新生代(主要为中新世)花岗岩; 雅鲁藏布江结合带除仲巴-札达地区发育古生界-白垩系稳定型浅海沉积相外, 其余多为蛇绿混杂岩和增生楔杂岩, 且蛇绿混杂岩基质显示出自西向东逐渐变新的特征。结合带内以中生代大面积、大规模的超基性-基性岩浆活动为显著特色。其中, 侵入岩浆活动主要表现为广泛分布洋壳扩张期的二辉橄榄岩、方辉橄榄岩、橄榄辉石岩等地幔橄榄岩, 单辉/二辉橄榄岩、橄榄二辉岩、橄榄辉石岩、辉长岩和辉长斜长岩等堆晶杂岩, 以及层状辉长岩、辉长辉绿岩、辉绿岩及斜长花岗岩等席状岩床(墙)杂岩; 火山岩浆活动则更为广泛, 从二叠系-古近系地层中均有分布, 以玄武质火山岩为主, 含少量中-酸性火山岩、火山角砾岩和凝灰岩, 记录了雅鲁藏布江弧后洋盆扩张、发展到消亡的整个过程 (王立全等, 2013)。

拉达克-冈底斯-察隅弧盆系, 又被称为拉萨地体、冈底斯-念青唐古拉板片、冈底斯造山带等 (Dewey *et al.*, 1989; Yin and Harrison, 2000; Zhang *et al.*, 2017; 李洪梁等, 2022), 出露元古宙-新近纪地层, 其中前寒武纪变质岩系分布较少, 早古生代地

层出露较完整,上古生界分布较广,其中上石炭统-下二叠统为海相含冰碛杂砾岩。侏罗系-古近系出露广泛,尤以古近纪多期次大面积火山-沉积岩分布面积最广。拉达克-冈底斯-察隅弧盆系以发育巨大的花岗岩基和广泛出露中-新生代火山岩为特征,是青藏高原最重要的岛弧岩浆岩带(王立全等, 2013),尤其是弧盆系南侧的冈底斯岩浆岩带,经历了长期的幕式岩浆作用,发育晚白垩世、早始新世和早-中中新世3个峰期岩浆作用,以大面积展布的花岗岩基和广泛分布的林子宗火山岩系为典型代表(Yin and Harrison, 2000; Chung *et al.*, 2005; Zhu *et al.*, 2017; 张泽明等, 2019; 李洪梁等, 2019b, 2023, 2024; Zhu *et al.*, 2022),为本区最显著的特点。

1.2 成矿特征

与冈底斯-喜马拉雅复杂地质演化相伴生的是区域大规模、多期次、多类型成矿作用。喜马拉雅地块新生代以来经历了从早期南北向挤压到晚期南北向伸展拆离和东西向伸展的演化过程,形成了与中-基性岩脉、中-低温热液和变质核杂岩核部淡色花岗岩密切相关的 Au(Sb)、Pb-Zn 和稀有金属成矿作用,主要分布于拉轨岗日被动陆缘盆地和北喜马拉雅碳酸盐岩台地,两者合称北喜马拉雅或特提斯喜马拉雅,因此有学者将其命名为北喜马拉雅金锑多金属成矿带或喜马拉雅前陆褶皱带金锑成矿带(戚学祥等, 2008; 郑有业等, 2014),目前已发现明赛、姐纳各普、浪卡子 Au 矿,马扎拉、拉琼 Au-Sb 矿,沙拉岗 Sb 矿,扎西康、西午、泽当、柯月 Pb-Zn 矿以及嘎波 Li 矿、错那洞 Be-Sn-W 矿(图1)(Duan *et al.*, 2016; 李洪梁等, 2016, 2017, 2020, 2021; Xie *et al.*, 2017; 李光明等, 2017b, 2022; Zhang *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2021; 张志等, 2022; 郭伟康等, 2023; Lan *et al.*, 2024)等;雅鲁藏布江结合带是雅鲁藏布江洋盆闭合的痕迹,以 Au、Cr 成矿作用为主,尤其是 Au,是印度-亚洲板块主碰撞造山背景下,新特提斯洋壳板片回卷、断离的产物。带内分布有马攸木、邦布、念扎、折木朗 Au 矿等(Jiang *et al.*, 2009; Zhai *et al.*, 2014; Sun *et al.*, 2016; 王庆飞等, 2020; Zheng *et al.*, 2020; Chen *et al.*, 2022),是西藏重要的造山型金矿带,有望进一步成为青藏高原南部重要的“金腰带”(李光明等, 2021); Cr 成矿作用主要发育于泽当-罗布莎一带,典型矿床为罗布莎、仁布(图1)。

拉达克-冈底斯-察隅弧盆系夹持于雅鲁藏布江

结合带和班公湖-怒江结合带之间,历经两侧大洋双向俯冲、主碰撞挤压造山和后碰撞伸展等复杂地质演化过程(Pan *et al.*, 2012),造成岩浆活动强烈,成矿作用显著,目前已发现的矿床主要分布在狮泉河-申扎-嘉黎蛇绿混杂岩带以南,特别是在隆格尔-工布江达复合岛弧带和拉达克-冈底斯-下察隅岩浆弧带,分布有以亚贵拉、拉屋、蒙亚阿、勒青拉、斯弄多、尼雄-日阿、驱龙、甲玛、雄村、厅宫、汤布拉、朱诺、冲江、帮浦等一系列大型-超大型矿床为代表的矽卡岩型 Cu-Pb-Zn-Ag-(Fe) 矿床、斑岩-矽卡岩型 Cu-Mo-Pb-Zn-Ag 矿床和斑岩-浅成低温热液型 Cu-Au 矿床(图1)(唐菊兴, 2014, 2019; 王立全等, 2015; 李光明等, 2017a; Xie *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2020; 刘洪等, 2020; Zheng *et al.*, 2022; 欧阳渊等, 2023; Tang *et al.*, 2024)等,已成为我国重要的资源基地。

2 数据来源与处理

2.1 数据来源

数据来源于中国西南地区区域地球化学勘查数据。本次研究裁剪了西藏自治区班公湖-双湖-怒江对接带以南的数据,利用 GeoIPAS V4.5 进行数值、坐标(含重复坐标)检查,获得有效数据量 53 514 条,涉及 1:20 万图幅 26 幅,1:50 万图幅 8 幅,各图幅数据来源详见表 1。区域地球化学勘查采样方法以水系沉积物测量为主,土壤测量为辅,1:20 万工作基本采样密度 1~2 点/km²,部分工作困难地区为 1 点/4 km²,1:50 万工作基本采样密度为 16 点/km²。样品全部为无污染样品加工,采用了统一的多元素多方法配套分析方案和分析质量监控系统,测试了 32 种元素和 7 种氧化物,保证了样品质量,使得数据具有广泛的代表性(谢学锦等, 2009; 史长义等, 2016)。据不完全统计,利用全国区域地球化学勘查数据已圈定异常 6 万余处,发现各类矿床 2 000 余个,进一步证实全国区域地球化学勘查数据质量可靠(史长义等, 2016; 王永华, 2019)。

2.2 数据处理

在勘查地球化学领域,背景值的确定还存在一定争议,焦点在于采用算术平均值($\bar{X}$),还是中位数(m)(史长义等, 2016)。一般情况下,地质工作者采用剔除离群数据后剩余数据集的算术平均值($\bar{X}$)作为背景值,但前提仍是剔除后的数据在统计学上需

表 1 西藏冈底斯-喜马拉雅造山系区域地球化学数据源一览表(王永华, 2019)

Table 1 List of regional geochemical data sources of the Gangdese-Himalayan orogenic system in Xizang (Wang Yonghua *et al.*, 2019)

序号	比例尺	图幅号	图幅名	面积/km ²	完成单位	工作年份
1	1:200 000	H4619	曲水	7 013	西藏自治区地勘局地质调查院	1987~1990
2	1:200 000	H4620	拉萨	7 013	西藏自治区地勘局地质调查院	1986~1988
3	1:200 000	H4621	下巴淌	7 013	西藏自治区地矿局区调队	1990~1992
4	1:200 000	H4622	雪咯	7 013	西藏自治区地矿局区调队	1992~1994
5	1:200 000	H4623	林芝	7 013	甘肃省地质调查院	2000~2002
6	1:200 000	H4624	波密	7 013	海南省地质调查院	2000~2002
7	1:200 000	H4625	浪卡子	7 066	青海省地球化学勘查队	1988~1991
8	1:200 000	H4626	泽当	7 066	青海省地球化学勘查队	1988~1991
9	1:200 000	H4627	加查	7 066	西藏自治区地矿局区调队	1990~1992
10	1:200 000	H4628	朗县	7 066	西藏自治区地矿局区调队	1992~1994
11	1:200 000	H4629	米林县	7 066	甘肃省地质调查院	2000~2002
12	1:200 000	H4630	墨脱	7 066	河南省地质调查院	2000~2002
13	1:200 000	H4631	洛热幅	6 274	西藏自治区地矿局区调队	1995~1997
14	1:200 000	H4632	拉康	7 052	西藏自治区地矿局区调队	1995~1997
15	1:200 000	H4633	隆子	7 119	西藏自治区地矿局区调队	1995~1997
16	1:200 000	H4707	洛隆	6 911	青海省地球化学勘查队	1986~1989
17	1:200 000	H4713	八宿	6 962	青海省地球化学勘查队	1990~1992
18	1:200 000	H4714	察雅	6 962	云南省地矿局物化探大队	1987~1990
19	1:200 000	H4719	松宗	7 013	青海省地球化学勘查队	1990~1992
20	1:200 000	H4720	左贡	7 013	云南省地矿局物化探大队	1987~1990
21	1:200 000	H4721	芒康	7 013	云南省地矿局物化探大队	1986~1989
22	1:200 000	H4725	松冷	7 066	云南省地矿局物化探大队	1990~1992
23	1:200 000	H4726	竹瓦根	7 066	云南省地矿局物化探大队	1990~1992
24	1:200 000	H4727	盐井	7 066	云南省地矿局物化探大队	1986~1989
25	1:200 000	H4732	察隅	4 425	云矿资源物化探院	2001~2003
26	1:200 000	H4733	德钦县	6 818	云南省地质调查院	2000~2001
27	1:500 000	H44B	普兰	58 650	西藏自治区地质调查院	2001~2003
28	1:500 000	H44D	巴巴扎东	7 161	西藏自治区地矿厅区调队	1996~1998
29	1:500 000	H45A	措勤	62 200	西藏自治区地矿厅区调队	1994~1996
30	1:500 000	H45B	申扎	62 200	西藏自治区地矿局物探大队	1991~1993
31	1:500 000	H45C	萨嘎	50 655	西藏自治区地矿厅区调队	1996~1998
32	1:500 000	H45D	日喀则	62 352	江西省地矿局物化探大队	1988~1991
33	1:500 000	H46A	那曲	62 200	西藏自治区地矿局物探大队	1987~1989
34	1:500 000	H46B	嘉黎	62 200	江西省地矿局物化探大队	1989~1992

符合正态分布,然而对西藏冈底斯-喜马拉雅区域地球化学勘查数据的整理发现,仅 Co、F、La、Li、P、Y、Zr 等少数元素符合正态分布(图 2)。由此,不少学者提出在数据量较大时,利用中位数(m)作为背景值的度量值,因为中位数(m)具有很强的抗干扰能力(Kürzl, 1988),对于跨图幅和区域性数据处理、编图时,利用中位数作为背景值的估算值的误差相较于平均值(X)更小,且得到了很好的应用效果(Reimann *et al.*, 2005; 史长义等, 2016)。

因此,本文首先利用 GeoIPAS V4.5 软件迭代剔除算术平均值(X)加减 3 倍标准差(S)剔除原始数

据中的离群数据,然后计算剩余数据的中位数(m),以此为背景值。结果显示,离群数据剔除率最高 3.74%,不影响背景值计算,保证了数据具有较强的代表性。

3 统计单元及其背景特征

3.1 统计单元

班公湖-怒江结合带以南的冈底斯-喜马拉雅地区内部单元划分方案较多,但从地质学角度来看,主要包括大地构造单元划分方案和成矿单元划分方

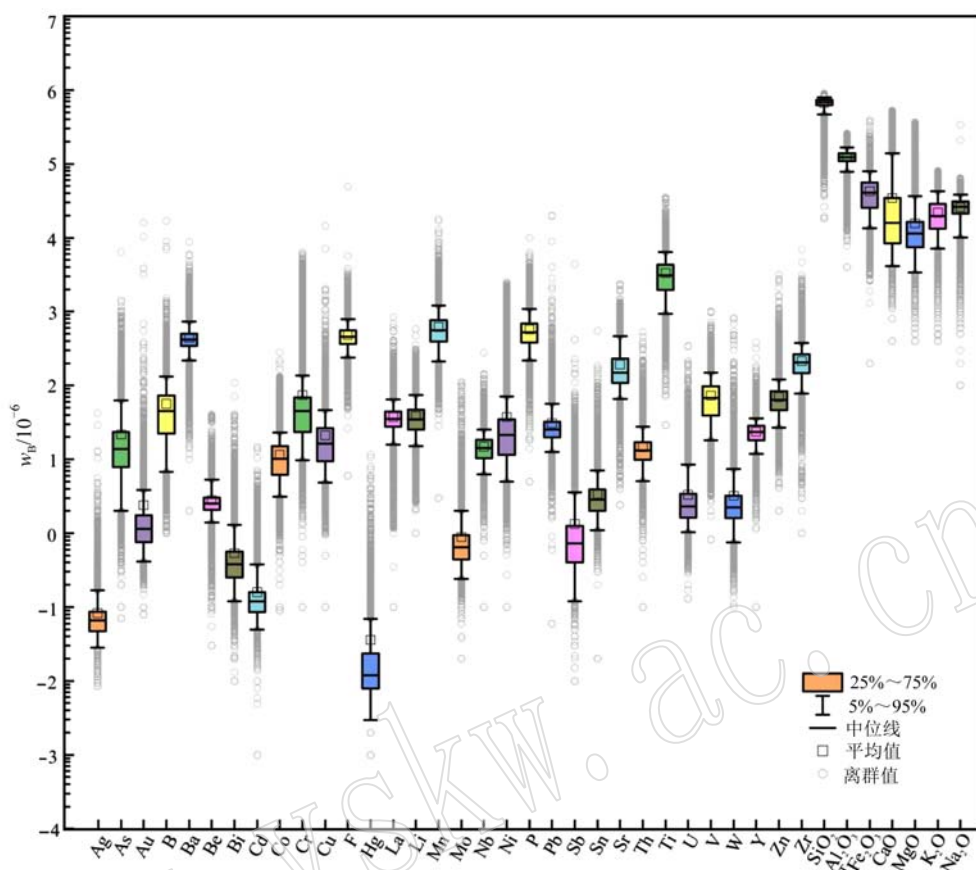


图2 西藏冈底斯-喜马拉雅区域地球化学数据箱型图

Fig. 2 Box plot of regional geochemical data of Gangdese-Himalaya in Xizang

案。前者是在对大地构造研究的基础上,结合特定构造部位和构造时期所发生的主要地质事件,并将在这一事件中所形成特定的岩石-构造组合厘定为优势大地构造相(亚相),分析其与相邻构造部位优势大地构造相之间的时空联系和动力学背景,并综合地球物理及地球化学等信息而厘定的各级大地构造单元,可细分为Ⅰ级、Ⅱ级和Ⅲ级(Pan *et al.*, 2012)。冈底斯-喜马拉雅造山系为Ⅰ级构造单元,由南向北划分为喜马拉雅地块、雅鲁藏布江结合带、拉达克-冈底斯-察隅弧盆系3个Ⅱ级构造单元和拉轨岗日被动陆缘盆地、雅鲁藏布江蛇绿混杂岩带、那曲-洛隆弧前盆地等14个Ⅲ级构造单元(表2)(潘桂棠等, 2013);后者主要依据区域成矿的地质构造环境和区域成矿作用的性质、产物、强度及其他矿化信息进行分类(徐志刚等, 2008)。徐志刚等(2008)依托全国矿产资源潜力评价,将冈底斯-喜马拉雅划分为2个成矿省和5个成矿带(表2)。王立全等(2015)将冈底斯-喜马拉雅划分为1个成矿域、2个

成矿省和7个成矿带(表2)。在此分类基础上,李光明等(2017a)结合西藏自治区实际,结合成矿大地构造背景,将其划分为1个成矿省、2个成矿带和5个成矿亚带(表2)。

