

doi: 10.12029/gc20201026001

欧阳渊, 刘洪, 李光明, 马东方, 张林奎, 黄瀚霄, 张景华, 张腾蛟, 柳潇, 赵银兵, 李富. 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.

Ouyang Yuan, Liu Hong, Li Guangming, Ma Dongfang, Zhang Linkui, Huang Hanxiao, Zhang Jinghua, Zhang Tengjiao, Liu Xiao, Zhao Yinbing, Li Fu. 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).

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

欧阳渊¹, 刘洪^{1,2}, 李光明¹, 马东方¹, 张林奎¹, 黄瀚霄¹,
张景华¹, 张腾蛟¹, 柳潇³, 赵银兵², 李富¹

(1. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081; 2. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059;
3. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北 武汉 430205)

摘要:【研究目的】矿产资源定位预测的核心是矿产分布与控矿地质因素之间的非线性关系, 大数据及机器学习技术在解决这类复杂非线性关系问题方面已经体现出巨大的优势。小比例尺地物化遥信息的预测数据集具有高维和极不平衡的特点, 依靠传统的逻辑假设或统计分析很难适应。本文尝试将随机森林算法引入到小比例尺找矿预测领域来开展研究, 探索大数据及机器学习技术在小比例尺找矿预测中的应用。【研究方法】近年来, 冈底斯成矿带西段新发现了鲁尔玛、拔拉扎、达若、红山和罗布真等多个斑岩型、浅成低温热液型铜金多金属矿床(点), 证实冈底斯西段具有寻找斑岩型、浅成低温热液型铜金多金属矿的巨大潜力。本文以新发现的典型矿床为研究对象, 在总结冈底斯成矿带西段斑岩铜矿成因模式的基础上, 结合物化遥综合信息, 构建地物化遥综合找矿模型, 最后利用随机森林法开展研究区找矿预测。【研究结果】本文结合典型矿床与区域地质、地球物理、地球化学及遥感综合信息, 利用随机森林法在冈底斯成矿带西段开展斑岩型、浅成低温热液型铜金多金属矿的找矿预测, 圈定出斑岩—浅成低温热液型铜多金属矿找矿远景区 11 个(包含 I 级远景区 2 个, II 级远景区 3 个, III 级远景区 6 个), 其中罗布真、打加错、达若、拔拉杂、尕尔穷和布东拉等远景区找矿潜力较大。【结论】基于大数据机器学习的欠采样随机森林预测模型, 有望适应综合地物化遥信息的预测数据高维和极不平衡特点, 为成矿带尺度区域找矿预测提供方向。本次工作确定的远景区有望发现新的矿床(点), 为冈底斯成矿带找矿勘查打开了新的视野。

关键词: 冈底斯; 大数据; 机器学习; 随机森林; 找矿预测; 地质调查工程

创 新 点: (1) 总结了冈底斯西段斑岩—浅成低温热液型铜多金属矿作用的时空分布特征及区域找矿信息;
(2) 探索了基于大数据机器学习的欠采样随机森林预测模在找矿预测的应用; (3) 圈定出了冈底斯西段斑岩—浅成低温热液型铜多金属矿找矿远景区。

中图分类号: P618.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3657(2023)02-0303-28

收稿日期: 2020-10-26; 改回日期: 2022-01-16

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC2901803, 2021YFC2901903)、国家自然科学基金(91955208, 92055314, 42202105)、国际地球科学计划(IGCP 741)、中国地质调查项目(DD20221776, DD20230093, DD20220971, DD2023247, DD20220965)及西南地质科技创新中心青藏高原国际大科学计划和刘宝珺院士基金联合资助。

作者简介: 欧阳渊, 男, 1982 年生, 博士, 高级工程师, 硕士生导师, 从事地球探测技术、生态地质学研究; E-mail: oyangyuan@mail.cgs.gov.cn。

通讯作者: 马东方, 男, 1965 年生, 正高级工程师, 从事青藏高原地质矿产研究; E-mail: mdongfang@foxmail.com。

Mineral search prediction based on Random Forest algorithm ——A case study on porphyry–epithermal copper polymetallic deposits in the western Gangdise metallogenic belt

OUYANG Yuan¹, LIU Hong^{1,2}, LI Guangming¹, MA Dongfang¹, ZHANG Linkui¹,
HUANG Hanxiao¹, ZHANG Jinghua¹, ZHANG Tengjiao¹, LIU Xiao³, ZHAO Yinbing², LI Fu¹

(1. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China; 2. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 3. Wuhan Center, China Geological Survey, Wuhan 430205, Hubei, China)

Abstract: The paper is the result of geological survey engineering.

[Objective] The core problem of prospecting prediction is the nonlinear relationship between mineral distribution and mineral–controlling geological factors. Big data and machine learning technology have shown great advantages in solving such complex nonlinear relationship problems. The prediction dataset of small–scale geochemical remote information has the characteristics of high and extremely unbalanced, which is difficult to adapt by traditional logical assumptions or statistical analysis. Therefore, this paper attempts to introduce the random forest algorithm into the field of small–scale prospecting to explore the application of big data and machine learning technology in small–scale mineralization prediction. **[Methods]** In recent years, several Porphyry–epithermal copper polymetallic deposits (such as Luerma, Bolazha, Daruo, Hongshan, and Luobuzhen, etc.) have been discovered in the western Gangdise mineralized belt, which proved that the western Gangdise belt has great prospecting potential for porphyry and epithermal Cu–Au polymetallic deposits. Combined with the comprehensive information of typical deposits, regional geology, geophysics, geochemistry, and remote sensing, this paper uses the random forest method to carry out the prospecting prediction of porphyry and epithermal Cu–Au polymetallic deposits in the western Gangdise belt. **[Results]** This work has delineated 11 porphyry copper polymetallic prospect areas (including 2 levels I prospect areas, 3 level II prospect areas, and 6 level III prospect areas), of which Luobuzhen, Dajiacuo, Daruo, Balaza, Gaerqiong, and Budongla have great prospecting potential and are expected to find new ore deposits or points. **[Conclusions]** The under–sampling random forest prediction model based on big data machine learning is expected to adapt to the high–dimensional and extremely unbalanced characteristics of prediction data of comprehensive geophysical and geochemical remote information and provide direction for regional prospecting prediction at the scale of the metallogenic belt. The prospective area determined in this work is expected to find new deposits (points), which opens a new vision for ore prospecting and exploration in the Gangdise metallogenic belt.

Key words: Gangdise; big data; machine learning; random forest algorithm; prospecting prediction; geological survey engineering

Highlights: (1) The temporal and spatial distribution characteristics and regional prospecting information of porphyry–epithermal copper polymetallic mineralization in the western Gangdise are summarized; (2) The application of under–sampling random forest prediction model based on big data machine learning in ore prospecting prediction is explored; (3) The porphyry epithermal copper polymetallic ore prospecting prospect in the western Gangdise is delineated.

About the first author: Ouyang yuan, male, born in 1982, doctor, senior engineer, master supervisor, engaged in research on earth exploration technology and ecological geology; E–mail: oyangyuan@mail.cgs.gov.cn

About the corresponding author: Ma Dongfang, male, born in 1965, bachelor, professor senior engineer, engaged in geological and mineral research on the Qinghai Tibet Plateau; E–mail: mdongfang@foxmail.com.

Fund support: Supported by National Key R & D Program of China (No.2021YFC2901803 and No.2021YFC2901903), National Natural Science Foundation of China (No.91955208, No.92055314, No.42202105), International Geosciences Programme (No.IGCP 741); China Geological Survey Project (No.DD20221776, No.DD20230093, No.DD20220971, No.DD2023247, No.DD20220965), and Qinghai–Tibet Plateau International Grand Science Program of Southwest Geological Science and Technology Innovation Center.

1 引言

找矿预测是在不确定条件下制定识别和发现矿产资源最优决策的工作(成秋明,2006;赵鹏大,2007;刘洪等,2014a;吴火星等,2020)。对于勘查程度高的地区,更适用全面利用地物化遥多元找矿信息的数据驱动方法(刘洪等,2014b,2015;欧阳渊等,2016)。但在大范围小比例尺找矿预测中,样本数据集中、成矿样本数据少、类别不平衡,会对算法学习过程产生干扰,造成分类结果不理想(Wan et al., 2012)。矿产资源定位预测的核心是矿产分布与控矿地质因素之间的非线性关系(陈进等,2020;张振杰等,2021),大数据及机器学习技术是从数据中学习某种规律或者模型,并用来解决实际问题(Naeni and Prindel., 2018),其在解决各行各业的复杂非线性关系问题方面已经体现出巨大的优势(黄发明等,2020;Panagiotis, 2021; Song, 2021;宋述芳和何入洋,2021;Hardeep et al., 2022)。它善于处理非线性和高维数据,被广泛运用到医学、生态学、生物学、计算机科学、农学、工程学、遥感科学和自然地理学等多个领域(刘卫东等,2019;Milanović et al., 2020; Fouedjio, 2020; Asadi et al., 2021; Luciano et al., 2021; Mpanya et al., 2021; Langroodi et al., 2021; Andreoletti et al., 2021; El et al., 2021; Makungwe et al., 2021)。矿产预测进入量化阶段以来,机器学习及相关数据挖掘的方法也被广泛引入,并已成为矿产预测重要的研究方向(向杰等,2019;欧阳渊,2020;张振杰等,2021;秦耀祖等,2021)。然而,依靠传统的逻辑假设或统计分析很难适应小比例尺地物化遥信息的预测数据集具有高维和极不平衡的特点。当遇到这类数据不平衡的问题时,应用以总体分类精度为学习目标的传统分类算法不可避免的会过多地关注多数类样本,而使得少数类样本的分类性能低下。同时传统的机器学习方法不能给出预测变量与响应变量的简单表达式,导致找矿预测学解释上的困难性。随机森林算法(Random Forest, RF)是一个广泛用于各种应用领域的一种集成学习(Ensemble Learning)方法,由已故美国科学院院士 Leo Breiman 和 Adele Cutler 在 2001 年提出(Leo, 2001)。随机森林算法由于其天然的并行特性,良好的模型可解释性而被广泛研究和应用(方

匡南等,2011),已用于二维、三维找矿预测中(陈进等,2020)。不同于一般的“黑箱”模型,随机森林算法可以给出变量的重要性排序以及变量间的偏依赖关系,从而能识别重要的预测因子并进行解释(Prasad et al., 2006; Cutler et al., 2007)。这种方法已开始运用到矿产资源预测中(蔡惠慧等,2019;张野等,2020;李苍柏等,2020;张士红和肖克炎,2020)。

斑岩型和浅成低温热液型矿床是全球铜、金资源的主要来源之一,具有重要经济价值。这两类矿床之间通常存在紧密的时空关系(李靖辉,2008; Sillitoe, 2010; 倪培等, 2020)。青藏高原拥有中国资源储量最大的铜多金属矿资源(潘桂棠等, 2001, 2020; Hou and Cook, 2009; Sillitoe, 2010; Zhou et al., 2012; Mao et al., 2014; 刘洪等, 2016; Tang et al., 2021; 耿全如等, 2021),目前在青藏高原已发现有班公湖—怒江铜矿带(唐菊兴等, 2012; 宋扬等, 2014; Ouyang et al., 2017; Tang et al., 2021; Liu et al., 2022a)、玉龙铜矿带(唐菊兴等, 2006)和冈底斯铜矿带(李光明等, 2004; Zheng et al., 2015; Zeng et al., 2017; 刘洪等, 2021a, 2022; 韩善楚等, 2021)等3条巨型斑岩铜矿带(图1),同时在这些铜矿带中还有寻找浅成低温热液型矿床的潜力(黄瀚霄等, 2020; Liu et al., 2022b, c)。

冈底斯斑岩铜矿带已发现的矿床主要位于东段(87°E以东),东起工布江达县,西至昂仁县,绵延近600 km(图1b),在空间上呈现东西成带、南北成串分布特点,主要受贯穿拉萨地块的正断层和平行于造山带的东西向逆冲断裂控制。成矿时代主要集中在中侏罗世(177~169 Ma; Huang et al., 2017; 郎兴海等, 2019; Lang et al., 2020)、始新世(54~45 Ma; Zhao et al., 2014; Yang et al., 2016)和渐新世—中新世(25~12 Ma; 李金祥等, 2001; Huang et al., 2019; Huang et al., 2020)等时期。近些年实施的地质调查工作^{●●}在冈底斯西段(87°E以西)发现了措勤县打加错附近的鲁尔玛晚三叠世斑岩型铜(金)矿点、昂仁县达若古新世斑岩型铜矿点、昂仁县罗布真—红山斑岩—浅成低温热液型铜金(银)成矿系统和尼玛县拔拉扎晚白垩世斑岩—矽卡岩型铜(钼)矿床等一系列与晚三叠世—渐新世中酸性斑岩体有关的铜多金属矿床(点)(赵希良等,

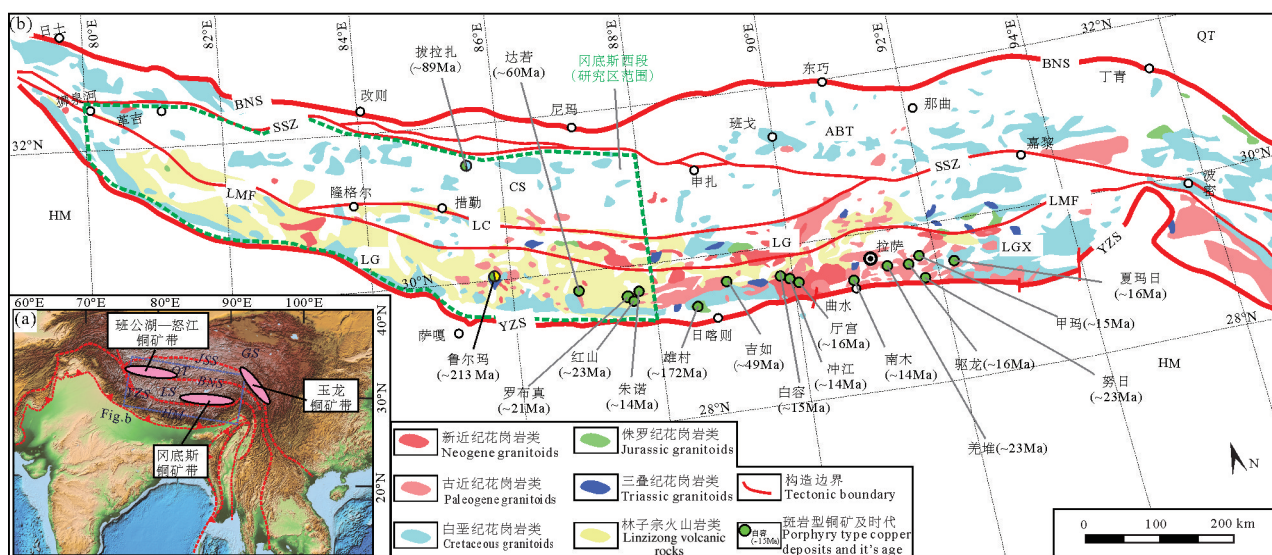


图1 冈底斯成矿带地质简图(a据刘洪等, 2019a, b, 2020a; b据刘洪等, 2019c, 2020b)