由于区域地质构造与成矿密切相关,因此同时代成矿单元多与大地构造单元重合(徐志刚等, 2008),如拉达克-冈底斯-下察隅岩浆弧带与日喀则弧前盆地,即狭义的冈底斯岩浆岩带或冈底斯岩浆弧(张泽明等, 2019; 孟元库等, 2022),与冈底斯岩浆弧 Cu-Au-Mo-Fe-Sb-Pb-Zn 成矿带、南冈底斯-下察隅 Cu-Pb-Zn-Au-Ag(-W-Mo)成矿亚带重合,雅鲁藏布江结合带与雅鲁藏布江 Cr-Au-Ag-As-Sb 成矿带、雅鲁藏布江 Cr-Pt-Au 成矿亚带重合等等,但两者也存在一定差异,如李光明等(2017a)等将西藏冈底斯-喜马拉雅成矿带的范围定义为永珠-纳木错-嘉黎蛇绿混杂岩带与中华人民共和国国界之间,与潘桂棠等(2013)的大地构造单元划分方案限定的范围有所不同,再如部分成矿带(亚带)范围涵盖了多个Ⅲ

表 2 西藏冈底斯-喜马拉雅成矿带与构造单元划分方案
Table 2 Metallogenic belt and tectonic units division scheme of Gangdese-Himalaya in Xizang

成矿带区划方案 1 (徐志刚等, 2008)	构造单元区划方案 (潘桂棠等, 2013)	成矿带区划方案 2 (王立全等, 2015)	成矿带区划方案 3 (李光明等, 2017)
冈底斯-喜马拉雅 (VII)			
冈底斯成矿省		冈底斯-喜马拉雅成矿域	藏中-喜马拉雅成矿省
拉达克-冈底斯-察隅弧系 (VII ₁)		冈底斯-念青唐古拉成矿省	冈底斯成矿带
班戈-腾冲 Sn-W-Be-Li-Fe-Pb-Zn 成矿带		那曲-比如 Cr-Au-Pb-Zn 成矿带	
昂龙岗日-班戈-腾冲岩浆带 (VII _{1,2})		班戈-勃舒拉岭-腾冲 Sn-W-Cu-Pb-Zn-Au 成矿带	
狮泉河-申扎 (岩浆弧) W-Mo(Cu-Fe)-B-砂金成矿带		措勤-申扎 Au-Fe-Cu-W-Mo 成矿带	措勤-申扎 Au-Cu-Fe-Pb-Zn-W-Mo 成矿亚带
隆格尔-工布江达复合岛弧带 (VII _{1,5})		隆格尔-工布江达 Fe-Cu-Pb-Zn-Ag 成矿带	隆格尔-工布江达 Pb-Zn-Ag-Cu-Fe 成矿亚带
拉达克-冈底斯-下察隅岩浆弧带 (VII _{1,6})		南冈底斯-下察隅 Cu-Pb-Zn-Au-Ag 成矿带	南冈底斯-下察隅 Cu-Pb-Zn-Au-Ag-W-Mo 成矿亚带
日喀则弧前盆地 (VII _{1,7})			
雅鲁藏布江结合带 (VII ₂)		喜马拉雅成矿省	喜马拉雅成矿带
雅鲁藏布江蛇绿混杂岩带 (VII _{2,1})			
朗杰学增生楔 (VII _{2,2})		雅鲁藏布江 Cr-Pt-Au 成矿带	雅鲁藏布江 Cr-Pt-Au 成矿亚带
仲巴地块 (VII _{2,3})			
喜马拉雅地块 (VII ₃)			
拉轨岗日被动陆缘盆地 (VII _{3,1})		拉轨岗日 Cs-Sb-Au 成矿带	北喜马拉雅 Pb-Zn-Ag-Sb-Au-Cs 成矿亚带
北喜马拉雅 Au-Sb-白云母成矿亚带			
北喜马拉雅 Au-Sb-白云母成矿亚带			
高喜马拉雅 Fe 成矿亚带			
低喜马拉雅被动陆缘盆地 (VII _{4,4})			

级大地构造单元等。

为全面梳理冈底斯-喜马拉雅内部各次级单元的区域地球化学元素背景值,本次研究采用潘桂棠等(2013)提出的大地构造单元划分方案,去掉无数数据点的低喜马拉雅被动陆缘盆地,计算了西藏冈底斯-喜马拉雅造山系 1 个 I 构造单元及内部 3 个 II 级构造单元和 13 个三级构造单元的区域地球化学

39 种元素的背景值及其富集系数。

3.2 背景特征

利用 GeoIPAS V4.5 软件迭代剔除算术平均值($\bar{X}$)加减 3 倍标准差(S)剔除原始数据中的离群数据,然后计算剩余数据的中位数(m),得到各元素背景值(表 3~表 5)。考虑到目前部分学者在文献和实际应用中仍采用算术平均值($\bar{X}$)作为背景值,为

表 3 西藏冈底斯-喜马拉雅 I 级构造单元区域地球化学 39 种元素参数统计表

Table 3 Statistical table of regional geochemical parameters of 39 elements of class I tectonic units of Gangdese-Himalaya in Xizang

元素	平均值($\bar{X}$)	中位数(m)	标准差(S)	数据剔除率(RR)	全国背景值(X_{NB})	富集系数(EC)
Ag/ 10^{-9}	70.8	67.0	28.7	1.18	69.0	0.97
As/ 10^{-6}	13.8	11.9	9.6	0.76	8.0	1.49
Au/ 10^{-9}	1.2	1.1	0.6	0.10	1.1	1.00
B/ 10^{-6}	47.4	42.0	32.1	0.39	41.0	1.02
Ba/ 10^{-6}	415	410	122	0.19	474	0.86
Be/ 10^{-6}	2.5	2.4	0.7	0.08	2.0	1.20
Bi/ 10^{-6}	0.4	0.4	0.2	1.24	0.3	1.33
Cd/ 10^{-9}	116.0	110.0	52.3	0.19	110.0	1.00
Co/ 10^{-6}	10.8	10.1	5.7	0.31	11.0	0.92
Cr/ 10^{-6}	44.0	41.0	28.0	0.77	54.0	0.76
Cu/ 10^{-6}	18.0	15.8	10.7	3.74	20.0	0.79
F/ 10^{-6}	454	446	147	0.60	460	0.97
Hg/ 10^{-9}	13.9	10.0	9.5	0.75	27.0	0.37
La/ 10^{-6}	35.2	34.5	12.8	1.11	36.0	0.96
Li/ 10^{-6}	35.9	33.6	15.5	0.09	30.0	1.12
Mn/ 10^{-6}	584.0	554.0	263.0	0.39	622	0.89
Mo/ 10^{-6}	0.6	0.6	0.5	0.67	0.7	0.86
Nb/ 10^{-6}	14.4	14.2	5.4	0.06	15.0	0.95
Ni/ 10^{-6}	22.0	18.8	14.8	1.99	22.0	0.85
P/ 10^{-6}	522.0	502.0	221.0	2.24	535	0.94
Pb/ 10^{-6}	25.6	24.6	9.2	0.34	22.0	1.12
Sb/ 10^{-6}	0.7	0.6	0.5	1.29	0.6	1.00
Sn/ 10^{-6}	2.9	2.7	1.3	2.71	2.7	1.00
Sr/ 10^{-6}	164.0	144.0	80.6	0.20	129.0	1.12
Th/ 10^{-6}	13.0	12.8	5.2	0.22	11.0	1.16
Ti/ 10^{-6}	3 131	3 009	1 583	0.09	3 881	0.78
U/ 10^{-6}	2.4	2.2	1.1	0.07	2.2	1.00
V/ 10^{-6}	70.7	66.9	38.3	0.19	75.0	0.89
W/ 10^{-6}	2.2	2.1	1.1	0.02	1.6	1.31
Y/ 10^{-6}	23.2	23.3	7.1	0.07	24.0	0.97
Zn/ 10^{-6}	63.5	61.8	26.0	1.01	65.0	0.95
Zr/ 10^{-6}	203.0	199.0	84.0	0.02	248	0.80
SiO ₂ / 10^{-2}	68.8	69.4	7.7	0.90	65.5	1.06
Al ₂ O ₃ / 10^{-2}	12.4	12.3	2.4	0.05	12.8	0.96
^T Fe ₂ O ₃ / 10^{-2}	4.2	4.0	2.0	0.06	4.3	0.93
CaO/ 10^{-2}	1.6	1.2	1.1	0.54	1.3	0.92
MgO/ 10^{-2}	1.1	1.0	0.6	0.88	1.2	0.83
K ₂ O/ 10^{-2}	2.2	2.0	1.1	0.10	2.4	0.83
Na ₂ O/ 10^{-2}	2.6	2.6	0.8	0.01	1.3	2.00

注：富集系数(EC)=中位数(m)/全国背景值(X_{NB})；全国背景值(X_{NB})引自史长义等(2016)。

表 4 西藏冈底斯-喜马拉雅构造单元内的Ⅱ级与Ⅲ级分区区域地球化学 39 种元素背景值

Table 4 Regional geochemical background value of 39 elements of class II and III tectonic units of Gangdese-Himalaya in Xizang

元素	VII ₁	VII ₃	VII ₄	VII ₁₋₁	VII ₁₋₂	VII ₁₋₃	VII ₁₋₄	VII ₁₋₅	VII ₁₋₆	VII ₁₋₇	VII ₃₋₁	VII ₃₋₂	VII ₃₋₃	VII ₄₋₁	VII ₄₋₂	VII ₄₋₃
Ag/10 ⁻⁹	68.0	69.0	60.0	70.0	66.0	52.0	70.0	73.0	63.0	61.0	65.0	80.0	60.0	65.0	55.0	38.0
As/10 ⁻⁶	11.8	13.0	22.1	17.3	15.0	11.7	10.7	10.6	11.2	21.2	11.9	18.9	8.1	24.5	12.7	0.6
Au/10 ⁻⁹	1.1	1.4	1.2	1.1	1.2	0.7	0.8	0.9	1.2	1.7	1.5	1.6	1.2	1.3	1.0	0.5
B/10 ⁻⁶	35.0	66.6	95.5	73.7	43.1	25.5	23.8	29.0	37.4	81.0	65.5	79.0	45.2	98.3	95.7	12.7
Ba/10 ⁻⁶	420	404	370	353	377	297	470	438	424	323	390	443	369	365	414	456
Be/10 ⁻⁶	2.4	2.5	2.9	2.5	2.3	1.9	2.2	2.6	2.3	3.0	2.6	2.6	2.5	2.9	4.0	2.5
Bi/10 ⁻⁶	0.3	0.4	0.4	0.5	0.4	0.3	0.3	0.4	0.3	0.4	0.4	0.4	0.3	0.5	0.6	0.2
Cd/10 ⁻⁹	110.0	100.0	110.0	150.0	130.0	129.0	105.0	120.0	110.0	100.0	100.0	110.0	84.0	115.0	80.0	80.0
Co/10 ⁻⁶	9.3	14.0	14.0	13.7	10.6	6.0	5.8	8.6	10.3	13.1	13.7	15.2	9.3	14.8	7.1	12.8
Cr/10 ⁻⁶	39.2	58.7	65.2	62.8	50.6	27.3	24.4	32.8	41.8	58.7	58.5	64.8	43.4	68.0	29.4	52.4
Cu/10 ⁻⁶	14.8	24.3	21.1	20.0	16.4	9.7	9.2	13.8	17.2	29.7	23.5	29.7	11.1	22.2	10.3	17.2
F/10 ⁻⁶	448	413	511	522	496	383	376	488	425	450	427	431	308	506	538	610
Hg/10 ⁻⁹	11.0	15.0	15.0	17.0	11.0	10.0	9.0	11.0	10.0	16.0	11.0	30.0	10.0	20.0	8.0	4.0
La/10 ⁻⁶	34.9	31.7	37.5	38.7	36.3	29.1	30.7	39.1	32.2	35.5	30.3	38.6	16.1	37.3	34.5	42.7
Li/10 ⁻⁶	31.7	43.0	55.5	46.7	34.8	26.1	26.0	32.3	30.4	40.4	41.0	54.4	27.3	57.9	46.2	15.4
Mn/10 ⁻⁶	546	667	508	616	519	327	380	554	600	568	662	727	495	524	277	601
Mo/10 ⁻⁶	0.6	0.5	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.7	0.7	0.5	0.5	0.8	0.3	0.7	0.3	0.4
Nb/10 ⁻⁶	13.8	14.4	17.1	16.4	15.1	9.8	10.8	15.2	12.7	15.4	13.2	18.1	6.9	17.6	11.8	13.9
Ni/10 ⁻⁶	18.0	32.2	35.1	27.8	21.7	13.6	10.7	14.6	20.3	35.2	31.5	37.3	27.0	37.6	15.5	25.3
P/10 ⁻⁶	505	527	585	497	497	383	361	537	531	450	488	626	345	589	505	664
Pb/10 ⁻⁶	24.0	24.0	27.8	27.4	25.0	18.8	23.4	26.8	22.5	23.2	23.5	24.6	25.4	28.2	27.6	17.1
Sb/10 ⁻⁶	0.6	0.6	1.0	1.4	0.9	0.6	0.5	0.5	0.6	1.1	0.6	0.9	0.5	1.3	0.9	0.1
Sn/10 ⁻⁶	2.6	3.0	3.5	3.8	3.1	2.2	2.2	3.0	2.3	2.7	3.0	3.2	2.2	3.6	4.9	3.3
Sr/10 ⁻⁶	146.6	112.0	169.9	93.4	123.9	147.1	159.0	144.9	175.6	137.2	112.9	120.2	97.6	108.0	167.9	159.0
Th/10 ⁻⁶	13.3	9.7	13.3	14.9	13.3	10.9	12.3	15.5	12.4	11.6	9.5	11.3	5.7	13.2	12.0	17.0
Ti/10 ⁻⁶	2 926	4 113	4 299	3 782	2 985	2 000	2 050	3 003	3 111	3 814	3 629	5 025	1 253	4 457	2 212	3 642
U/10 ⁻⁶	2.4	1.5	1.5	2.1	2.3	2.2	2.4	2.9	2.1	1.4	1.5	1.5	1.4	1.6	2.9	3.3
V/10 ⁻⁶	62.8	85.2	94.1	85.4	66.5	40.8	41.9	59.3	70.0	78.3	80.5	105.7	35.8	98.9	38.3	82.8
W/10 ⁻⁶	2.2	1.9	2.1	2.4	2.3	1.8	2.1	2.3	2.1	2.4	1.9	2.2	1.1	2.3	2.9	1.3
Y/10 ⁻⁶	22.9	22.2	26.6	26.4	23.7	18.9	19.8	25.0	21.3	24.0	21.4	27.1	13.7	26.7	22.5	29.3
Zn/10 ⁻⁶	61.4	71.0	72.0	85.2	63.9	44.8	47.4	61.4	62.2	65.4	68.0	84.4	38.6	75.0	47.5	54.0
Zr/10 ⁻⁶	200	190	227	239	201	152	168	221	182	201	158	263	79	229	178	228
SiO ₂ /10 ⁻²	69.3	68.4	62.2	68.2	65.9	68.1	72.7	70.8	69.1	69.1	67.7	68.2	72.9	61.3	65.7	66.3
Al ₂ O ₃ /10 ⁻²	12.4	11.3	12.5	14.4	12.2	10.2	11.4	12.5	12.9	11.6	11.2	13.8	9.2	12.8	11.3	11.7
^T Fe ₂ O ₃ /10 ⁻²	3.7	5.1	5.6	4.9	4.1	2.4	2.6	3.6	4.1	4.4	4.9	5.8	2.7	6.0	2.5	4.7
CaO/10 ⁻²	1.4	0.8	3.2	0.6	1.9	3.3	1.3	1.2	1.4	1.7	1.0	0.7	1.1	3.5	3.6	3.8
MgO/10 ⁻²	1.1	1.1	1.2	0.9	1.4	0.9	0.8	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	0.9	2.1
K ₂ O/10 ⁻²	2.1	1.6	1.3	1.0	1.4	1.7	2.4	2.3	2.6	1.4	1.8	1.4	2.6	1.3	2.1	2.5
Na ₂ O/10 ⁻²	2.7	2.2	2.3	2.8	2.9	2.2	2.7	2.9	2.6	2.4	2.3	2.3	1.7	2.2	2.9	2.9

注：构造单元代号同表 2。

便于富集系数等部分区域地球化学指标的换算,本文同时列出了西藏冈底斯-喜马拉雅造山系 I 级构造单元的区域地球化学 39 种元素的中位数(m)和平均值(X)(表 3),而在其次级构造单元中均采用中位数(m)作为背景值的度量值。

从计算结果可见,与全国区域地球化学元素背景值相比,西藏冈底斯-喜马拉雅造山系(VII)区域地

球化学 39 种元素背景变化较大,富集 As、B、Be、Bi、Li、Na₂O、Pb、SiO₂、Sr、Th 和 W(图 3),其中以 As、Be、Bi、Na₂O、W 显著富集,富集系数(EC)大于 1.2(将 $EC>1.2$ 定义为“显著富集”,下同)。在西藏冈底斯-喜马拉雅造山系(VII)内,不同构造次级单元区域地球化学元素富集特征具有明显差异。