GS—甘孜—松潘地块; JSS—金沙江缝合带; QT—羌塘地块; BNS—班公湖—怒江缝合带; LS—拉萨地块; YZS—印度河—雅鲁藏布江缝合带; HM—喜马拉雅地块; ABT—昂龙岗日—班戈—腾冲岩浆弧带; SSZ—狮泉河—纳木错蛇绿混杂岩带; CS—措勤—申扎岩浆弧带; LC—隆格尔—措麦断裂带; LG—隆格尔—工布江达复合岛弧带; LMF—洛巴堆—米拉山断裂带; LGX—拉达克—南冈底斯岩浆弧带

Fig.1 Mineral geological map of the Gangdise metallogenic belt

(a, modified from Liu Hong et al., 2019a, b, 2020a; b, modified from Liu Hong et al., 2019c, 2020b)

GS—Ganzi—Songpan block; JSS—Jinshajiang suture zone; QT—Qiangtang block; BNS—Bangong—Nujiang suture zone; LS—Lhasa block; YZS—Indus—Yarlung Zangbo suture zone; HM—Himalayan Block; ABT—Anglónggāngri—Bāngē Tengchōng—magmatic arc zone; SSZ—Shiquanhe—Namtso suture zone; CS—Coqēn—Xainza magmatic arc zone; LC—Lunggar—Comai fracture zone; LG—Lunggar—Gongbo'gyamda composite island arc zone; LMF—Lobadui—Milashan fracture zone; LGX—Ladakh—South Gangdise magmatic arc zone

2013; 黄瀚霄等, 2018; 刘洪等, 2019a, 2019b, 2019d, 2020c), 证实冈底斯成矿带向西还具有比较好的铜金多金属找矿潜力。而构建综合成岩成矿规律和地物化遥信息的找矿模型, 开展冈底斯西段斑岩—浅成低温热液型铜金多金属矿找矿预测, 对扩大冈底斯铜多金属矿资源基地具有重要的意义。本文在冈底斯西段斑岩—浅成低温热液型铜金多金属矿找矿勘查研究和实践成果, 以及找矿有利信息分析的基础上, 尝试用机器学习随机森林算法和欠采样方法, 建立适合于研究区的智能化综合预测量化模型, 实现综合信息靶区定位预测, 以期为冈底斯西段的铜多金属矿产勘查工作提供新的思路。

2 原理与方法

2.1 随机森林算法概述

本文选用融合欠采样技术和随机森林的欠采样随机森林模型(图2), 通过聚类欠采样技术, 从非成矿单元数据集中抽取一定量的能涵盖非成矿单元所有信息的样本数据, 使得参与模型训练的成矿样

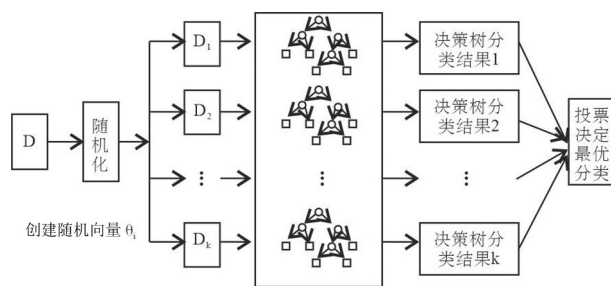


图2 随机森林模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of random forest model

本数和非成矿样本数尽可能的平衡, 以弥补找矿预测中成矿单元数据量不平衡的问题。大范围小比例尺找矿预测中, 样本数据集存在成矿单元数量少、类别不平衡的问题, 导致少数成矿单元错分, 造成最后的结果不理想。同时多数的非成矿单元数据往往存在着大量重复数据信息和噪声数据, 由于这些多余的数据, 使得以找矿预测总体精度最优化为目标的分类器的边界向着少数类数据方向进行偏移, 分类错误大大增加, 进而造成预测结果的偏离。本次研究通过在非

成矿样本集上采样的K-Means聚类欠采样策略,弥补找矿预测中的类不平衡。

2.2 欠采样-随机森林模型算法步骤

该模型的计算步骤如下(图2):

输入:冈底斯成矿带西段数据集 $D1 / D2$, 随机森林树棵数 $S1 / S2$; 输出:样本测试结果 $y1_pred / y2_pred$ 。

步骤1:通过欠采样技术生成平衡的训练数据子集。

(1)划分非成矿单元 $A(a_1, a_2, a_3, \dots, a_n)$ 和成矿单元 $B(b_1, b_2, b_3, \dots, b_n)$, 成矿单元总数 k ;

(2)非成矿单元共聚成 K 簇 $\{K_1, K_2, K_3, \dots, K_k\}$;

(3)循环 i , 构建 S 棵决策树:从 k 个簇 $\{K_1, K_2, K_3, \dots, K_k\}$ 各自有放回随机抽取一个样本,形成具有 k 个样本的数据集 $(k_1, k_2, k_3, \dots, k_k)$, 剩下 k 个簇未被抽中的样本为 OOB_1 ;

(4)将成矿单元 $B(b_1, b_2, b_3, \dots, b_k)$ 和数据集 $(k_1, k_2, k_3, \dots, k_k)$ 混合并乱序打乱,是整个平衡样本集的样本数为 $k+n$ 个 $(b_1, b_2, b_3, \dots, b_n, k_1, k_2, k_3, \dots, k_k)$ 。

步骤2:利用数据子集生成一棵不剪枝的树 $Tree_i$ 。

(1)对平衡样本集 $(b_1, b_2, b_3, \dots, b_n, k_1, k_2, k_3, \dots, k_k)$ 采用 Bootstrap 抽样方法一共抽取 $2k$ 次,抽中的样本为单棵决策树训练集 $train_data_i$, 未抽中的为单颗决策树的 OOB_2 , 所形成的单颗决策树的袋外数据 $OOB_i = OOB_1 + OOB_2$;

(2)随机抽取训练集 $Train_data_i$ 的特征子集,完成第 i 棵 $tree_i$ 的构建。

步骤3:计算该棵决策树的预测结果。

(1)定义两个临时空间变量 $y_pred=[]$ 和 $result=[]$;

(2)循环遍历所有样本,并且遍历所有决策树的随机森林:如果样本 i 不在袋外数据 OOB_i 中,则利用该棵决策树测试该条样本,得到预测结果 $result_i$ 。

步骤4:遍历随机森林中所有的决策树之后得到 $result$ 集合,采用投票的方式得到样本 i 的预测结果 y_pred 。

依据研究区内斑岩-浅成低温热液型的矿床组合、找矿标志类型、预测要素等,同时在确定模型参数时,需要通过多次对比确定如下参数:

(1) $n_estimators$:随机森林中,预测器的迭代次数,或者说是预测器的个数。一般来说,数值太小,容易造成欠拟合,数值太大又会增加计算负担,并且当 $n_estimators$ 达到一定的数值之后,模型的提升会非常有限。因此选择一个合适的值非常重要。本文选择的是 20。

(2) Max_depth :决策树的最大深度。一般来说,树越深越能捕捉到信息,但是树太深又会造成过拟合,因此要选择一个合适的深度。本文选择的是 10。

(3) $Min_samples_leaf$:叶子节点样本数的最小值。如果某叶子的样本个数小于该值,则该叶子的节点就不能产生。目的是为了避免我们的决策树过于庞大,同样也为了避免过拟合。叶子节点的数目可以根据具体的数据进行选择。本文选择的是 5。

(4) $Min_impurity_split$:节点划分最小不纯度。同样是限制树生长的一个指标,如果节点的不纯度小于阈值,该节点将不会再生成子节点。默认是 $1e-7$,本文不对默认值进行修改。

2.3 预测模型的评价指标

随机森林分类模型的精度评价主要依据混淆矩阵 (Confusion matrix) 以及 ROC (Receiver Operating Characteristic curve) 曲线的相关信息。

混淆矩阵主要对分类问题的预测结果进行总结并作出精度评价。其关键是通过分析预测正确样本量以及预测错误样本量,来了解分类器的误差,并反映出误差类型。本研究中有两类情况,即成矿单元 (positive) 与非成矿单元 (negative), 如表 1。混淆矩阵的列用来表示类的预测结果,行用来表示类的实际类别。其中,TP (true positive) 表示成矿单元中被划分正确的单元数,及真正类, TN (true negative) 表示非成矿单元中被划分正确的单元数,即真负类, FP (false positive) 表示成矿单元中被错误划分的单元数,即假分类, FN (false negative) 表示负

表 1 找矿预测分类结果混淆矩阵
Table 1 Confusion matrix of classification results of prospecting prediction

已知分类情况	模型分类结果	
	成矿单元	非成矿单元
成矿单元	TP	FN
非成矿单元	FP	TN

类样本中被划分错误的样本数,即假负类。

由混淆矩阵产生一些衍生指标,如找矿预测精确率($Pre = \frac{TP}{TP+FP}$)、找矿预测灵敏度($Sen = \frac{TP}{TP+FN}$)、非成矿单元的灵敏度($Spe = \frac{TN}{TN+FP}$)、F测度($F-m = \frac{(1+\beta^2) \times Pre \times Sen}{Pre + \beta^2 Sen}$, β 为系数,取值通常为 1)和几何均值($G-m = (Sen \times Spe)^{1/2} = (\frac{TP}{TP+FN} \times \frac{TN}{TN+FP})^{1/2}$)。分类器的精确度越高,找矿预测精确率、找矿预测灵敏度、非成矿单元的灵敏度、F测度高、几何均值越高。

受试者工作特征曲线(ROC)和特征曲线下面积(AUC)常作为评价分类器性能的指标,ROC曲线由多数类的误判率和少数类的灵敏度形成坐标点($FP/(FP+TN)$, $TP/(TP+FN)$)的轨迹。ROC曲线越接近纵向正半轴,则说明该分类器的分类性能越好。AUC其取值范围在0.5~1,当多数类的误判率和少数类的灵敏度都较高时,AUC的取值才高。当AUC取值越大,即ROC曲线越靠近纵向正半轴、AUC值越接近1时,表明模型分类器的分类效果越好,反之,分类器分类性能比较差(图3)。

3 地质背景

3.1 区域地质背景

本文研究的冈底斯成矿带西段夹于狮泉河—纳木错蛇绿岩混杂岩带(SSJ)与印度河—雅鲁藏布江缝合带(IYS)之间,由北至南,被隆格尔—措麦断

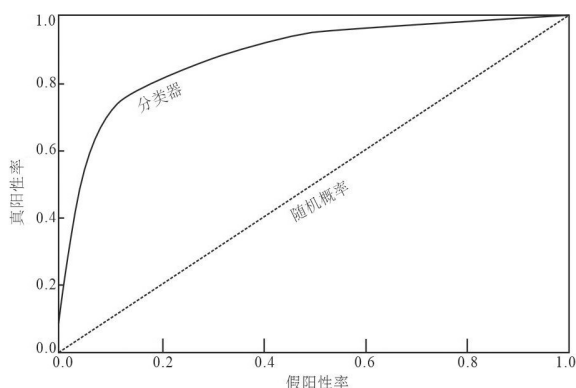


图3 受试者工作特征曲线(ROC)示意图

Fig.3 Schematic diagram of receiver operating characteristic curve(ROC)

裂带(LC)和洛巴堆—米拉山断裂带(LMF)分割为措勤—申扎岩浆弧带(CS)、隆格尔—工布江达复合岛弧带(LG)和拉达克—南冈底斯岩浆弧带(LGX)等3个Ⅲ级构造单元(图1)。研究区自晚古生代以来经历了班公湖—怒江洋和雅鲁藏布江洋南北两大特提斯洋的张裂、俯冲及碰撞造山的复杂过程(杨经绥等,2007; Mo et al., 2008; Zhu et al., 2008; Pan et al., 2012; 徐志琴等,2013;高顺宝,2015; Xu et al., 2015;黄永高等,2020;王立全等,2021)。研究区南北两侧以新生地壳物质为特征,中部为前寒武纪结晶基底。南北两侧的新生地壳以古生代—新生代的海洋与海陆交互相地层和火山沉积地层为主,中部的寒武纪结晶基底主要由角闪岩相和绿片岩相变质岩组成,其上被石炭纪—二叠纪变质沉积岩和白垩纪火山沉积地层所覆盖。受复杂的构造演化过程影响,研究区岩浆岩具有时代跨度大、分布范围广、成因类型多的特点。研究区北部的措勤—申扎岩浆弧带(CS)内中生代火山岩浆活动是与班公湖—怒江新特提斯洋向南俯冲及羌塘—拉萨地块碰撞有关(潘桂棠等,2006;刘洪等,2021a);研究区中部的隆格尔—工布江达复合岛弧带(LG)内古生代末期—中生代初期的火山岩浆活动与松多古特提斯洋构造演化有关(潘桂棠等,2006;高顺宝,2015);研究区南部的拉达克—南冈底斯岩浆弧带(LGX)内古生代末期—新生代的火山岩浆活动与新特提斯洋盆的向北俯冲和印度—欧亚大陆碰撞作用相关(高顺宝,2015;黄瀚霄等,2019; Tang et al., 2021; 张士贞等,2021)。

3.2 矿床时空分布特征

近年来,随着矿调工作的全面深入开展,在冈底斯成矿带的西段,勘查发现了鲁尔玛、达若、罗布真、红山等一系列中小型矿床(图4),显示该区找矿潜力巨大。依据矿床的特征及成因,该成矿带与中酸性斑岩体相关的矿床大致可划分为斑岩型、矽卡岩型、浅成低温热液型等3种矿床类型(刘洪等,2021b)。冈底斯成矿带西段三叠纪以来经历了雅鲁藏布江洋和班公湖—怒江洋南北两大特提斯洋的张裂、俯冲及碰撞造山的复杂过程(Zhu et al., 2008; Mo et al., 2008; Hou and Cook, 2009; Pan et al., 2012; 许志琴等,2013; Yang et al., 2016; Tang et al., 2021),并形成了相关的斑岩—浅成低温热液型

矿床。这些成矿作用可划分为4个矿化集中期(高顺宝, 2015; 黄瀚霄等, 2019; Chen et al., 2020; 刘洪等, 2021b): (1)晚三叠世成矿(铜金), 成矿作用与新特提斯洋向北俯冲密切相关; (2)晚白垩世成矿(铜钼), 成矿作用与羌塘—拉萨地块碰撞密切相关; (3)古新世成矿(铜铅锌), 成矿作用与印度—欧亚大陆碰撞密切相关; (4)渐新世—中新世成矿(铜金多金属), 成矿作用与印度—欧亚大陆碰撞后伸展作用密切相关(图5)。

4 区域找矿信息

4.1 地质—地球物理找矿信息

重磁异常与区域矿产的分布存在密切联系, 重磁异常所反映出的隐伏岩体、深大断层是本区寻找斑岩型铜矿的重要找矿标志之一。磁异常对与矿产形成有关的地层、岩浆岩和断裂构造等具有明显的反映。与中酸性岩浆岩有关的斑岩型和浅成低温热液型矿床, 在重磁区域平面异常图中表现为低重力与中高磁异常的特征。而与深部隐伏侵入岩浆岩有关的矿床, 基本都受区域性大断裂及其次级断裂控制, 冈底斯西段成矿带中北西西向和近东西向断裂与北西向和北东向次级断裂的交汇部位是矿床富集成矿的有利位置。