拉达克-冈底斯-察隅弧盆系(VII₁)富集 Ag、

表5 西藏冈底斯-喜马拉雅构造单元内的Ⅱ级与Ⅲ级分区区域地球化学39种元素富集系数
Table 5 Regional geochemical enrichment coefficient (EC) of 39 elements of class II and III tectonic units of Gangdese-Himalaya in Xizang

元素	VII ₁	VII ₃	VII ₄	VII ₁₋₁	VII ₁₋₂	VII ₁₋₃	VII ₁₋₄	VII ₁₋₅	VII ₁₋₆	VII ₁₋₇	VII ₃₋₁	VII ₃₋₂	VII ₃₋₃	VII ₄₋₁	VII ₄₋₂	VII ₄₋₃
Ag	1.01	1.03	0.90	1.04	0.99	0.78	1.04	1.09	0.94	0.91	0.97	1.19	0.90	0.97	0.82	0.57
As	0.99	1.09	1.86	1.45	1.26	0.98	0.90	0.89	0.94	1.78	1.00	1.59	0.68	2.06	1.07	0.05
Au	1.00	1.27	1.09	1.00	1.09	0.64	0.73	0.82	1.09	1.55	1.36	1.45	1.09	1.18	0.91	0.45
B	0.83	1.59	2.27	1.75	1.03	0.61	0.57	0.69	0.89	1.93	1.56	1.88	1.08	2.34	2.28	0.30
Ba	1.02	0.99	0.90	0.86	0.92	0.72	1.15	1.07	1.03	0.79	0.95	1.08	0.90	0.89	1.01	1.11
Be	1.00	1.04	1.21	1.04	0.96	0.79	0.92	1.08	0.96	1.25	1.08	1.08	1.04	1.21	1.67	1.04
Bi	0.75	1.00	1.00	1.25	1.00	0.75	0.75	1.00	0.75	1.00	1.00	1.00	0.75	1.25	1.50	0.50
Cd	1.00	0.91	1.00	1.36	1.18	1.17	0.95	1.09	1.00	0.91	0.91	1.00	0.76	1.05	0.73	0.73
Co	0.92	1.39	1.39	1.36	1.05	0.59	0.57	0.85	1.02	1.30	1.36	1.50	0.92	1.47	0.70	1.27
Cr	0.96	1.43	1.59	1.53	1.23	0.67	0.60	0.80	1.02	1.43	1.43	1.58	1.06	1.66	0.72	1.28
Cu	0.94	1.54	1.34	1.27	1.04	0.61	0.58	0.87	1.09	1.88	1.49	1.88	0.70	1.41	0.65	1.09
F	1.00	0.93	1.15	1.17	1.11	0.86	0.84	1.09	0.95	1.01	0.96	0.97	0.69	1.13	1.21	1.37
Hg	1.10	1.50	1.50	1.70	1.10	1.00	0.90	1.10	1.00	1.60	1.10	3.00	1.00	2.00	0.80	0.40
La	1.01	0.92	1.09	1.12	1.05	0.84	0.89	1.13	0.93	1.03	0.88	1.12	0.47	1.08	1.00	1.24
Li	0.94	1.28	1.65	1.39	1.04	0.78	0.77	0.96	0.90	1.20	1.22	1.62	0.81	1.72	1.38	0.46
Mn	0.99	1.20	0.92	1.11	0.94	0.59	0.69	1.00	1.08	1.03	1.19	1.31	0.89	0.95	0.50	1.08
Mo	1.00	0.83	1.00	1.00	1.00	0.83	0.83	1.17	1.17	0.83	0.83	1.33	0.50	1.17	0.50	0.67
Nb	0.97	1.01	1.20	1.15	1.06	0.69	0.76	1.07	0.89	1.08	0.93	1.27	0.49	1.24	0.83	0.98
Ni	0.96	1.71	1.87	1.48	1.15	0.72	0.57	0.78	1.08	1.87	1.68	1.98	1.44	2.00	0.82	1.35
P	1.01	1.05	1.17	0.99	0.99	0.76	0.72	1.07	1.06	0.90	0.97	1.25	0.69	1.17	1.01	1.32
Pb	0.98	0.98	1.13	1.11	1.02	0.76	0.95	1.09	0.91	0.94	0.96	1.00	1.03	1.15	1.12	0.70
Sb	1.00	1.00	1.67	2.33	1.50	1.00	0.83	0.83	1.00	1.83	1.00	1.50	0.83	2.17	1.50	0.17
Sn	0.96	1.11	1.30	1.41	1.15	0.81	0.81	1.11	0.85	1.00	1.11	1.19	0.81	1.33	1.81	1.22
Sr	1.02	0.78	1.18	0.65	0.86	1.02	1.10	1.01	1.22	0.95	0.78	0.83	0.68	0.75	1.17	1.10
Th	1.04	0.76	1.04	1.16	1.04	0.85	0.96	1.21	0.97	0.91	0.74	0.88	0.45	1.03	0.94	1.33
Ti	0.97	1.37	1.43	1.26	0.99	0.66	0.68	1.00	1.03	1.27	1.21	1.67	0.42	1.48	0.74	1.21
U	1.09	0.68	0.68	0.95	1.05	1.00	1.09	1.32	0.95	0.64	0.68	0.68	0.64	0.73	1.32	1.50
V	0.94	1.27	1.41	1.28	0.99	0.61	0.63	0.89	1.05	1.17	1.20	1.58	0.54	1.48	0.57	1.24
W	1.05	0.90	1.00	1.14	1.10	0.86	1.00	1.10	1.00	1.14	0.90	1.05	0.52	1.10	1.38	0.62
Y	0.98	0.95	1.14	1.13	1.02	0.81	0.85	1.07	0.91	1.03	0.92	1.16	0.59	1.15	0.97	1.26
Zn	0.99	1.15	1.17	1.38	1.03	0.72	0.77	0.99	1.01	1.06	1.10	1.37	0.62	1.21	0.77	0.87
Zr	1.01	0.95	1.14	1.20	1.01	0.76	0.84	1.11	0.91	1.01	0.79	1.32	0.40	1.15	0.89	1.15
SiO ₂	1.00	0.99	0.90	0.98	0.95	0.98	1.05	1.02	1.00	1.00	0.98	0.98	1.05	0.88	0.95	0.96
Al ₂ O ₃	1.01	0.92	1.02	1.17	0.99	0.83	0.93	1.02	1.05	0.94	0.91	1.12	0.75	1.04	0.92	0.95
^T Fe ₂ O ₃	0.93	1.28	1.40	1.23	1.03	0.60	0.65	0.90	1.03	1.10	1.23	1.45	0.68	1.50	0.63	1.18
CaO	1.17	0.67	2.67	0.50	1.58	2.75	1.08	1.00	1.17	1.42	0.83	0.58	0.92	2.92	3.00	3.17
MgO	1.10	1.10	1.20	0.90	1.40	0.90	0.80	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.20	0.90	2.10
K ₂ O	1.05	0.80	0.65	0.50	0.70	0.85	1.20	1.15	1.30	0.70	0.90	0.70	1.30	0.65	1.05	1.25
Na ₂ O	1.04	0.85	0.88	1.08	1.12	0.85	1.04	1.12	1.00	0.92	0.88	0.88	0.65	0.85	1.12	1.12

注: 富集系数(EC)=各构造单元背景值/冈底斯-喜马拉雅背景值; 构造单元代号同表2。

Al₂O₃、Ba、CaO、Hg、K₂O、La、MgO、Na₂O、P、Sr、Th、U、W 和 Zr,其中以 Hg、MgO、CaO 富集系数较高,分别为 1.10、1.10 和 1.17(图 3)。那曲-洛隆弧前盆地(VII₁₋₁)富集 Ag、Al₂O₃、Be、F、La、Mn、Na₂O、Nb、Pb、Th、W、Y,显著富集 As、B、Bi、Cd、Co、Cr、Cu、Hg、Li、Ni、Sb、Sn、^TFe₂O₃、Ti、V、Zn、Zr,尤其以 Cr、Hg、B、Sb 为代表;昂龙岗日-班戈-腾冲岩浆弧带(VII₁₋₂)富集 Au、B、Cd、Co、Cu、F、Hg、La、Li、Na₂O、Nb、Ni、Pb、

Sn、^TFe₂O₃、Th、U、W、Y、Zn、Zr,显著富集 As、CaO、Cr、MgO、Sb;狮泉河-申扎-嘉黎蛇绿混杂岩带(VII₁₋₃)富集 CaO、Cd、Sr,显著富集 CaO;措勤-申扎岩浆弧(VII₁₋₄)富集 Ag、Ba、CaO、K₂O、Na₂O、SiO₂、Sr、U,其中以 CaO、U、Sr、Ba、K₂O 富集系数较高;隆格尔-工布江达复合岛弧带(VII₁₋₅)富集 Ag、Al₂O₃、Ba、Be、Cd、F、Hg、K₂O、La、MgO、Mo、Na₂O、Nb、P、Pb、SiO₂、Sn、Sr、W、Y、Zr,显著富集 Th、U;拉达克-冈底

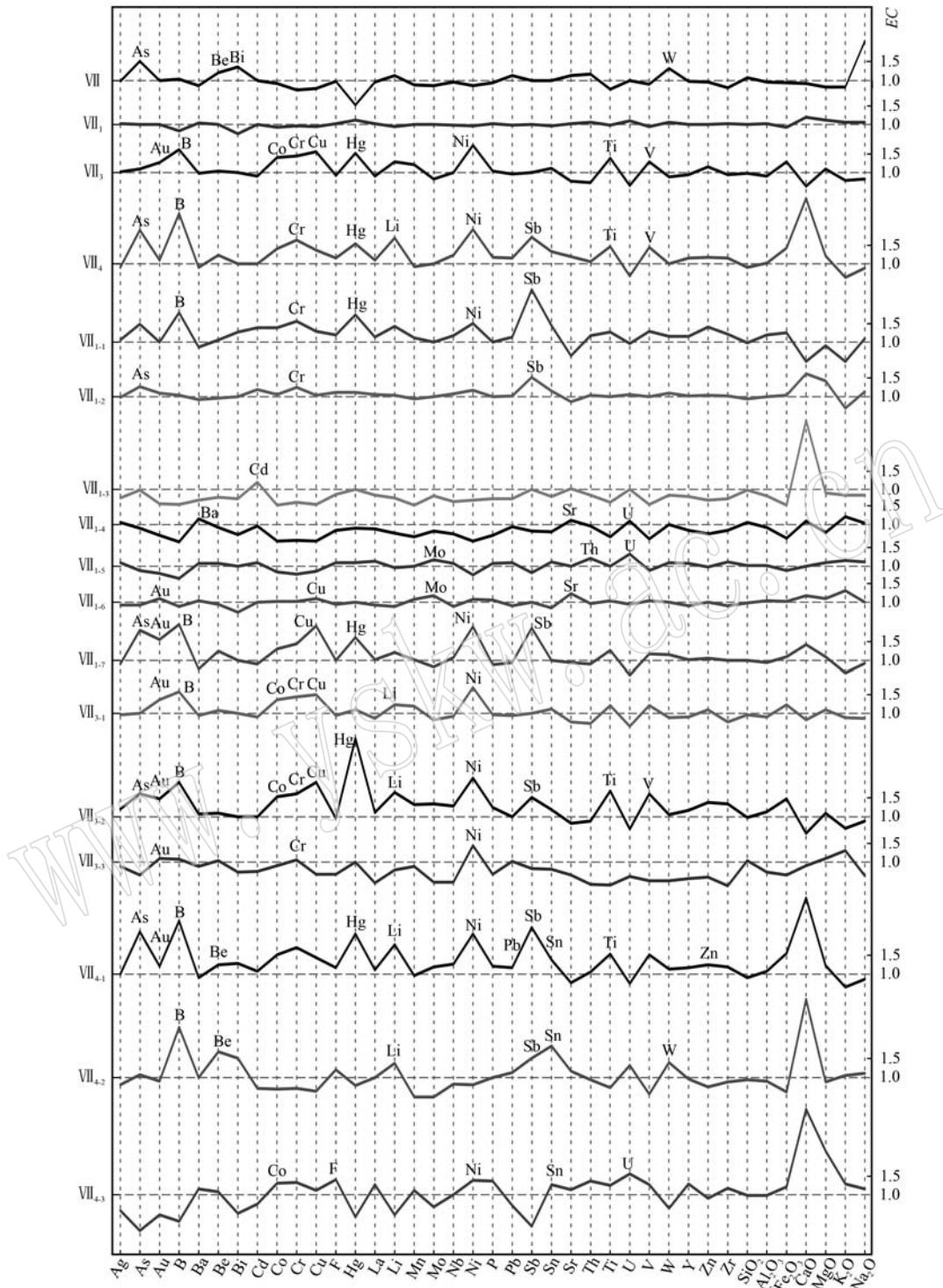


图 3 不同构造单元富集系数(EC)对比图(构造单元代号同表 2)

Fig. 3 Comparison of enrichment coefficient (EC) of different tectonic units (the tectonic unit code is the same as in Table 2)

斯-下察隅岩浆弧带(VII_{1.6})富集 Al₂O₃、Au、Ba、CaO、Co、Cr、Cu、MgO、Mn、Mo、Ni、P、^TFe₂O₃、Ti、V、Zn, 显著富集 K₂O、Sr; 日喀则弧前盆地(VII_{1.7})富集 F、La、Li、MgO、Mn、Nb、^TFe₂O₃、V、W、Y、Zn、Zr, 显著富集

As、Au、B、Be、CaO、Co、Cr、Cu、Hg、Ni、Sb、Ti, 其中以 Au、Hg、As、Sb、Ni、Cu、B 富集程度高。

雅鲁藏布江结合带(VII₃)富集 Ag、As、Be、MgO、Mn、Nb、P、Sn、Zn, 强烈富集 Au、B、Co、Cr、Cu、Hg、Li、

Ni、 $^T\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、Ti、V,其中以 Hg、Cu、B、Ni 为代表(图3)。雅鲁藏布江蛇绿混杂岩带(VII_{3.1})富集 Be、Hg、MgO、Mn、Sn、Ti、V、Zn,显著富集 Au、B、Co、Cr、Cu、Li、Ni、 $^T\text{Fe}_2\text{O}_3$,其中 Au、Cr、Co、Ni 富集程度高;朗杰学增生楔(VII_{3.2})富集 Ag、 Al_2O_3 、Ba、Be、La、MgO、Sn、W、Y,显著富集 As、Au、B、Co、Cr、Cu、Hg、Li、Ti、Mn、Mo、Nb、Ni、P、Sb、 $^T\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、Ti、V、Zn、Zr,其中以 Au、Sb、Co、V、Cr、As、Li、Ti、Cu、B、Hg 富集程度高;仲巴地块(VII_{3.3})富集 Au、B、Be、Cr、MgO、Pb、 SiO_2 ,显著富集 K_2O 、Ni。

喜马拉雅地块(VII₄)富集 Al_2O_3 、Au、F、La、MgO、Nb、P、Pb、Sr、Th、Y、Zn、Zr,显著富集 As、B、Be、CaO、Co、Cr、Cu、Hg、Li、Ni、Sb、Sn、 $^T\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、Ti、V,其中以 Hg、Cr、Li、Sb、As、Ni、B、CaO 富集程度高,富集系数依次为 1.50、1.59、1.65、1.67、1.86、1.87、2.27、2.67(图3)。拉轨岗日被动陆缘盆地(VII_{4.1})富集 Al_2O_3 、Au、Cd、F、La、MgO、Mo、P、Pb、Th、W、Y、Zr,显著富集 As、B、Be、Bi、CaO、Co、Cr、Cu、Hg、Li、Nb、Ni、Sb、Sn、 $^T\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、Ti、V、Zn,其中以 Cr、Li、Hg、Ni、As、Sb、B、CaO 为代表;北喜马拉雅碳酸盐岩台地(VII_{4.2})富集 As、Ba、 K_2O 、 Na_2O 、P、Pb、Sr,显著富集 B、Be、Bi、CaO、F、Li、Sb、Sn、U、W;高喜马拉雅基底杂岩带(VII_{4.3})富集 Ba、Be、Cu、Mn、 Na_2O 、Sr、 $^T\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、Zr,显著富集 Ti、Sn、V、La、 K_2O 、Y、Co、Cr、P、Th、Ni、F、U、MgO、CaO。

4 区域地球化学异常讨论

4.1 元素组合特征

以冈底斯-喜马拉雅区域地球化学勘查数据为基础,综合区域矿产地质特征,选取 Ag、As、Au、Be、Bi、Cd、Co、Cr、Cu、Hg、Li、Mn、Mo、Ni、Pb、Sb、Sn、Ti、V、W、Zn 等区域主成矿元素及其伴生元素,利用聚类分析和因子分析等方法,剖析各元素之间的相关性特征,确定主要矿床类型找矿元素组合,进而提取可能的找矿信息。聚类分析结果显示,21 个元素可分为 7 个族群,分别为 Hg-Sb-As-Cu-Ag-Bi、Cd-Pb-Zn、Cr-Ni-Co、Ti-V-Mn、Li-Be、Au-Sn 和 Mo-W(图4)。