冈底斯成矿带西段区域卫星重力等值图利用美国加州大学(<https://topex.ucsd.edu/>)公开的数据编制; 卫星重力异常阴影图内布格重力异常值在 $-570 \times 10^{-5} \sim -180 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$, 比青藏高原外围低 $200 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 左右, 反映了区内巨厚的地壳特征(图6)。卫星重力异常特征为北西—东西向展布, 总体为中部低, 南北两侧高。(1)研究区北部的措勤—申扎岩浆弧带(CS)重力低异常区: 主要以局部重力低异常为主; 北部有少量串珠状重力高异常, 该重力高异常与基性岩体关系密切; 南部以重力低异常为主, 地质上为白垩纪和新近纪侵入岩。该带西侧以铜金矿为主, 东侧以铅锌矿为主, 矿点均出现在重力高低异常梯度带, 异常值 $-510 \times 10^{-5} \sim -490 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。(2)研究区中部的隆格尔—工布江达复合岛弧带(LG)重力相对高异常区: 以重力相对高为主要特征, 异常值为 $-540 \times 10^{-5} \sim -470 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$, 异常总体呈东西向条带状, 地表主要为大量中酸性侵入岩, 局部火山岩; 相对重力高是由火山岩引起。(3)拉达克—南冈底

斯复合岛弧带(LGX)重力低异常区: 以大规模重力低为主要特征, 异常值 $-600 \times 10^{-5} \sim -490 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$, 异常总体呈长条带状, 地表主要出露古生代和新生代地层, 另有大量中酸性侵入岩, 重力低可能由规模较大的隐伏花岗岩基及中下地壳的低密度层(体)等共同引起。该带东侧重力低异常边部以铜、金和铅锌矿为主; 大部分矿点位于重力低异常区, 异常值 $-600 \times 10^{-5} \sim -550 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。

使用MAGS软件对全区卫星重力资料进行多阶小波分析, 将冈底斯成矿带西段已查明的斑岩型铜矿床点分布位置与卫星重力数据不同阶的小波分析结果进行综合研究。区域重力数据经过小波分解剥离后, 对冈底斯成矿带西段由浅表→基底→地壳→莫霍面深度的密度差异地质体进行分层级切片成像, 低阶小波分解对应浅部埋深地质体产生重力异常, 高阶小波分解结果对应深部埋深地质体产生的重力异常(图7)。(1)卫星重力小波一阶细节主要反映浅部岩石密度差异和断裂信息等(图7a), 其等效深度为1 km。整体异常特征表明, 研究区的南北边界均以串珠状正异常为主, 区域型深大断层以近东西走向的重力梯度带为界, 区内已发现的铜(金)矿点位于SSJ构造带以南、YZS构造带以北区域。一阶小波细节中能够反映出局部的次一级导矿构造信息, 所有铜(金)矿点均分布于重力正、负异常梯度带周缘, 已知矿床点的空间位置与重力异常中的区域性一级深大断层间的空间距离一般小于80 km, 与次一级导矿构造(深部热液通道)的空间距离一般小于30 km, 因此可以结合已有的区域性地质资料, 以一级构造带为边界、以二级构造带为中心建立“精细尺度”的重力异常找矿预测缓冲区。(2)卫星重力二阶小波细节主要反映中部深度岩石密度差异和断裂信息等(图7b), 其等效深度为4 km以上。研究区的北边界以正异常为主、南边界以负异常为主, 北部主要是由蛇绿混杂岩引起, 南部主要是由沉积盆地、花岗岩引起, 铜矿点大部分仍位于重力负异常区, 铜金矿、金矿点分布于重力正异常区。(3)卫星重力小波三阶细节主要反映中深部岩石密度差异和断裂信息等(图7c), 其等效深度为10 km以上。研究区的北边界以正异常为主、南边界以负异常为主; 铜矿点大部分仍位于重力负异常区, 铜金矿、金矿点分布于重力正负异常梯度带。(4)卫星重力小波四阶细节

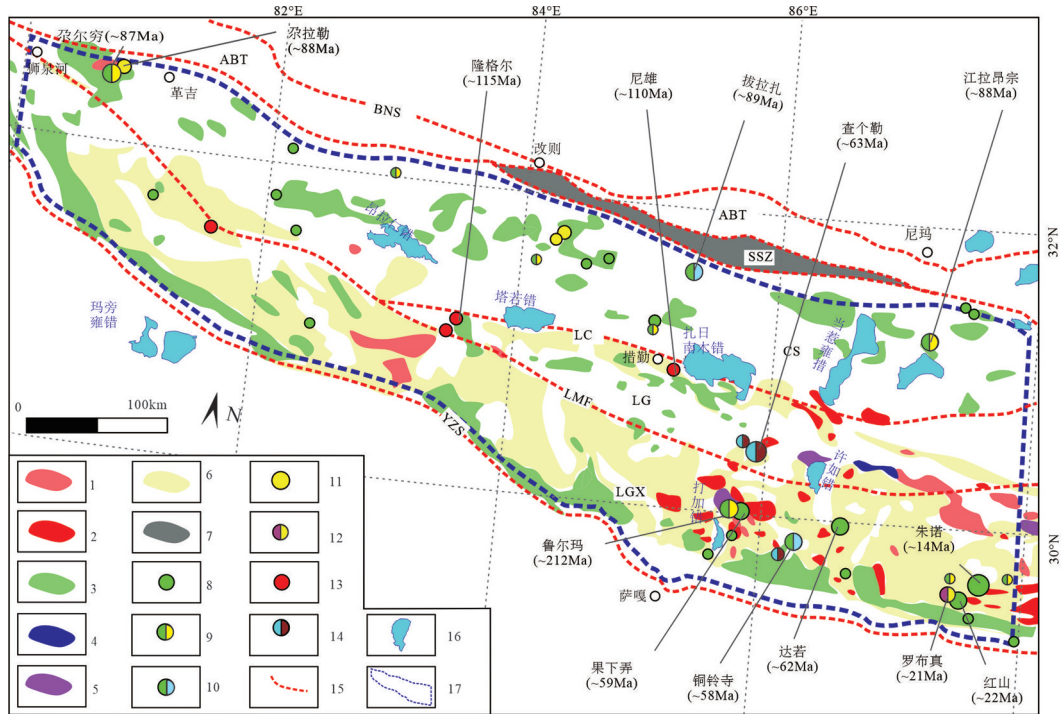


图4 冈底斯成矿带西段地质矿产图(据黄瀚霄等, 2019修改)

1—新近纪花岗岩类; 2—古近纪花岗岩类; 3—白垩纪花岗岩类; 4—侏罗纪花岗岩类; 5—三叠纪花岗岩类; 6—林子宗群火山岩; 7—蛇绿岩; 8—铜矿床(点); 9—铜金矿床(点); 10—铜钼矿床(点); 11—金矿床(点); 12—银金矿床(点); 13—铁矿; 14—铅锌矿床(点); 15—构造边界; 16—湖泊; 17—研究区范围; 构造单元代码同图1

Fig.4 Mineral geological map of the western Gangdise metallogenetic belt (modified from Huang Hanxiao et al., 2019)

1—Neogene granitoids; 2—Paleogene granitoids; 3—Cretaceous granitoids; 4—Jurassic granitoids; 5—Triassic granitoids; 6—Linziqong Group volcanic rocks; 7—Ophiolites; 8—Copper deposit (point); 9—Copper gold deposit (point); 10—Copper molybdenum deposit (point); 11—Gold deposit (point); 12—Silver gold deposit (point); 13—Iron deposit; 14—Lead zinc deposit (point); 15—Structural boundary; 16—Lake; 17—Scope of study area; The geotectonic elements code is the same as Fig.1

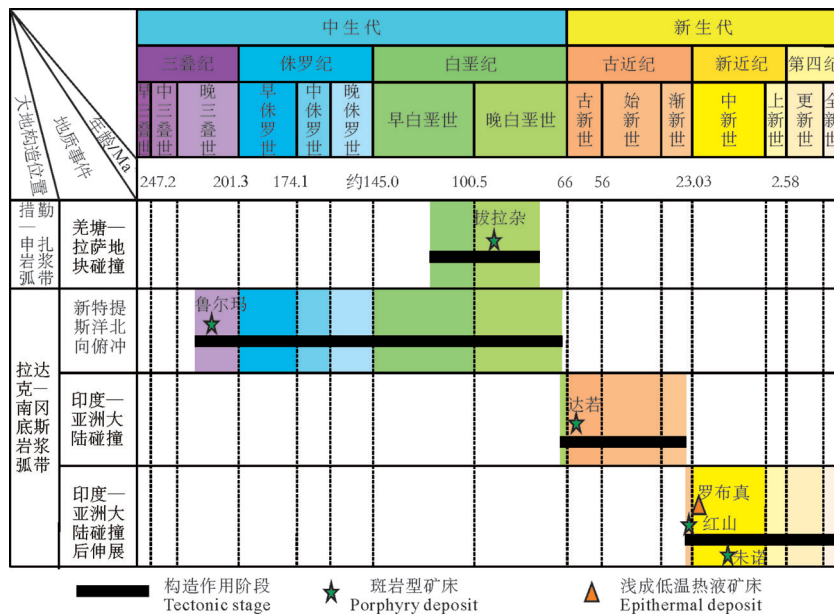


图5 冈底斯成矿带西段地质构造与成矿演化(据黄瀚霄等, 2019修改)

Fig.5 Summary of the geotectonic and metallogenetic evolution of the western Gangdise metallogenetic belt (modified from Huang Hanxiao et al., 2019)

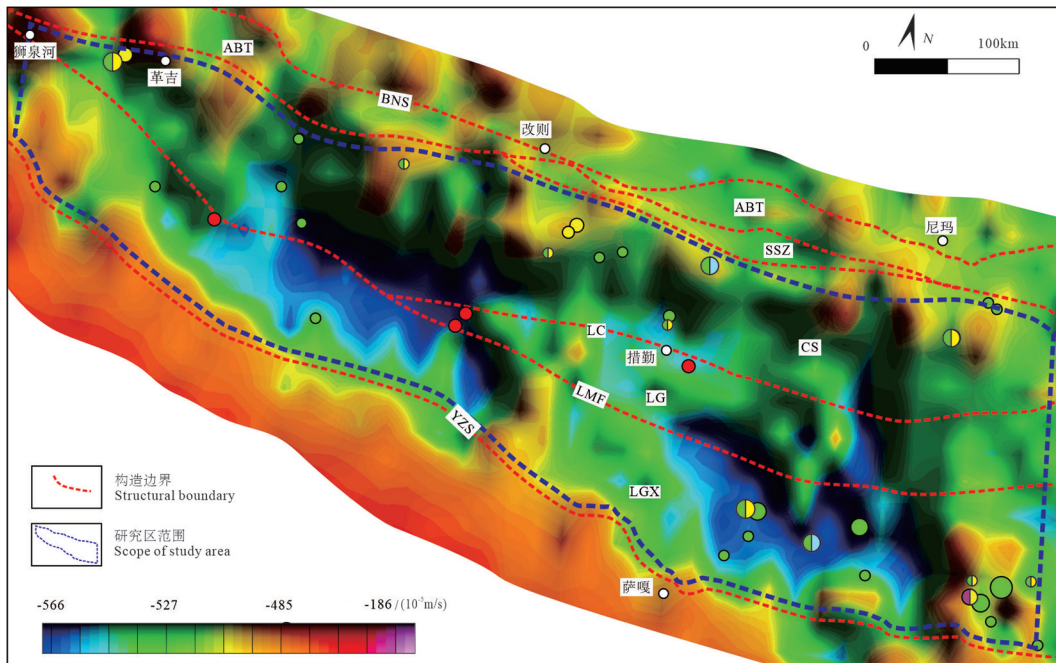


图6 冈底斯成矿带西段卫星重力等值图(据加州大学公开数据编制)
(矿产图例同图4;构造单元代码同图1)

Fig.6 The satellite gravity isogram map of the western Gangdise metallogenic belt(after the University of California public data)
(The mineral legend is the same as Fig.4; The geotectonic elements code is the same as Fig.1)

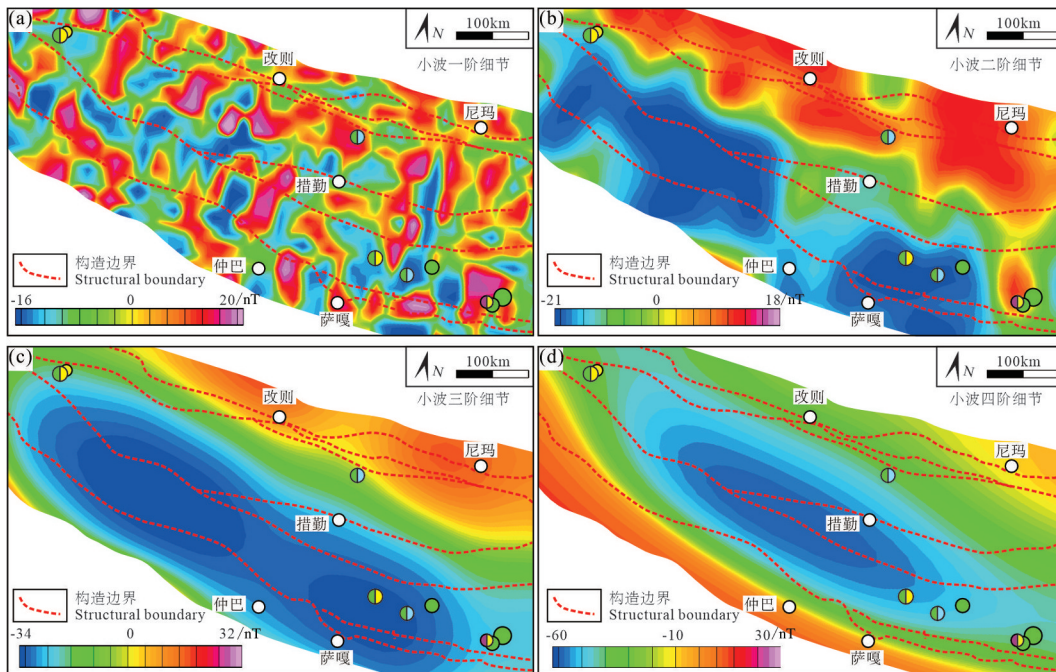


图7 冈底斯成矿带西段卫星重力小波分析细节图(据加州大学公开数据编制)
(a、b、c、d说明见正文;矿产图例同图4)

Fig.7 The detail maps of satellite gravity wavelet analysis of the western Gangdise metallogenic (after the University of California public data)

(The description of Fig.7 a, b, c, d is seen in the text; The mineral legend is the same as Fig.4)

主要反映深部岩石密度差异和断裂信息等(图7d),研究区的南、北边界以正异常为主,区内以负异常为主;铜矿点、铜金矿、金矿点分布于重力正负异常梯度带。因此可以重力正负异常梯度带为中心建立“区域尺度”的重力异常找矿预测缓冲区。综上所述,卫星重力异常的小波分解结果揭示了冈底斯西段浅、中、深部的地质构造特征,成矿带的各矿点受到深大断裂的控制,不同深度的重力异常高值区对应深部岩浆的上侵通道。