运用 SPSS 软件对上述数据进行因子分析,得到 Bartlett 球度检验和 KMO 检验分析结果,Bartlett 球度检验统计量为 730 514.86, KMO 检验值为 0.729,在自由度为 210 的条件下,概率 P 值为 0,表明数据适合做因子分析。选择因子分析特征值大于1的组

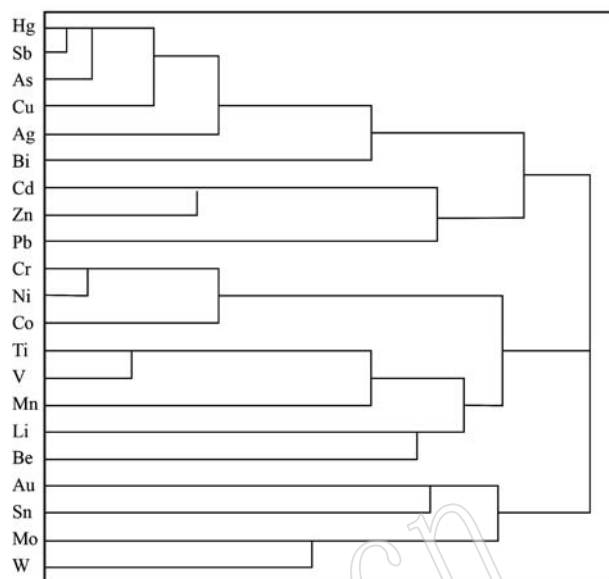


图4 元素聚类分析图

图4 Analysis diagram of element cluster

合,累计方差贡献率大于70%,提取出7个主要因子(表6),得到旋转后的因子载荷矩阵(表7),各因子元素组合与聚类分析结果近于一致。

为查明成矿元素组合与区域矿产分布的关联性,以因子方差贡献率为权重计算各因子得分高下限,绘制因子得分高等值线图(图5)。可见, F1 因子为 Hg-Sb-As-Cu-Ag-Bi 元素组合,主要分布于拉达克-冈底斯-下察隅岩浆弧带(VII_{1.6})、拉轨岗日被动陆缘盆地(VII_{4.1})以及隆格尔-工布江达复合岛弧带(VII_{1.5})中段、东段和昂龙岗日-班戈-腾冲岩浆弧带(VII_{1.2})东段,为区域斑岩型铜多金属矿和热液脉型、矽卡岩型铅锌矿的主要成矿元素分区(图5a),因子得分高值区分布甲玛、驱龙、厅宫、帮浦、雄村、朱诺等多个斑岩型铜矿,扎西康、西午、吉松、柯月、索月、夏隆岗等热液脉型铅锌矿以及查个勒、蒙亚阿、勒青拉等矽卡岩型铅锌矿,表明该区域具有寻找同类型矿床的巨大潜力。

F2 因子为 Cd-Pb-Zn 元素组合,分布在雅鲁藏布江结合带(VII₃)东段及其以南的拉轨岗日被动陆缘盆地(VII_{4.1})(图5b),与 F1 因子在拉轨岗日被动陆缘盆地(VII_{4.1})的分布范围相似,为区域热液脉型铅锌矿的指示。

F3 因子为 Cr-Ni-Co 元素组合,沿雅鲁藏布江结合带(VII₃)和狮泉河-申扎-嘉黎蛇绿混杂岩带(VII_{1.3})呈条带状展布(图5c),代表了铬铁矿和结合带内基性-超基性岩的元素组合。在雅鲁藏布江结合

表 6 因子分析总方差解释

Table 6 Factor analysis of the total variance interpretation

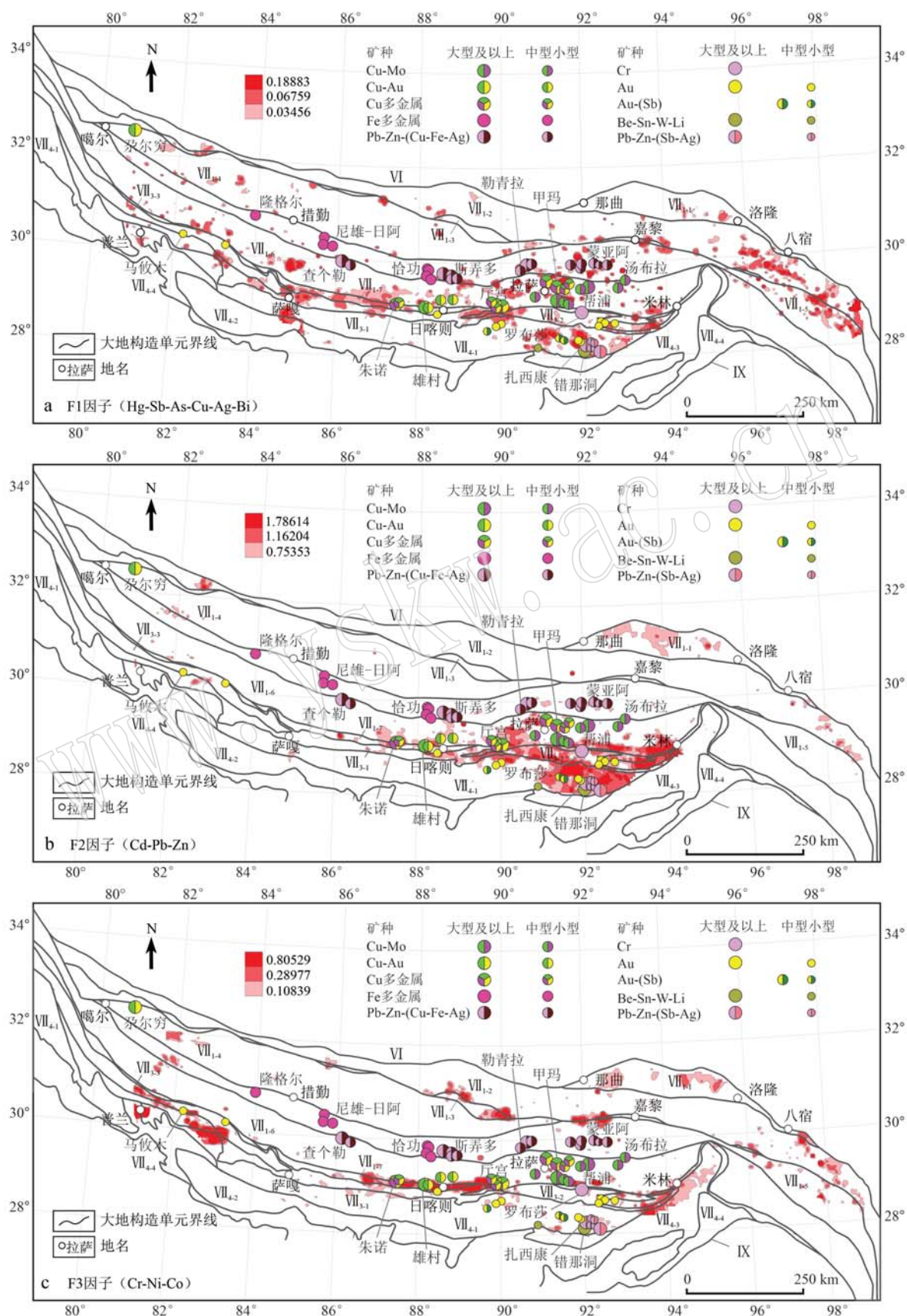
成分	初始特征值			提取平方和载入			旋转平方和载入		
	合计	方差/%	累积/%	合计	方差/%	累积/%	合计	方差/%	累积/%
1	4.23	20.13	20.13	4.23	20.13	20.13	3.60	17.13	17.13
2	3.24	15.41	35.53	3.24	15.41	35.53	2.82	13.44	30.57
3	2.31	11.01	46.54	2.31	11.01	46.54	2.50	11.90	42.47
4	1.72	8.21	54.75	1.72	8.21	54.75	2.19	10.45	52.92
5	1.53	7.29	62.05	1.53	7.29	62.05	1.56	7.41	60.33
6	1.14	5.43	67.48	1.14	5.43	67.48	1.32	6.28	66.61
7	1.06	5.06	72.54	1.06	5.06	72.54	1.24	5.92	72.54
8	0.96	4.56	77.09						
9	0.82	3.92	81.01						
10	0.81	3.86	84.88						
11	0.63	3.01	87.88						
12	0.61	2.92	90.80						
13	0.50	2.36	93.16						
14	0.45	2.15	95.32						
15	0.27	1.28	96.60						
16	0.20	0.96	97.56						
17	0.15	0.72	98.27						
18	0.14	0.68	98.95						
19	0.13	0.62	99.58						
20	0.07	0.33	99.91						
21	0.02	0.09	100.00						

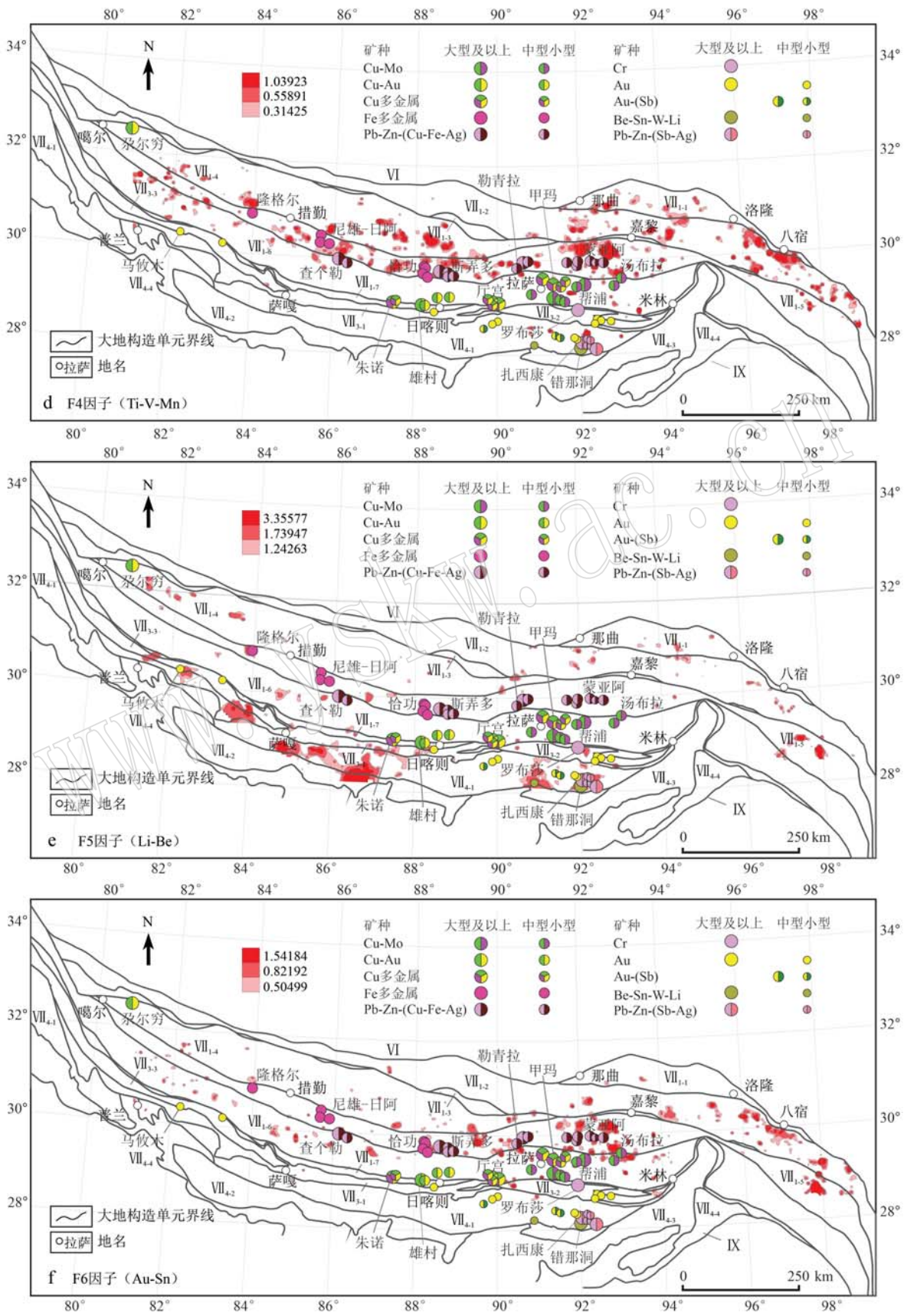
表 7 旋转后的因子载荷矩阵

Table 7 Factor load matrix after rotation

因子	成分						
	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
Ag	0.776	0.440	0.003	-0.041	0.066	-0.004	-0.072
As	0.196	0.125	0.025	0.141	0.292	-0.029	0.214
Au	0.017	-0.026	-0.004	0.010	-0.122	0.893	-0.038
Be	-0.017	-0.010	-0.068	-0.115	0.788	0.041	0.007
Bi	0.519	0.242	-0.003	-0.054	0.325	0.103	0.370
Cd	0.148	0.780	-0.004	0.044	-0.035	0.060	0.298
Co	0.034	0.100	0.747	0.584	-0.017	0.001	0.037
Cr	0.000	-0.013	0.962	-0.001	-0.042	-0.002	-0.024
Cu	0.881	0.021	0.017	0.130	-0.045	0.002	0.137
Hg	0.971	-0.039	0.000	-0.008	-0.006	-0.001	-0.029
Li	0.017	0.033	-0.066	0.539	0.581	-0.011	-0.032
Mn	0.008	0.381	0.200	0.547	-0.071	0.032	0.203
Mo	0.037	0.099	-0.043	0.073	-0.105	0.004	0.753
Ni	0.001	-0.001	0.975	0.009	-0.039	-0.008	-0.022
Pb	0.047	0.727	-0.009	-0.090	0.110	-0.038	-0.267
Sb	0.969	-0.019	0.000	0.006	0.015	-0.004	-0.024
Sn	0.000	0.104	-0.005	0.039	0.468	0.653	0.084
Ti	0.022	0.010	-0.022	0.915	0.058	0.024	-0.026
V	0.031	0.024	0.097	0.912	-0.046	0.004	-0.005
W	-0.008	-0.032	0.018	-0.062	0.356	-0.002	0.544
Zn	0.044	0.781	0.030	0.383	0.037	0.032	0.184

注：(1)提取方法：主成分；(2)旋转在 6 次迭代后收敛。





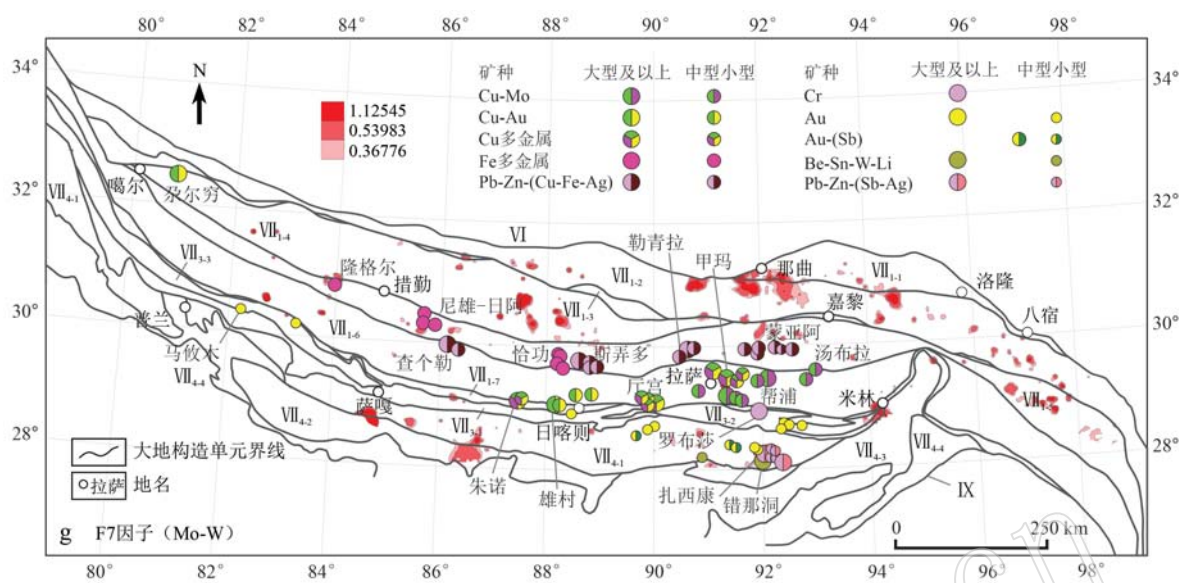


图5 因子得分高等值线图

Fig. 5 Factor score high contour map

审图号、地图投影参数、大地构造单元区划及矿床(点)数据引用源同图1

the map approval number, projection parameters, tectonic unit division and reference source of mineral deposit (point) data are the same as in Fig. 1