冈底斯成矿带西段航磁 ΔT 化极等值线图(图8)利用中国自然资源航空物探遥感中心(<http://www.agrs.cn/>)公开的数据编制。总体呈现北西成带、南东向分块、正负异常相间的特征,磁异常强度为 $-300\sim 600$ nT。(1)研究区北部的措勤—申扎岩浆弧带(CS)负磁异常区 ΔT 化极异常磁异常强度较弱,负磁异常强度为 $-200\sim 0$ nT,地质上为白垩纪和新近纪侵入岩;其中部高磁异常强度为 $20\sim 200$ nT,可能是部分基性岩体引起。北部正负磁异常梯度带附近以铜金、金矿为主,矿体出现位置磁异常值 $-50\sim 10$ nT。(2)研究区中部的隆格尔—工布江达复合岛弧带(LG)正磁异常区航磁 ΔT 化极异常磁异常强度较强,异常强度为 $80\sim 400$ nT。该带北部航磁 ΔT 化极异常为高磁异常,强度为 $20\sim 300$ nT;南部航磁 ΔT 化极异常以负磁异常为主,磁场强度为 $-180\sim 0$ nT,异常形态比较规则,为东西向条带状异常。(3)研究区南部的拉达克—南冈底斯岩浆弧带(LGX)负磁异常区航磁 ΔT 化极异常东西两段磁异常强度分界明显,西段以正磁异常为主,异常强度为 $50\sim 600$ nT;东段以负磁异常为主,异常强度为 $-300\sim -50$ nT,东段负磁异常边部以铜、金和铅锌矿为主;大部分矿点位于负磁异常区,异常值 $-200\sim -50$ nT。

冈底斯西段航磁 ΔT 一阶小波细节主要反映浅部岩石磁性差异和断裂信息等(图9a),其等效深度为1 km以上。冈底斯西段的南北边界均以串珠状正磁异常为主;铜矿点大部分位于磁异常梯度带,铜金矿、金矿点分布于正磁异常中心及边部,空间位置一般小于10 km。因此,可以正磁异常边部为界,建立“精细尺度”的一阶小波磁异常找矿缓冲区。冈底斯西段航磁 ΔT 二阶(图9b)、三阶(图9c)小波细节主要反映中深部岩石磁性差异和断裂信息等,其等效深度分别为4 km和10 km以上。冈底

斯西段的南北边界均以磁异常梯度带为界;铜矿点大部分位于磁异常梯度带,个别位于正磁异常中心,铜金矿、金矿点分布于磁异常梯度带。因此可以磁异常梯度带为界建立“区域尺度”的磁异常找矿预测缓冲区。冈底斯西段航磁 ΔT 四阶小波细节主要反映深部岩石磁性差异和断裂信息等(图9d),冈底斯西段西部与东部表现为正磁异常,中部表现为负磁异常;铜矿点、铜金矿、金矿点分布于磁异常梯度带。冈底斯成矿带西段的基本构造格架由雅鲁藏布江缝合带(YZS)和狮泉河—纳木错蛇绿混杂岩带(SSZ)组成,在板块俯冲和碰撞作用影响下,两带之间形成了多岛弧盆体系及相关的岩浆岩带,岩浆岩带内的超基性、基性以及中、酸性岩体分布是控制矿床产出的重要因素。将上述本区重磁资料多阶小波分解异常特征构建的“宏观”-“区域”-“精细”尺度的找矿缓冲区“求交”合并,在斑岩型铜矿地质成矿理论指导下,以重磁异常为主推断的岩体与矿点的对应关系如图10所示。从图中可知,主要斑岩型矿点分布于冈底斯成矿带西段的北部与南部,区内已知铜矿点的分布大都与推断的酸性—中酸性岩体有关,大部分铜矿点位于岩体边界,少量铜矿点位于岩体内部。个别金矿点的分布与推断的基性岩体分布有关,金矿点位于岩体边界。

4.2 地质—地球化学找矿信息

选取冈底斯成矿带西段19045个水系沉积物样品的Ag、Au、As、Co、Cr、Cu、Mo、Ni、Pb、Sb、Sn、W和Zn等13种元素数据(1:20万)^⑥,在矿床研究的基础上,研究冈底斯西段地球化学元素组合和分布,并解释可能存在的找矿信息,探讨找矿潜力和方向。通过相关分析(表2)、聚类分析(图11)和因子分析(图12)等多元统计分析将研究区的13种元素降维为5个因子变量: f_1 因子(Ni-Co-Cr元素组合)、 f_2 因子(Cu-Pb-Zn-Ag元素组合)、 f_3 因子(Au-Sn元素组合)、 f_4 因子(As-Sb元素组合)、 f_5 因子(W-Mo元素),其中 f_2 因子、 f_3 因子和 f_5 因子为斑岩型铜成矿作用相关的变量,因此本文将对这三个因子变量进行找矿信息讨论。

对冈底斯西段19045个水系沉积物样品的13种元素数据(1:20万)^⑥做因子分析后,得出每个样品对5个因子变量的得分,绘制了与斑岩型矿床相关的Cu、Au元素地球化学图(图13a、b)以及 f_2 因子

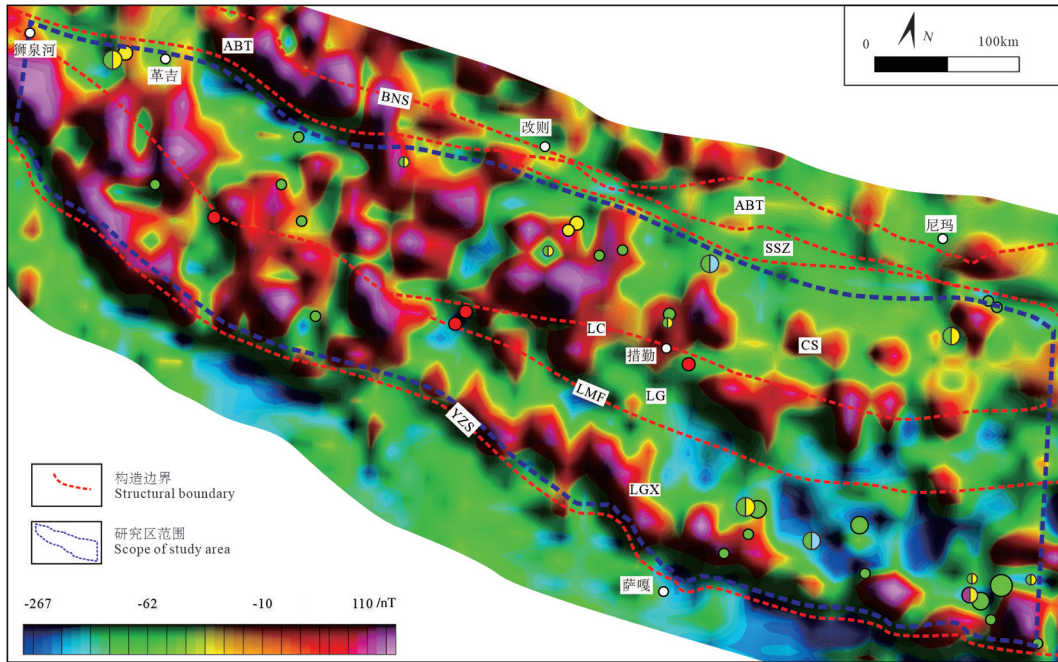


图8 冈底斯成矿带西段航磁 ΔT 化极异常图(据中国自然资源航空物探遥感中心公开数据编制)
(矿产图例同图4;构造单元代码同图1)

Fig.8 The aeromagnetic ΔT pole isogram map of the western Gangdise metallogenic belt (after the AGRS public data)
(The mineral legend is the same as Fig.4; The geotectonic elements code is the same as Fig.1)