带(VII₃)东段高值区分布罗布莎铬铁矿,是我国目前储量最大的铬铁矿,其西侧日喀则及普兰地区分布因子得分高值区,暗示具有寻找铬铁矿的找矿潜力。

F4因子为Ti-V-Mn元素组合,该因子高值区主体沿中冈底斯古老地壳展布,区内分布隆格尔、尼雄-日阿和恰功等矽卡岩型铁矿(图5d),表明该元素组合可能是区域矽卡岩型铁矿的伴生元素,但同时也蕴含了重要的古老成岩信息。

F5因子为Li-Be元素组合,代表了与淡色花岗岩有关的Li-Be-W-Sn矿床的成矿元素组合。该区域沿特提斯喜马拉雅断续分布(图5e),因子得分高值区与淡色花岗岩近于重合,如错那洞、拉隆、拉轨岗日、马拉山、恰足翁等淡色花岗岩,目前已发现与淡色花岗岩相关的错那洞铍钨锡矿、嘎波锂矿等,具有进一步寻找同类型矿床的潜力。

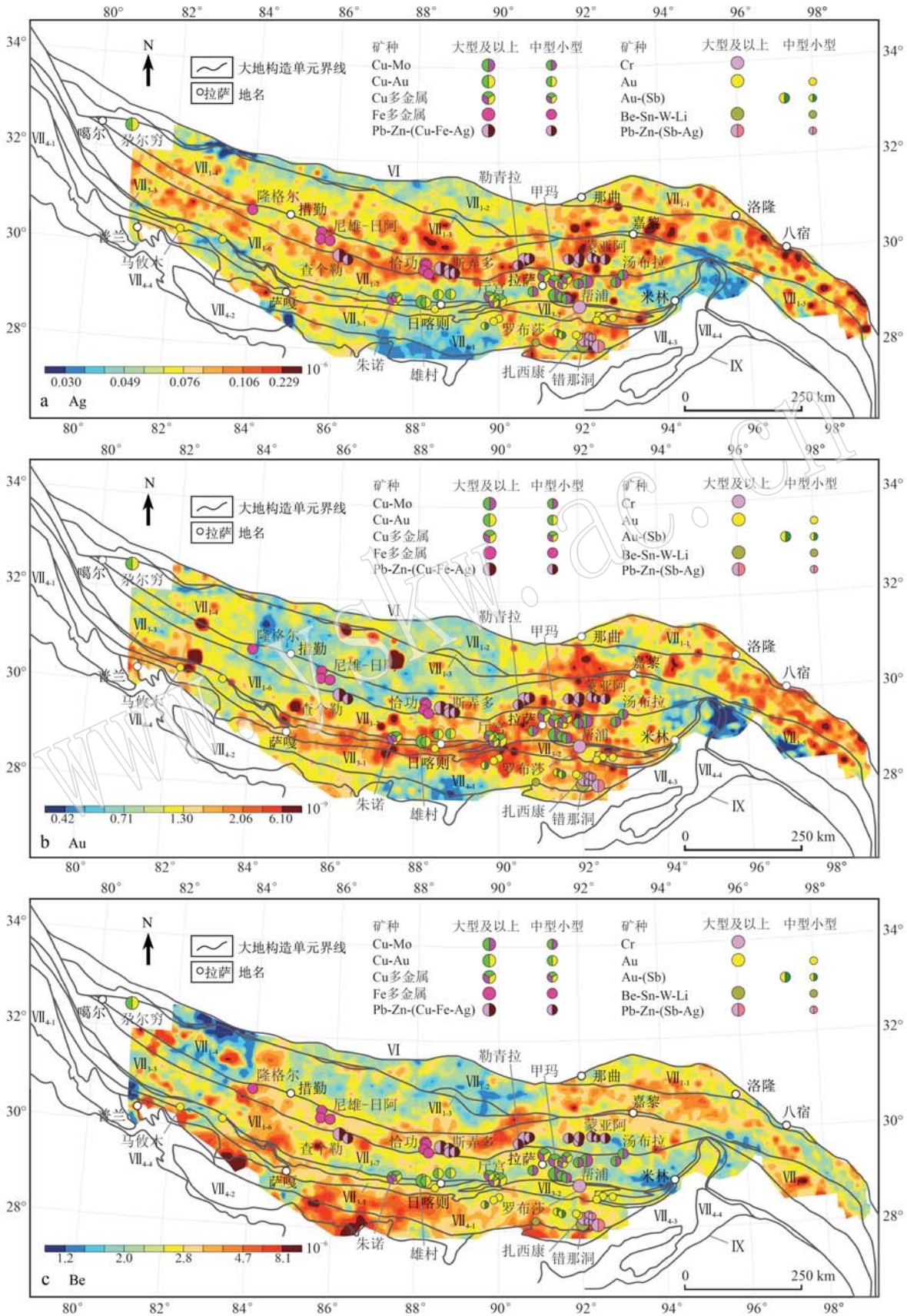
F6因子为Au-Sn组合,分布于雅鲁藏布江结合带(VII₃)、昂龙岗日-班戈-腾冲岩浆弧带(VII_{1,2})东段、隆格尔-工布江达复合岛弧带(VII_{1,5})中段、东段和拉达克-冈底斯-下察隅岩浆弧带(VII_{1,6})(图5f),与F1因子在雅鲁藏布江结合带(VII₃)及其以北的分布区域吻合,代表了雅鲁藏布江结合带(VII₃)造山型金矿的成矿元素和冈底斯斑岩型铜矿伴生成矿的主要元素之一,具有重要的找矿指示意义。

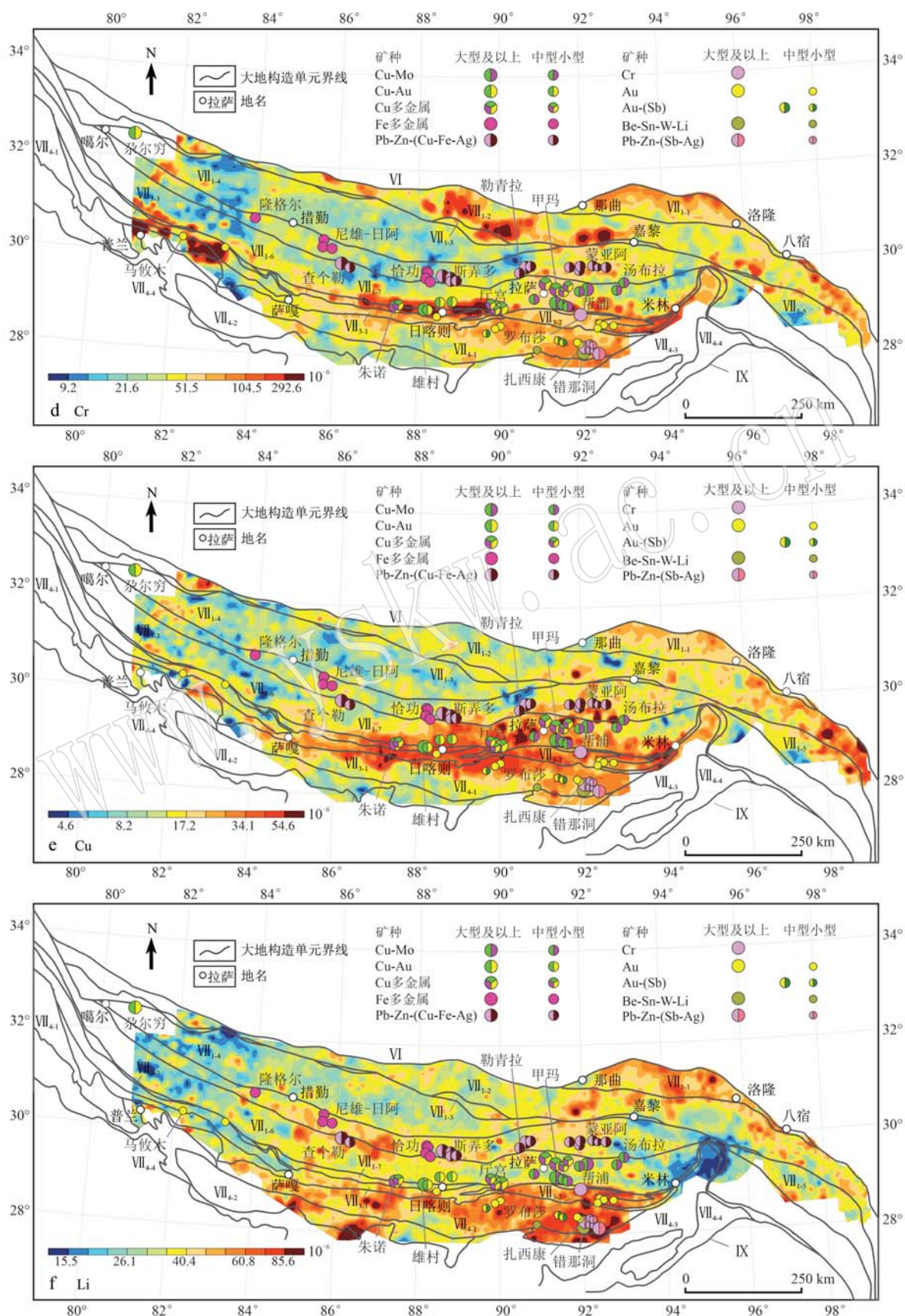
F7因子为Mo-W组合,与F1、F5因子元组组合

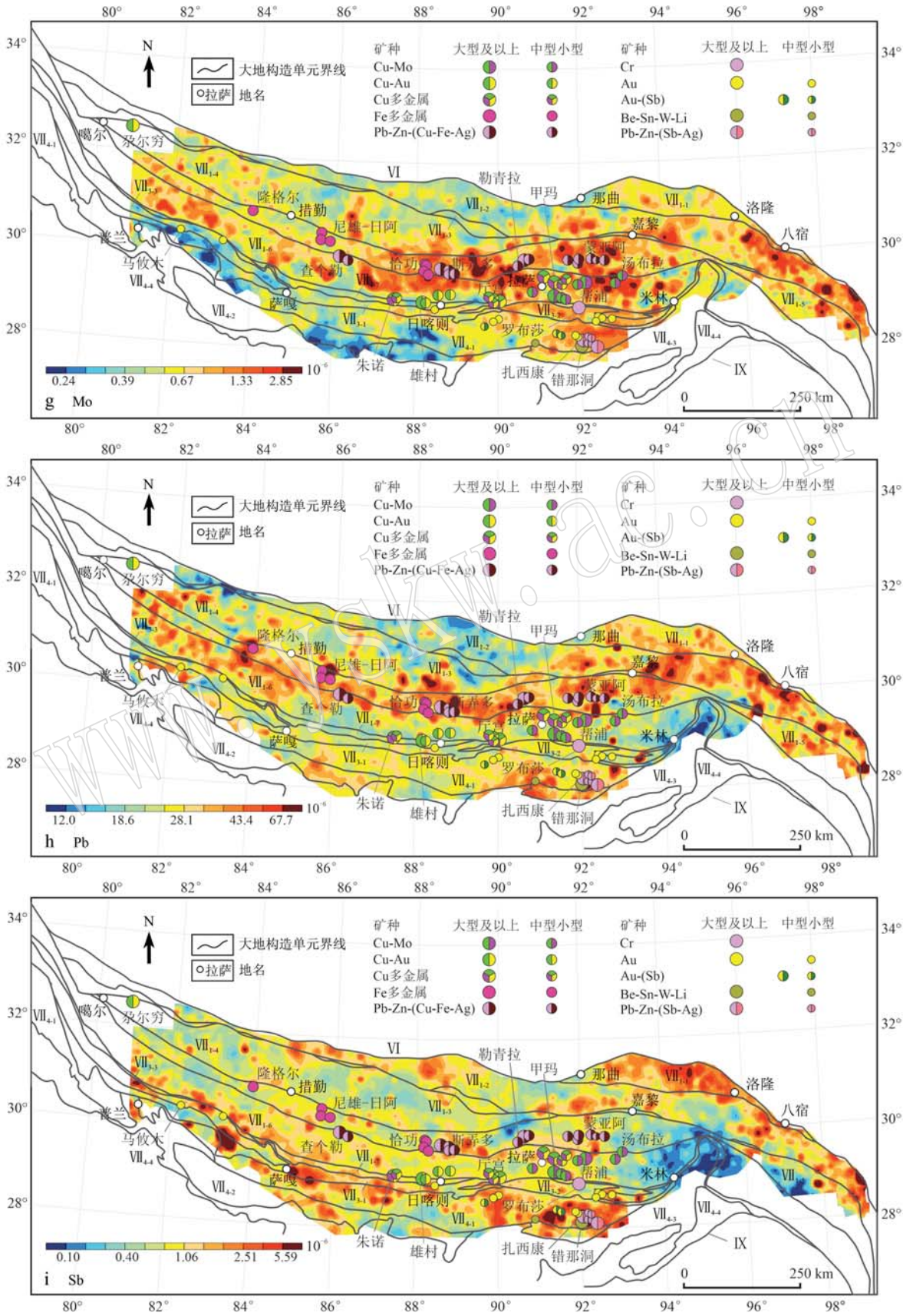
分布范围近于一致(图5g),但因子得分值稍低,代表了与中酸性侵入岩相关的Li-Be-W-Sn矿化和冈底斯斑岩型铜矿床的伴生元素,表明该区域具有寻找同类型矿床的潜力。

4.2 区域地球化学场特征

在梳理元素背景及组合特征的基础上,结合区域主要矿产资源分布,绘制了Ag、Au、Be、Cr、Cu、Li、Mo、Pb、Sb、Sn、W、Zn等12种区域主要成矿元素的地球化学图(图6)。可见,Ag元素高值区分布范围较广,呈带状展布,主要位于昂龙岗日-班戈-腾冲岩浆弧(VII_{1,2})东部、隆格尔-工布江达复合岛弧带(VII_{1,5})中部和拉轨岗日被动陆缘盆地(VII_{4,1})东部(图6a),区内分布蒙亚阿铅锌矿、亚贵拉铅锌银钼多金属矿、扎西康铅锌多金属矿床及吉松、柯月、索月、夏隆岗等多个铅锌矿。Au元素高值区呈团块或串珠状分布在昂龙岗日-班戈-腾冲岩浆弧(VII_{1,2})东部、拉达克-冈底斯-下察隅岩浆弧带(VII_{1,6})中段、印度河-雅鲁藏布江结合带(VII₄)和拉轨岗日被动陆缘盆地(VII_{4,1})东部,与冈底斯斑岩型铜(多金属)矿带、雅鲁藏布江造山型金矿带空间分布近于一致(图6b),与因子分析结果一致,代表了雅鲁藏布江结合带(VII₃)造山型金矿的成矿元素和冈底斯斑岩型铜矿伴生成矿的主要元素之一。Be元素高值区分布较为局限,呈团块状分布于隆格尔-工布江达复合岛







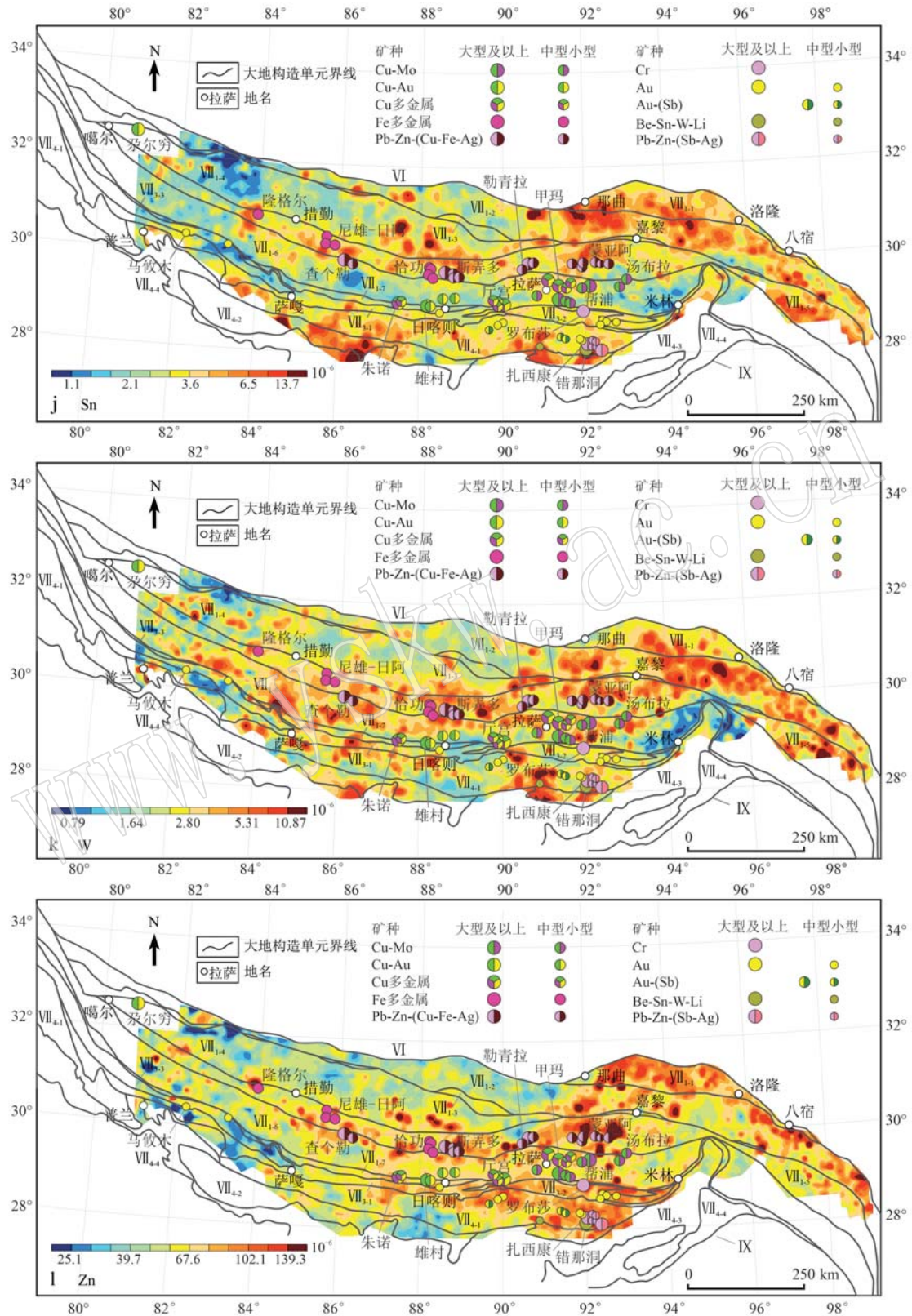


图6 西藏冈底斯-喜马拉雅主要成矿元素地球化学图

Fig. 6 Geochemical map of major ore-forming elements of Gangdese-Himalaya in Xizang

审图号、地图投影参数、大地构造单元区划及矿床(点)数据引用源同图1

the map approval number, projection parameters, tectonic unit division and reference source of mineral deposit (point) data are the same as in Fig. 1

弧带 (VII_{1.5}) 东部以及拉轨岗日被动陆缘盆地 (VII_{4.1})、北喜马拉雅碳酸盐岩台地 (VII_{4.2}) 中东部 (图 6c), 与区域淡色花岗岩分布范围较为一致, 分布有近年来新发现的错那洞铍锡钨矿、嘎波锂矿等; Cr 元素高值区分布特征明显, 基本呈条带状沿狮泉河-申扎-嘉黎蛇绿混杂岩带 (VII_{1.3}) 和印度河-雅鲁藏布江结合带 (VII₄) 展布 (图 6d), 在嘉黎以西、普兰以东及日喀则、仁布等地区含量较高; Cu 元素高值区分布较广, 主要位于拉达克-冈底斯-下察隅岩浆弧带 (VII_{1.6}) 中段 (图 6e), 与冈底斯斑岩型铜多金属矿带吻合, 区内分布有朱诺、雄村、东嘎、泽莫、甲玛、驱龙、厅宫、帮浦等多个大型、超大型铜多金属矿。Li 元素高值区基本位于拉轨岗日被动陆缘盆地 (VII_{4.1})、北喜马拉雅碳酸盐岩台地 (VII_{4.2}) 中东部 (图 6f), 与 Be 元素分布特征相似, 浓集中心与淡色花岗岩吻合; Mo 元素高值区与 Cu 元素重叠面积较大, 位于拉达克-冈底斯-下察隅岩浆弧带 (VII_{1.6}) 中段、隆格尔-工布江达复合岛弧带 (VII_{1.5}) 中部和东段 (图 6g), 表现为斑岩型铜多金属矿的伴生成矿元素或主要成矿元素。Pb 元素高值区沿带状展布于隆格尔-工布江达复合岛弧带 (VII_{1.5}) 中部、昂龙岗日-班戈-腾冲岩浆弧 (VII_{1.2}) 东部和拉轨岗日被动陆缘盆地 (VII_{4.1}) 东部 (图 6h), 与区域主要铅锌(银)矿床分布吻合; Sb 高值区元素分布范围较窄, 在拉轨岗日被动陆缘盆地 (VII_{4.1}) 和那曲-洛隆弧前盆地 (VII_{1.1}) 呈团块分布 (图 6i); Sn 为典型高温元素, 高值区呈团块分布, 表现为与岩体密切相关, 分布于拉轨岗日被动陆缘盆地 (VII_{4.1})、北喜马拉雅碳酸盐岩台地 (VII_{4.2}) 和昂龙岗日-班戈-腾冲岩浆弧 (图 6j); W 元素亦为高温元素, 高值区分布特征及范围与 Sn 元素近于一致 (图 6k); Zn 元素高值区分布范围较广, 呈串珠状及团块状分布于拉轨岗日被动陆缘盆地 (VII_{4.1}) 东部、隆格尔-工布江达复合岛弧带 (VII_{1.5}) 中部和昂龙岗日-班戈-腾冲岩浆弧 (VII_{1.2}) 东部, 与 Pb、Ag 元素高值区分布范围一致, 区内分布多个铅锌(银)矿床, 是铅锌(银)矿床的直接指示元素。

从构造单元角度来看, 拉达克-冈底斯-察隅湖盆系 (VII₁) 主要富集 Cu、Mo、Pb、Zn、Au、Ag 元素, 与区内主要矽卡岩型 Cu-Pb-Zn-Ag-(Fe) 矿床、斑岩-矽卡岩型 Cu-Mo-Pb-Zn-Ag 矿床和斑岩-浅成低温热液型 Cu-Au 矿床分布范围一致, 且由南向北元素含量具有逐渐降低的趋势。印度河-雅鲁藏布江结合带 (VII₄) 富集元素单一, 主要为 Au 和 Cr, Au 代表了区

域造山型金矿的成矿元素, Cr 是结合带内基性-超基性岩及其内部铬铁矿的指示元素。喜马拉雅地矿 (VII₄) 的元素富集可分为两组, 分别为 Pb-Zn-Au-Ag-(Sb) 和 Li-Be-Sn-W, 前者位于拉轨岗日被动陆缘盆地 (VII_{4.1}) 东部, 区内分布扎西康铅锌多金属矿床、吉松、柯月、索月、夏隆岗铅锌矿、明赛、姐纳各普金矿、马扎拉、姜仓、古堆金锑矿等, 是北喜马拉雅金锑多金属成矿带或喜马拉雅前陆褶皱带金锑成矿带的重要组成部分; 后者呈团块状, 分布于拉轨岗日被动陆缘盆地 (VII_{4.1})、北喜马拉雅碳酸盐岩台地 (VII_{4.2}) 中东部, 浓集中心与淡色花岗岩分布近于一致, 是与淡色花岗岩相关的伟晶岩型 Li 矿及矽卡岩型 Be-Sn-W 矿床的主要成矿元素。

4.3 元素背景与成矿作用类型

不同大地构造单元的成矿作用类型差异反映在区域地球化学方面表现为元素背景值的差异。喜马拉雅地块以发育 Au-(Sb)、Pb-Zn 和 Li-Be-Sn-W 等稀有金属成矿作用为主 (图 1), 富集 Au、Be、Li、Pb、Sb、Sn、W、Zn 等成矿元素 (图 3、图 7), 除 Au 元素外, 其余元素富集系数 (EC) 均大于 1.2 (图 3), 具体表现为在淡色花岗岩内部及边部富集高温 W、Sn 等成矿元素, 岩体向外逐渐富集中温 Pb、Zn 等成矿元素, 外围则以富集 Au、Sb 为主; 雅鲁藏布江结合带显著富集 Au、Cr, 富集系数 (EC) 分别为 1.27 和 1.43, 发育造山型金矿和岩浆熔离型铬铁矿 (图 1), 矿床分别富集 As、Sb 和 Co、Ni 等元素; 拉达克-冈底斯-察隅弧盆系具 Cu、Mo、Pb、Zn、Au、Ag 等元素的富集 (图 3、图 7), 且从北向南, 元素富集程度逐渐提高, 特别是在狮泉河-申扎-嘉黎蛇绿混杂岩带以南的隆格尔-工布江达复合岛弧带、拉达克-冈底斯-下察隅岩浆弧带和日喀则弧前盆地具 Cu、Mo、Pb、Zn、Au、Ag 等元素的明显富集 (图 3、图 7), 发育大规模铜多金属成矿作用, 以斑岩型、斑岩-矽卡岩型、斑岩-浅成低温热液型和矽卡岩型为主, 从岩体边部向外大体呈现出现 Cu-(Mo)→Pb-Zn→Au-(Ag) 的富集特征。综上所述, 不同大地构造单元具有显著差异的构造-岩浆演化过程, 导致了不同元素的富集, 因此发育了不同类型的成矿作用。

5 找矿远景区圈定

区域地球化学元素背景值是区域找矿预测的重要地球化学指标。根据元素背景特征、组合特征及

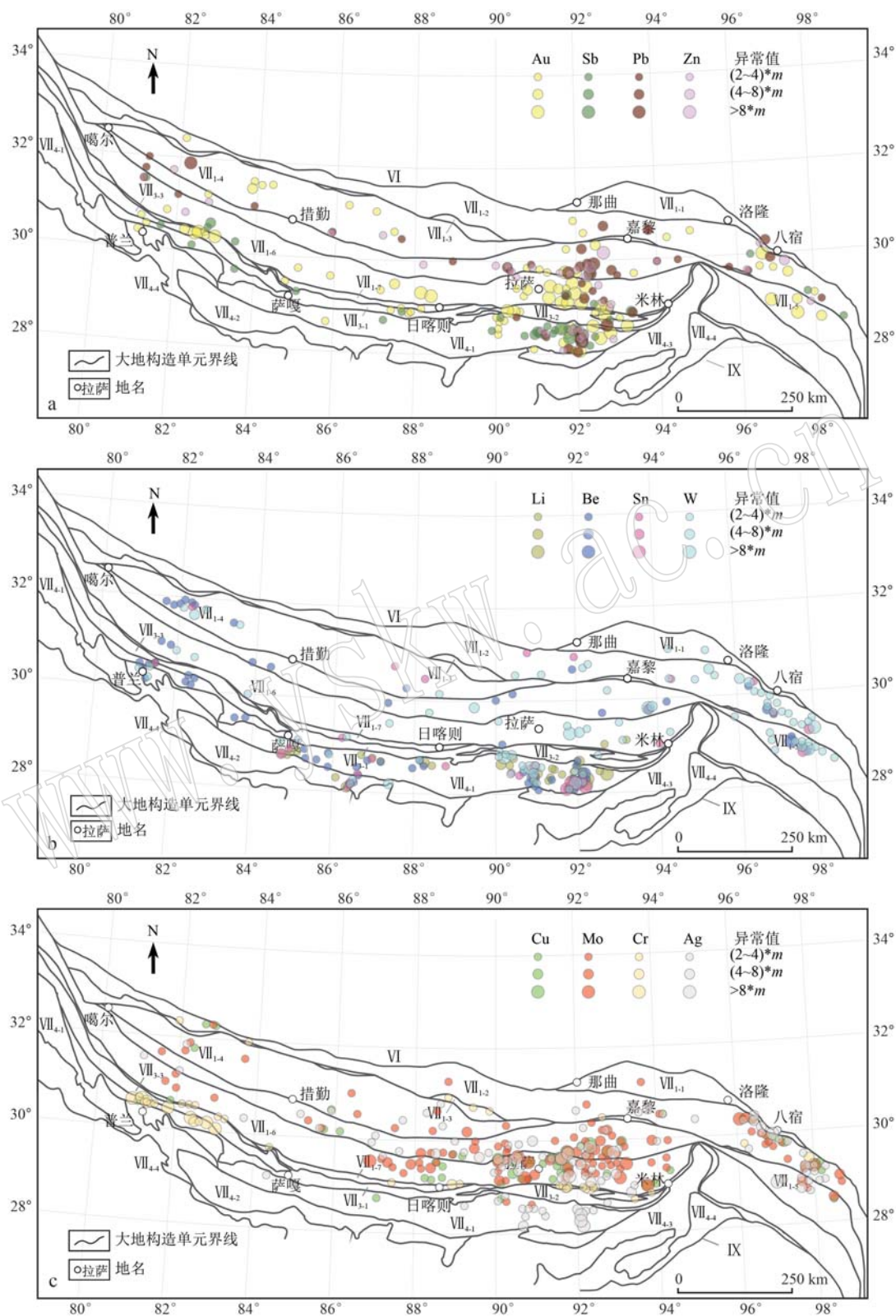


图 7 西藏冈底斯-喜马拉雅主要成矿元素异常气泡图

Fig. 7 Anomalous bubble map of major metallogenic elements of Gangdese-Himalaya in Xizang

审图号、地图投影参数和大地构造单元区划同图 1

the map approval number, projection parameters and tectonic unit division are the same as in Fig. 1

其与成矿作用类型的关系,结合冈底斯-喜马拉雅内部各次级构造单元构造-岩浆演化过程的差异和已有矿床(点)发育特征等,将找矿远景区划分为 I、II、III 三类,最终圈定找矿远景区。其中, I 类找矿远景区元素异常强度和规模大,元素组合特征与已知矿床元素异常相似,属矿致异常,且异常出现在成矿有利部位或与已知矿床空间分布特征吻合; II 类

找矿远景区元素异常具一定规模和强度,元素异常组合特征与区域已知矿床具有可对比性,但规模相对较小; III 类找矿远景区元素异常组合单一,规模小,强度一般,与已知矿床对比性一般或较差。以此为优选原则,最终在西藏冈底斯-喜马拉雅圈定 I 类找矿远景区 7 处、II 类找矿远景区 9 处、III 类远景区 17 处(图 8),各找矿远景区详细信息见表 8 所示。

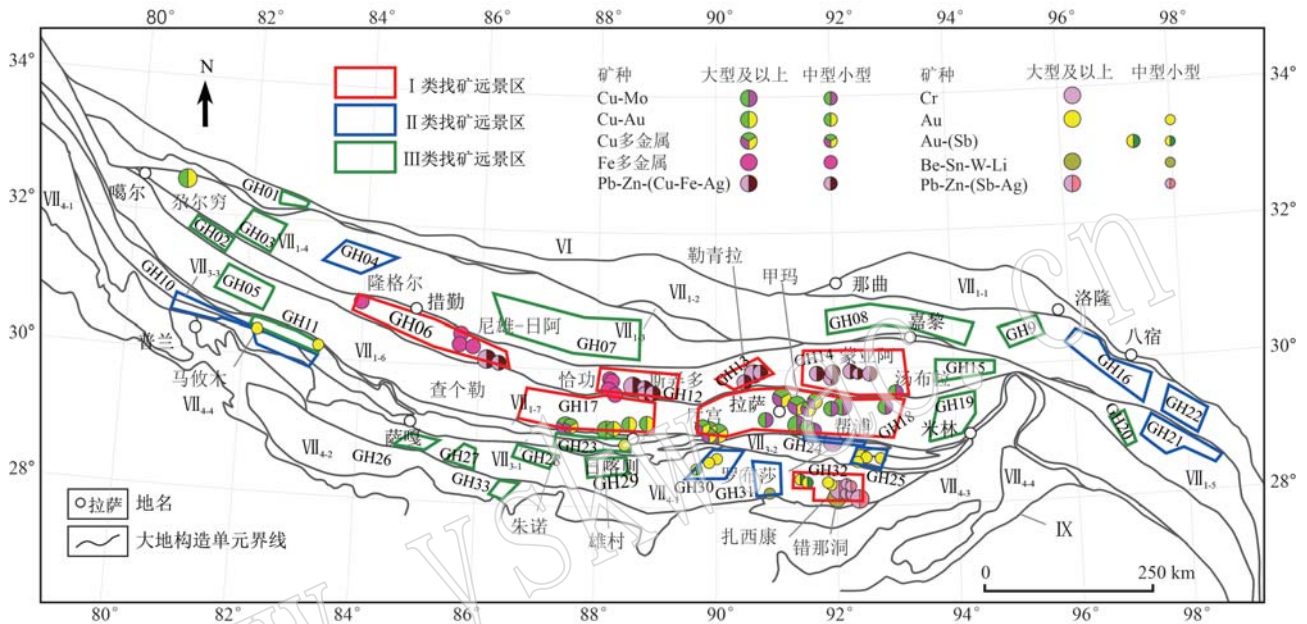


图 8 西藏冈底斯-喜马拉雅找矿预测图

Fig. 8 Prospecting prediction map of Gangdese-Himalaya in Xizang

审图号、地图投影参数、大地构造单元区划及矿床(点)数据引用源同图 1

the map approval number, projection parameters, tectonic unit division and reference source of mineral deposit (point) data are the same as in Fig. 1

为了更好地理解找矿远景区划分原则,以 I 类找矿远景区为例,逐一介绍了各找矿远景区内元素背景、异常组合及矿床(点)发育特征,详述如下:

桑弄-北纳 I 类找矿远景区 (GH06): 远景区内具 Cu、Mo、Fe、Pb、Zn、Ag 等多金属异常,尤其在远景区东南侧, Pb、Zn 异常规模较大。在矿产资源方面,由西向东已发现有隆格尔、滚旧、尼雄、沙松铁矿、日阿铜多金属矿以及查个勒、邦布勒铅锌铜矿等,是冈底斯中北部地区大型-超大型铁铜矿产的典型代表,具有进一步寻找 Cu、Fe、Pb、Zn 等金属矿产的潜力。

斯弄多 I 类找矿远景区 (GH012): 远景区发育 Pb、Zn、Ag 组合异常,异常强度和规模大,区内目前已发现恰功铁矿和斯弄多大型铅锌银矿床,且元素异常与矿床分布空间位置叠合,属矿致异常。

勒青拉 I 类找矿远景区 (GH013): 该远景区发育 Cu、Mo、Pb、Zn、Ag 组合异常,异常强度大而集中,

异常强度空间分布与区内分布的列廷冈-勒青拉砂卡岩型 Fe-Cu-Pb-Zn 矿床套合,为矿致异常,具有进一步寻找同类型矿床的潜力。

蒙亚阿 I 类找矿远景区 (GH014): 区内具 Cu、Mo、Pb、Zn、Au、Ag 组合异常,异常强度高,规模大,元素组合异常与已发现的蒙亚阿铅锌矿、亚贵拉铅锌银钼多金属矿、沙让钼矿和洞中拉铅锌矿等空间分布吻合,属典型矿致异常,找矿潜力大。

朱诺-雄村 I 类找矿远景区 (GH017): 该远景区分布范围与西藏雄村-朱诺一带铜钼矿重点调查区、西藏雄村铜矿重点调查区、西藏朱诺-北姆朗铜矿重点调查区重合,区内发育 Cu、Mo、Au 元素组合异常,异常强度大而集中,异常浓集中心内分布朱诺、雄村、东嘎和泽莫多拉等多个 Cu-Au 矿床,具有 Cu-Au 矿床找矿潜力。

厅宫-帮浦 I 类找矿远景区 (GH018): 该远景区

表8 西藏冈底斯-喜马拉雅找矿远景区一览表

Table 8 List of prospecting potential area of Gangdese-Himalaya in Xizang

编号	类别	名称	矿种	划分依据
GH01	Ⅲ	文布当桑	Cu-Mo	异常强度一般,元素组合单一。
GH02	Ⅲ	结克	Pb-Zn	异常强度一般,规模小,元素组合单一。
GH03	Ⅲ	亚热	Be-Sn-W-(Mo)	Be、Sn、W 异常规模与强度一般,Mo 相对较弱,异常元素组合与已知矿床可对比。
GH04	Ⅱ	天公尼勒	Au-(Cu)	Au 异常规模与强度较大,Cu 相对较弱,异常元素组合与已知矿床可对比。
GH05	Ⅲ	玖玛	Cu-Mo	异常规模较大,但强度一般,元素组合单一,异常元素组合与已知矿床可对比。
GH06	I	桑弄-北纳	Cu-Mo-Pb-Zn-Fe-Ag	异常强度高,规模大,元素组合异常与已知矿床空间分布吻合。
GH07	Ⅲ	卡窝查	Cu-Mo-Au-Ag	元素组合异常与已发现的矿化点空间分布吻合,但异常强度和规模一般。
GH08	Ⅲ	夏玛	Cu-Mo-Au-Ag	异常强度一般,暂未见相关矿化。
GH09	Ⅲ	邦肯	W	异常强度高,规模较小,元素组合单一。
GH10	Ⅱ	霍尔-嘎布	Cr、(Be)	异常强度高,规模大,与已知矿床可对比。
GH11	Ⅲ	当穷	Au	异常强度高,与已知矿床可对比,推测为矿致异常,但规模较小。
GH12	I	斯弄多	Pb-Zn-Ag	异常强度高,规模大,元素组合异常与已知矿床空间分布吻合。
GH13	I	勒青拉	Cu-Mo-Pb-Zn-Ag-Fe	异常强度高,规模大,元素组合异常与已知矿床空间分布吻合。
GH14	I	蒙亚阿	Cu-Mo-Pb-Zn-Au-Ag	异常强度高,规模大,元素组合异常与已知矿床空间分布吻合。
GH15	Ⅲ	隅果	Pb-Zn、W	异常强度一般,元素组合单一。
GH16	Ⅱ	金木果-加弄	Cu-Mo-Au-Ag、(Be-Sn)-W	异常强度和规模较大,元素组合异常与已知矿化点空间分布吻合,为矿致异常。
GH17	I	朱诺-雄村	Cu-Mo-Au	异常强度高,规模大,元素组合异常与已知矿床空间分布吻合,为矿致异常。
GH18	I	厅宫-帮浦	Cu-Mo-Au-Ag	异常强度高,规模大,元素组合异常与已知矿床空间分布吻合,为矿致异常。
GH19	Ⅲ	索朗	Cu-Mo	异常强度一般,规模较小。
GH20	Ⅲ	格雄	Au-Ag、W	异常强度一般,规模较小。
GH21	Ⅱ	那阿	Cu-Au-Ag、(Be-Sn)-W	异常强度和规模较大,元素组合异常与已知矿化点空间分布吻合,为矿致异常。
GH22	Ⅱ	谷贡	Cu-Mo-Au-Ag、(Be-Sn)-W	异常强度和规模较大,元素组合异常与已知矿化点可对比。
GH23	Ⅲ	拉孜-萨迦	Au	元素异常与已知矿化点可对比,但强度和规模一般。
GH24	Ⅱ	仁布-罗布莎	Cr	异常强度高,且与已知矿床空间分布吻合,为矿致异常,但规模较小。
GH25	Ⅱ	邦布	Au	异常强度高,且与已知矿床空间分布吻合,为矿致异常,但规模较小。
GH26	Ⅲ	贡当	Li-Be-Sn-W	具有与已知矿点可对比的异常组合,但异常强度和规模一般。
GH27	Ⅲ	寺龙	Be	异常强度一般,规模较小,异常元素单一。
GH28	Ⅲ	盆吉	Li-Be-Sn	具有与已知矿点可对比的异常组合,但异常强度和规模一般。
GH29	Ⅲ	定结-康马	Li-Be-Sn-W	具有与已知矿点可对比的异常组合,但异常强度和规模一般。
GH30	Ⅱ	浪卡子	Au-Sb、(Li-W)	异常强度和规模一般,与区内已知矿化点空间分布吻合,为矿致异常。
GH31	Ⅱ	洛扎	Li-Be-Sn-W、Ag	异常强度和规模较大,具有与已知矿点可对比的异常组合。
GH32	I	扎西康-马扎拉	Au-Sb-Pb-Zn-Ag、Li-Be-Sn-W	异常强度高,规模大,元素组合异常与已知矿床空间分布吻合,为矿致异常。
GH33	Ⅲ	聂拉木	Li-Be-Sn-W	具有与已知矿点可对比的异常组合,但异常强度和规模一般。

呈东西向带状延伸,地处冈底斯-喜马拉雅铜铅锑等多金属矿产基础调查区东段,区内涵盖西藏帮浦铜矿重点勘查区、西藏工布江达加兴铜矿重点勘查区、西藏墨竹工卡驱龙-甲玛铜矿重点勘查区、西藏达孜拉抗俄铜矿重点勘查区和西藏努日铜矿重点勘查区等,发育 Cu、Mo、Au、Ag 组合异常,各元素异常高值超过远景区所在Ⅱ级构造的单元背景值的 8 倍,异常浓集中心分布甲玛、驱龙、厅宫、帮浦等多个铜多金属矿床,是冈底斯斑岩铜矿带的重要组成部分。

扎西康-马扎拉 I 类找矿远景区 (GH032): 远景区内发育 Au、Sb、Pb、Zn、Ag 和 Li、Be、Sn、W 组合异常,异常强度高、规模大,区内分布藏南马扎拉-扎西康锑矿重点调查区、西藏隆子错那洞祥林锡铍矿重点勘查区,异常空间分布与扎西康铅锌多金属矿

床、吉松、柯月、索月、夏隆岗铅锌矿、明赛、姐纳各普金矿、马扎拉、姜仓、古堆金锑矿以及错那洞铍锡钨矿、嘎波锂矿等分布吻合,具有进一步寻找同类型矿床的潜力。

6 结论

(1) 西藏冈底斯-喜马拉雅造山系各元素背景变化较大,具有显著差异富集的特点,表现为喜马拉雅地块富集 Li、Be、Sn、W、Au、Sb、Pb、Zn,雅鲁藏布江结合带富集 Au、Cr,拉达克-冈底斯-察隅弧盆系富集 Cu、Mo、Pb、Zn、Au、Ag 等,且在拉达克-冈底斯-察隅弧盆系内部,由北向南元素富集程度逐渐提高。

(2) 差异化的构造-岩浆演化过程导致不同大

地构造单元元素差异富集,进而发育不同类型的成矿作用。

(3) 以元素背景、组合特征及其与成矿作用类型的关系为基础,圈定Ⅰ类找矿远景区7处、Ⅱ类找矿远景区9处和Ⅲ类远景区17处,以期服务新一轮找矿突破战略行动。

致谢 数据采集与处理工作得到了成都地质矿产研究所(现中国地质调查局成都地质调查中心)、中国科学院地球物理地球化学勘查研究所、西藏自治区地质调查院、四川省地质调查院、湖北省地质调查院、甘肃省地质调查院、河南省地质调查院、陕西省地质勘查开发局第二综合物探大队(现陕西省第二物探大队有限公司)、青海省地质调查院、江西省地质调查院、云南省地质调查院、云南省地质调查局等众多地勘、科研单位的鼎力支持。中国地质调查局地球物理与地球化学研究所公开的全国地球化学图及中国地球化学基准计划数据为本文撰写提供了部分数据支撑。

References

- Cao H W, Pei Q M, Yu X, *et al.* 2023. Discovery of the large-scale Eocene Xiwu Pb-Zn-Ag deposit in the Tethyan Himalaya: Geochronology, geochemistry, and C-H-O-S-Pb-Sr-Nd isotopes [J]. *Gondwana Research*, 124: 165~187.
- Chen H J, Sun X M, Li D F, *et al.* 2022. In situ apatite U-Pb dating for the ophiolite-hosted Nianzha orogenic gold deposit, Southern Tibet [J]. *Ore Geology Reviews*, 144: 104811.
- Cheng Zhizhong, Xie Xuejin, Pan Hanjiang, *et al.* 2011. Abundance of elements in stream sediment in South China [J]. *Earth Science Frontiers*, 18(5): 289~295 (in Chinese with English abstract).
- Chung S L, Chu M F, Zhang Y Q, *et al.* 2005. Tibetan tectonic evolution inferred from spatial and temporal variations in post-collisional magmatism [J]. *Earth-Science Reviews*, 68(3~4): 173~196.
- Dewey J F, Cande S C and Pitman W C. 1989. Tectonic evolution of the India/Eurasia collision zone [J]. *Eclogae Geologicae Helveticae*, 82(3): 717~734.
- Domeier M and Torsvik T H. 2014. Plate tectonics in the Late Paleozoic [J]. *Geoscience Frontiers*, 5(3): 303~350.
- Du Peixuan and Tian Surong. 2001. Average background values of elements in rocks, debris and stream sediments of Xinjiang Region [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 25(2): 117~122 (in Chinese with English abstract).
- Duan J L, Tang J X and Lin B. 2016. Zinc and lead isotope signatures of the Zhaxikang Pb-Zn deposit, South Tibet: Implications for the source of the ore-forming metals [J]. *Ore Geology Reviews*, 78: 58~68.
- Guo Weikang, Li Guangming, Fu Jiangang, *et al.* 2023. Metallogenic epoch, magmatic evolution and metallogenic significance of the Gabo lithium pegmatite deposit, Himalayan metallogenic belt, Tibet [J]. *Earth Science Frontiers*, 30(5): 275~297 (in Chinese with English abstract).
- Jiang S H, Nie F J, Hu P, *et al.* 2009. Mayum: An orogenic gold deposit in Tibet, China [J]. *Ore Geology Reviews*, 36(1): 160~173.
- Kapp P and DeCelles P G. 2019. Mesozoic-Cenozoic geological evolution of the Himalayan-Tibetan orogen and working tectonic hypotheses [J]. *American Journal of Science*, 319(3): 159~254.
- Kapp P, DeCelles P G, Leier A L, *et al.* 2007. The Gangdese retroarc fold-thrust belt revealed [J]. *Abstracts with Programs—Geological Society of America*, 17(7): 4~9.
- Kürzl H. 1988. Exploratory data analysis: Recent advances for the interpretation of geochemical data [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 30(1): 309~322.
- Lan Q, Hu R Z, Bi X W, *et al.* 2024. In-situ analysis of sphalerite trace elements and sulfur isotope of the Zhaxikang Pb-Zn-Sb-Ag deposit in Southern Tibet: Implications for source and mineralization process [J]. *Ore Geology Reviews*, 167: 105976.
- Li Guangming, Duan Zhiming, Huang Yong, *et al.* 2017a. Geology and Mineralization of Gangdese-Himalaya, Tibet [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1~47 (in Chinese).
- Li Guangming, Fu Jiangang, Guo Weikang, *et al.* 2022. Discovery of the Gabo granitic pegmatite-type lithium deposit in the Kulanggri Dome, eastern Himalayan metallogenic belt, and its prospecting implication [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 41(6): 1109~1119 (in Chinese with English abstract).
- Li Guangming, Zeng Qinggao, Yong Yongyuan, *et al.* 2005. Discovery of epithermal Au-Sb deposits in Gangdese metallogenic belt of Tibet and its significance: Case study of Longruri Au-Sb deposit [J]. *Mineral Deposits*, 24(6): 595~602 (in Chinese with English abstract).
- Li Guangming, Zhang Linkui, Jiao Yanjie, *et al.* 2017b. First discovery and implications of Cuonadong superlarge Be-W-Sn polymetallic deposit in Himalayan metallogenic belt, southern Tibet [J]. *Mineral Deposits*, 36(4): 1003~1008 (in Chinese with English abstract).
- Li Guangming, Zhang Linkui, Zhang Zhi, *et al.* 2021. New exploration progresses, resource potentials and prospecting targets of strategic

- minerals in the southern Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 41(2): 351~360 (in Chinese with English abstract).
- Li H F, Tang J X, Hu G Y, *et al.* 2019. Fluid inclusions, isotopic characteristics and geochronology of the Sinongduo epithermal Ag-Pb-Zn Deposit, Tibet, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 107: 692~706.
- Li Hongliang, Huang Hai, Li Yuanling, *et al.* 2022. Geohazard effect of plate suture zone along Sichuan-Tibet Traffic Corridor[J]. *Earth Science*, 47(12): 4 523~4 545 (in Chinese with English abstract).
- Li Hongliang, Huang Hai, Zhang Yong, *et al.* 2024. Geological genesis model of red strata landslide in Qamdo, eastern Xizang[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 44(3): 493~509 (in Chinese with English abstract).
- Li Hongliang and Li Guangming. 2019a. Compositional characteristics of pyrite ore formed in the main metallogenic period of various types of hydrothermal gold deposits[J]. *Earth Science Frontiers*, 26(3): 202~210 (in Chinese with English abstract).
- Li Hongliang, Li Guangming, Ding Jun, *et al.* 2020. Genesis of Zhaxikang Pb-Zn polymetallic deposit in Southern Tibet: Evidence from in situ S isotopes of sulfides[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 50(5): 1 289~1 303 (in Chinese with English abstract).
- Li Hongliang, Li Guangming, Li Yingxu, *et al.* 2017. A study on ore geological characteristics and fluid inclusions of Jienagepu gold deposit in Zhaxikang ore concentration district, Southern Tibet, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 37(6): 684~696 (in Chinese with English abstract).
- Li Hongliang, Li Guangming, Liu Hong, *et al.* 2019b. Petrogenesis of paleocene granite porphyry of Daruo area in Western Lhasa Block, Tibet: Constraints from geochemistry, zircon U-Pb chronology and Sr-Nd-Pb-Hf isotopes[J]. *Earth Science*, 44(7): 2 275~2 297 (in Chinese with English abstract).
- Li Hongliang, Li Guangming, Zhang Zhi, *et al.* 2016. Ore-controlling factors and prospecting prediction of Zhaxikang Pb-Zn polymetallic deposit, Southern Tibet[J]. *Metal Mine*, 45(10): 103~108 (in Chinese with English abstract).
- Li Hongliang, Li Guangming, Zhang Zhi, *et al.* 2021. Genesis of Jienagepu gold deposit in Zhaxikang ore concentration area, Eastern Tethys Himalayas: Constraints from He-Ar and in-situ S isotope of pyrite[J]. *Earth Science*, 46(12): 4 291~4 315 (in Chinese with English abstract).
- Li Hongliang, Yang Dongxu, Tian You, *et al.* 2023. Genesis and its geodynamic significance of Late Cretaceous granites in North Lancang river suture[J]. *Earth Science*, 48(4): 1 330~1 350 (in Chinese with English abstract).
- Lin Caihao and You Aizhen. 1996. Micro element content characteristics and minerogenetic prospect prediction of stream sediment in Fujian Province[J]. *Geology and Exploration*, 32(5): 33~36 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chi, Zhang Hua, Tang Zhengjiang, *et al.* 2013. Statistics of series of geochemical parameters for the forest swamp landscape in China[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 37(4): 585~590 (in Chinese with English abstract).
- Liu H, Huang H X, Li G M, *et al.* 2023. Subduction-related Late Triassic Luerma porphyry copper deposit, Western Gangdese, Tibet, China: Evidence from geology, geochemistry, and geochronology[J]. *Ore Geology Reviews*, 154: 105253.
- Liu Hong, Li Guangming, Huang Hanxiao, *et al.* 2019a. Sources of ore-forming materials of Luerma porphyry copper (gold) deposit, western Gangdise[J]. *Mineral Deposits*, 38(3): 631~643 (in Chinese with English abstract).
- Liu Hong, Zhang Linkui, Huang Hanxiao, *et al.* 2019b. Origin and evolution of ore-forming fluids in Luerma porphyry copper (gold) deposit from Western Gangdese[J]. *Earth Science*, 44(6): 1 935~1 956 (in Chinese with English abstract).
- Liu Hong, Zhang Linkui, Huang Hanxiao, *et al.* 2020. Evolution of ore-forming fluids in the Luobuzhen epithermal gold-silver deposit in western Gangdise: Fluid inclusion and H-O isotope evidence[J]. *Earth Science Frontiers*, 27(4): 49~65 (in Chinese with English abstract).
- Meng Yuanku, Yuan Haoqi, Wei Youqing, *et al.* 2022. Research progress and prospect of the Gangdese magmatic belt in Southern Tibet[J]. *Geological Journal of China Universities*, 28(1): 1~31 (in Chinese with English abstract).
- Ouyang Yuan, Liu Hong, Li Guangming, *et al.* 2023. Mineral search prediction based on Random Forest algorithm—A case study on porphyry-epithermal copper polymetallic deposits in the western Gangdise metallogenic belt[J]. *Geology in China*, 50(2): 303~330 (in Chinese with English abstract).
- Pan G T, Wang L Q, Li R S, *et al.* 2012. Tectonic evolution of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 53: 3~14.
- Pan Guitang, Wang Liqun, Zhang Wanping, *et al.* 2013. Geotectonic map and Description of the Qinghai-Tibet Plateau and its Adjacent Areas (1:1 500 000)[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~155 (in Chinese).
- Qi Xuexiang, Li Tianfu, Meng Xiangjin, *et al.* 2008. Cenozoic tectonic

- evolution of the Tethyan Himalayan foreland fault-fold belt in southern Tibet, and its constraint on antimony-gold polymetallic minerogenesis [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(7): 1 638~1 648 (in Chinese with English abstract).
- Reimann C, Filzmoser P and Garrett R G. 2005. Background and threshold: Critical comparison of methods of determination[J]. *Science of The Total Environment*, 346(1): 1~16.
- Shi Changyi, Liang Meng and Feng Bin. 2016. Average background values of 39 chemical elements in stream sediments of China[J]. *Earth Science*, 41(2): 234~251 (in Chinese with English abstract).
- Sun X M, Wei H X, Zhai W, *et al.* 2016. Fluid inclusion geochemistry and Ar-Ar geochronology of the Cenozoic Bangbu orogenic gold deposit, Southern Tibet, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 74: 196~210.
- Tang Juxing. 2019. Mineral resources base investigation and research status of the Tibet Plateau and its adjacent major metallogenic belts[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(3): 617~624 (in Chinese with English abstract).
- Tang Juxing, Wang Qin, Yang Chao, *et al.* 2014. Two porphyry-epithermal deposit metallogenic subseries in Tibetan Plateau; Practice of "absence prospecting" deposit metallogenic series[J]. *Mineral Deposits*, 33(6): 1 151~1 170 (in Chinese with English abstract).
- Tang P, Tang J X, Wang L Q, *et al.* 2024. Apatite and zircon geochemistry deciphers difference in the nature of ore-forming magma in the Bangpu porphyry Mo-Cu deposit, Tibet[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 264: 106049.
- Wang D, Zheng Y Y, Mathur R, *et al.* 2021. Zinc and cadmium isotopic constraints on ore formation and mineral exploration in epithermal System: A reconnaissance study at the Keyue and Zhaxikang Sb-Pb-Zn-Ag deposits in Southern Tibet [J]. *Ore Geology Reviews*, 139: 104594.
- Wang Liquan, Li Dingmou, Pan Guitang, *et al.* 2015. Minerals, Metallogenic Background and Specification of the Qinghai-Tibet Plateau (1:1 500 000)[M]. Chengdu: Chengdu Map Publishing House, 1~173 (in Chinese).
- Wang Liquan, Pan Guitang, Ding Jun, *et al.* 2013. Geological map and Description of the Qinghai-Tibet Plateau and its Adjacent Areas (1:1 500 000)[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~247 (in Chinese).
- Wang Qingfei, Deng Jun, Weng Weijun, *et al.* 2020. Cenozoic orogenic gold system in Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 36(5): 1 315~1 354 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yonghua. 2019. Geochemical Atlas of Southwest China[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1~188 (in Chinese).
- Xie Fuwei, Lang Xinghai, Tang Juxing, *et al.* 2022. Metallogenic regularity of Gangdese Metallogenic Belt, Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 41(5): 952~974 (in Chinese with English abstract).
- Xie F W, Tang J X, Chen Y C, *et al.* 2018. Apatite and zircon geochemistry of Jurassic porphyries in the Xiongcu district, Southern Gangdese porphyry copper belt: Implications for petrogenesis and mineralization[J]. *Ore Geology Reviews*, 96: 98~114.
- Xie Xuejin, Ren Tianxiang, Xi Xiaohuan, *et al.* 2009. The implementation of the regional geochemistry-national reconnaissance program (RGNR) in China in the past thirty years[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 30(6): 700~716 (in Chinese).
- Xie Y L, Li L M, Wang B G, *et al.* 2017. Genesis of the Zhaxikang epithermal Pb-Zn-Sb deposit in Southern Tibet, China: Evidence for a magmatic link[J]. *Ore Geology Reviews*, 80: 891~909.
- Xu Zhigang, Chen Yuchuan, Wang Denghong, *et al.* 2008. Scheme of Metallogenic Belt Division in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~111 (in Chinese).
- Xu Zhiqin, Li Haibing and Yang Jingsui. 2006. An orogenic plateau—the orogenic collage and orogenic types of the Qinghai-Tibet plateau [J]. *Earth Science Frontiers*, 13(4): 1~17 (in Chinese with English abstract).
- Yin A and Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28(1): 211~280.
- Zhai W, Sun X M, Yi J Z, *et al.* 2014. Geology, geochemistry, and genesis of orogenic gold-antimony mineralization in the Himalayan Orogen, South Tibet, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 58: 68~90.
- Zhang X N, Li G M, Qin K Z, *et al.* 2020. Porphyry to epithermal transition at the Rongna Cu-(Au) deposit, Tibet: Insights from H-O isotopes and fluid inclusion analysis[J]. *Ore Geology Reviews*, 123: 103585.
- Zhang Zeming, Ding Huixia, Dong Xin, *et al.* 2019. Formation and evolution of the Gangdese magmatic arc, southern Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(2): 275~294 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z M, Ding L, Zhao Z D, *et al.* 2017. Tectonic evolution and dynamics of the Tibetan Plateau[J]. *Gondwana Research*, 41: 1~8.
- Zhang Z, Li G M, Zhang L K, *et al.* 2020. Genesis of the Mingsai Au deposit, Southern Tibet: Constraints from geology, fluid inclusions, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology, H-O isotopes, and in situ sulfur isotope compositions of pyrite[J]. *Ore Geology Reviews*, 122: 103488.
- Zhang Zhi, Li Guangming and Zhang Linkui. 2022. Exploration and research progresses of rare metals in Himalayan belt, Tibet[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 42(2): 176~188 (in Chinese).

nese with English abstract).

Zheng W B, Liu B L, Tang J X, *et al.* 2022. Exploration indicators of the Jiama porphyry-skarn deposit, Southern Tibet, China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 236: 106982.

Zheng X, Sun X, Li Q, *et al.* 2020. Genesis of the Bangbu gold deposit in the Southern Tibet: Evidenced from in-situ sulfur isotopes and trace element compositions of pyrite[J]. *Ore Geology Reviews*, 126: 103591.

Zheng Youye, Sun Xiang, Tian Liming, *et al.* 2014. Mineralization, deposit type and metallogenic age of the gold antimony polymetallic belt in the eastern part of north Himalayan[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 38(1): 108~118 (in Chinese with English abstract).

Zhu D C, Wang Q, Cawood P A, *et al.* 2017. Raising the Gangdese Mountains in Southern Tibet[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(1): 214~223.

Zhu D C, Wang Q, Weinberg R F, *et al.* 2022. Interplay between oceanic subduction and continental collision in building continental crust [J]. *Nature Communications*, 13(1): 7 141.

附中文参考文献

程志中, 谢学锦, 潘含江, 等. 2011. 中国南方地区水系沉积物中元素丰度[J]. *地学前缘*, 18(5): 289~295.

杜佩轩, 田素荣. 2001. 新疆岩石·岩屑·水系沉积物元素背景平均值[J]. *物探与化探*, 25(2): 117~122.

郭伟康, 李光明, 付建刚, 等. 2023. 喜马拉雅成矿带嘎波伟晶岩型锂矿成矿时代、岩浆演化及成矿指示意义[J]. *地学前缘*, 30(5): 275~297.

李光明, 段志明, 黄 勇, 等. 2017a. 西藏冈底斯-喜马拉雅地质与成矿[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1~47.

李光明, 付建刚, 郭伟康, 等. 2022. 西藏喜马拉雅成矿带东段嘎波伟晶岩型锂矿的发现及其意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 41(6): 1 109~1 119.

李光明, 曾庆贵, 雍永源, 等. 2005. 西藏冈底斯成矿带浅成低温热液型金锑矿床的发现及其意义——以西藏弄如日金锑矿床为例[J]. *矿床地质*, 24(6): 595~602.

李光明, 张林奎, 焦彦杰, 等. 2017b. 西藏喜马拉雅成矿带错那洞超大型铍锡钨多金属矿床的发现及意义[J]. *矿床地质*, 36(4): 1 003~1 008.

李光明, 张林奎, 张 志, 等. 2021. 青藏高原南部的主要战略性矿产: 勘查进展、资源潜力与找矿方向[J]. *沉积与特提斯地质*, 41(2): 351~360.

李洪梁, 黄 海, 李元灵, 等. 2022. 川藏交通廊道沿线板块缝合带地质灾害效应[J]. *地球科学*, 47(12): 4 523~4 545.

李洪梁, 黄 海, 张 勇, 等. 2024. 藏东昌都红层滑坡的地质成因模式[J]. *沉积与特提斯地质*, 44(3): 493~509.

李洪梁, 李光明. 2019a. 不同类型热液金矿床主成矿期黄铁矿成分标型特征[J]. *地学前缘*, 26(3): 202~210.

李洪梁, 李光明, 丁 俊, 等. 2020. 藏南扎西康铅锌多金属矿床成因——硫化物原位硫同位素证据[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 50(5): 1 289~1 303.

李洪梁, 李光明, 李应栩, 等. 2017. 藏南扎西康矿集区组纳各普金矿床地质与流体包裹体特征[J]. *矿物学报*, 37(6): 684~696.

李洪梁, 李光明, 刘 洪, 等. 2019b. 拉萨地体西段达若地区古新世花岗斑岩成因: 锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学和 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素的约束[J]. *地球科学*, 44(7): 2 275~2 297.

李洪梁, 李光明, 张 志, 等. 2016. 藏南扎西康铅锌多金属矿床控矿因素及找矿预测[J]. *金属矿山*, 45(10): 103~108.

李洪梁, 李光明, 张 志, 等. 2021. 特提斯喜马拉雅东段扎西康矿集区组纳各普金矿床成因: 黄铁矿 He-Ar 及原位 S 同位素约束[J]. *地球科学*, 46(12): 4 291~4 315.

李洪梁, 杨东旭, 田 尤, 等. 2023. 北澜沧江结合带晚白垩世花岗岩成因及其地球动力学意义[J]. *地球科学*, 48(4): 1 330~1 350.

林才浩, 尤爱珍. 1996. 福建省微量元素含量特征及成矿远景预测[J]. *地质与勘探*, 32(5): 33~36.

刘 驰, 张 华, 汤正江, 等. 2013. 我国森林沼泽景观区地球化学系列参数统计[J]. *物探与化探*, 37(4): 585~590.

刘 洪, 李光明, 黄瀚霄, 等. 2019a. 冈底斯成矿带西段鲁尔玛斑岩型铜(金)矿床的成矿物质来源研究[J]. *矿床地质*, 38(4): 631~643.

刘 洪, 张林奎, 黄瀚霄, 等. 2019b. 冈底斯西段鲁尔玛斑岩型铜(金)矿成矿流体性质及演化[J]. *地球科学*, 44(6): 1 935~1 956.

刘 洪, 张林奎, 黄瀚霄, 等. 2020. 冈底斯西段罗布真浅成低温热液型银金矿的成矿流体演化: 来自流体包裹体、H-O 同位素的证据[J]. *地学前缘*, 27(4): 49~65.

孟元库, 袁昊岐, 魏友卿, 等. 2022. 藏南冈底斯岩浆带研究进展与展望[J]. *高校地质学报*, 28(1): 1~31.

欧阳渊, 刘 洪, 李光明, 等. 2023. 基于随机森林算法的找矿预测——以冈底斯成矿带西段斑岩-浅成低温热液型铜多金属矿为例[J]. *中国地质*, 50(2): 303~330.

潘桂棠, 王立全, 张万平, 等. 2013. 青藏高原及邻区大地构造图及说明书(1:1 500 000)[M]. 北京: 地质出版社, 1~155.

戚学祥, 李天福, 孟祥金, 等. 2008. 藏南特提斯喜马拉雅前陆断褶

- 带新生代构造演化与铋金多金属成矿作用[J]. 岩石学报, 24(7): 1 638~1 648.
- 史长义, 梁 萌, 冯 斌. 2016. 中国 39 种元素系列背景值[J]. 地球科学, 41(2): 234~251.
- 唐菊兴. 2019. 青藏高原及邻区重要成矿带矿产资源基地调查与研究进展[J]. 岩石学报, 35(3): 617~624.
- 唐菊兴, 王 勤, 杨 超, 等. 2014. 青藏高原两个斑岩-浅成低温热液矿床成矿亚系列及其“缺位找矿”之实践[J]. 矿床地质, 33(6): 1 151~1 170.
- 王立全, 李定谋, 潘桂棠, 等. 2015. 青藏高原矿产及成矿背景及说明书(1:1 500 000)[M]. 成都: 成都地图出版社, 1~173.
- 王立全, 潘桂棠, 丁 俊, 等. 2013. 青藏高原及邻区地质图及说明书(1:1 500 000)[M]. 北京: 地质出版社, 1~247.
- 王庆飞, 邓 军, 翁伟俊, 等. 2020. 青藏高原新生代造山型金成矿系统[J]. 岩石学报, 36(5): 1 315~1 354.
- 王永华. 2019. 中国西南地区地球化学图集[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1~188.
- 谢富伟, 郎兴海, 唐菊兴, 等. 2022. 西藏冈底斯成矿带成矿规律[J]. 矿床地质, 41(5): 952~974.
- 谢学锦, 任天祥, 奚小环, 等. 2009. 中国区域化探全国扫面计划卅年[J]. 地球学报, 30(6): 700~716.
- 徐志刚, 陈毓川, 王登红, 等. 2008. 中国成矿区带划分方案[M]. 北京: 地质出版社, 1~111.
- 许志琴, 李海兵, 杨经绥. 2006. 造山的高原——青藏高原巨型造山拼贴体和造山类型[J]. 地学前缘, 13(4): 1~17.
- 张泽明, 丁慧霞, 董 昕, 等. 2019. 冈底斯岩浆弧的形成与演化[J]. 岩石学报, 35(2): 275~294.
- 张 志, 李光明, 张林奎. 2022. 西藏喜马拉雅带稀有金属矿勘查与研究进展[J]. 沉积与特提斯地质, 42(2): 176~188.
- 郑有业, 孙 祥, 田立明, 等. 2014. 北喜马拉雅东段金铋多金属成矿作用、矿床类型与成矿时代[J]. 大地构造与成矿学, 38(1): 108~118.