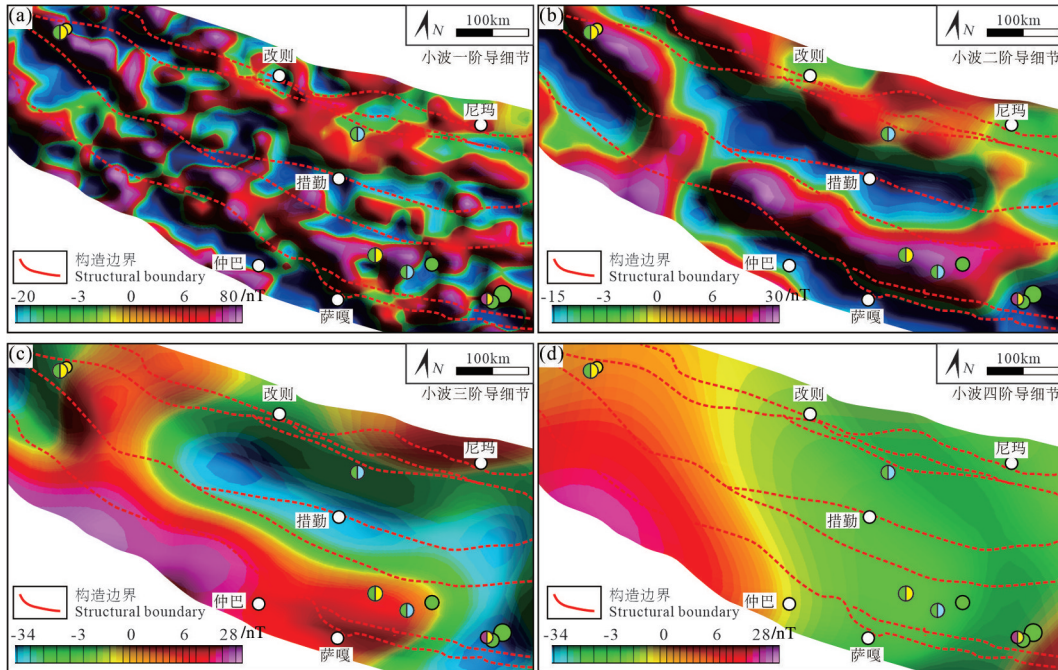


图9 冈底斯成矿带西段航磁 ΔT 化极小波分析细节图(据中国自然资源航空物探遥感中心公开数据编制)
(a、b、c、d说明见正文;矿产图例同图4)

Fig.9 The detail maps of aeromagnetic ΔT pole wavelet analysis of the western Gangdise metallogenic belt (after the AGRS public data)
(The description of Fig.9 a, b, c, d seen in the text; The mineral legend is the same as Fig.4)

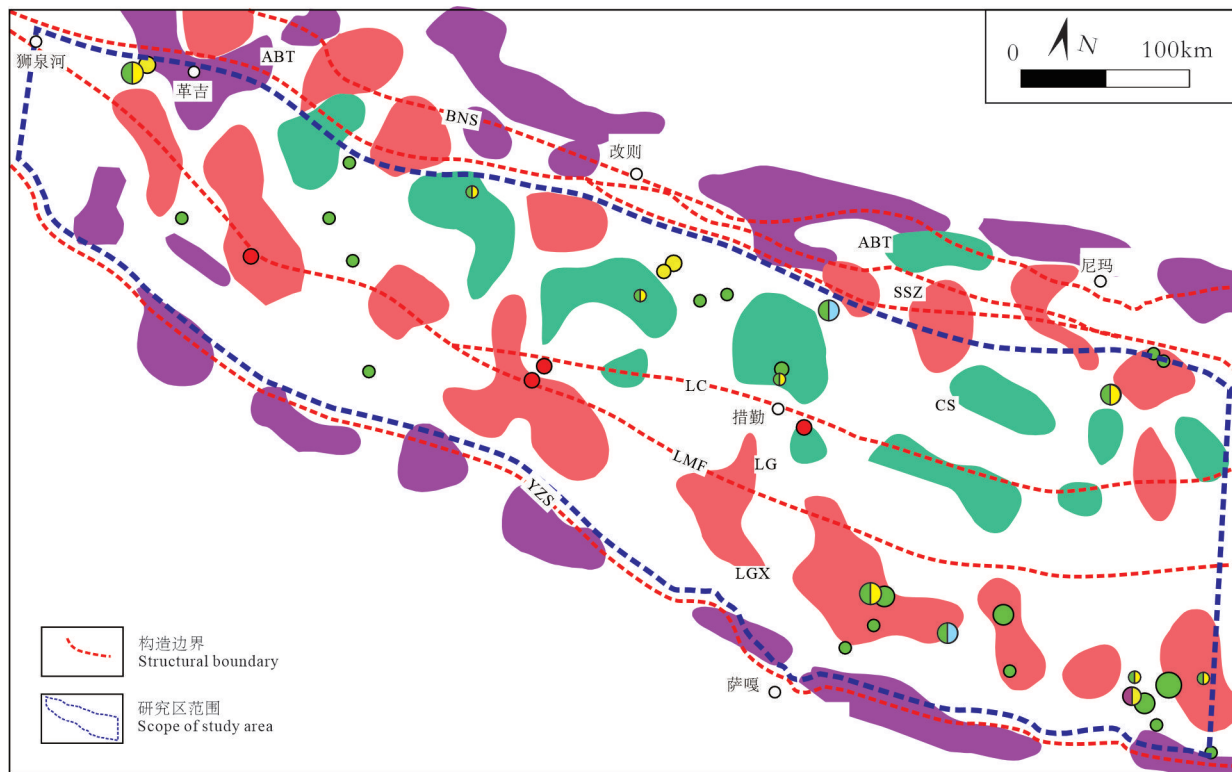


图10 冈底斯成矿带西段航磁 ΔT 化极磁异常推断岩体分布图
(矿产图例同图4;构造单元代码同图1)

Fig.10 The distribution map of inferred rock mass based on ΔT pole abnormal in the western Gangdise metallogenic belt
(The mineral legend is the same as Fig.4; The geotectonic elements code is the same as Fig.1)

(Cu-Pb-Zn-Ag元素组合,图13c)以及 f_3 因子(Au-Sn元素组合,图13d)得分等值线图。根据每个样品的最大得分因子变量,归纳地球化学因子分区(如x号样品和y号样品的最大得分为 f_3 因子,则他们都归纳到 f_3 因子分区)。根据因子得分值将样品归纳

到5个分区,绘制了因子分区图(图14)。从地球化学图(图13a、b)可以看出本区与斑岩型、浅成低温热液型矿床相关的Cu元素和Au元素分布情况相似,其高值区域主要在冈底斯南北缘岩浆岩分布区,呈零星状、星点状、孤岛状的异常。从因子得分

表2 冈底斯西段地球化学元素相关系数矩阵

Table 2 The correlation coefficient matrix of geochemical elements in the western Gangdise metallogenic belt

	Ag	Au	As	Co	Cr	Cu	Mo	Ni	Pb	Sb	Sn	W	Zn
Ag	1.00												
Au	0.01	1.00											
As	0.11	0.00	1.00										
Co	-0.09	0.00	0.06	1.00									
Cr	-0.08	0.00	-0.02	0.82	1.00								
Cu	0.20	0.00	0.15	0.48	0.12	1.00							
Mo	0.24	0.01	0.07	-0.07	-0.09	0.06	1.00						
Ni	-0.08	0.00	-0.02	0.87	0.94	0.17	-0.09	1.00					
Pb	0.66	0.01	0.03	-0.02	-0.02	0.24	0.08	-0.02	1.00				
Sb	0.09	0.00	0.27	0.02	-0.01	0.06	0.00	-0.01	0.01	1.00			
Sn	0.14	0.78	0.05	-0.03	-0.03	0.04	0.04	-0.04	0.05	0.01	1.00		
W	0.11	0.01	0.13	-0.06	-0.06	0.04	0.23	-0.07	0.03	0.03	0.09	1.00	
Zn	0.60	0.00	0.15	0.19	0.02	0.48	0.20	0.03	0.54	0.02	0.13	0.05	1.00

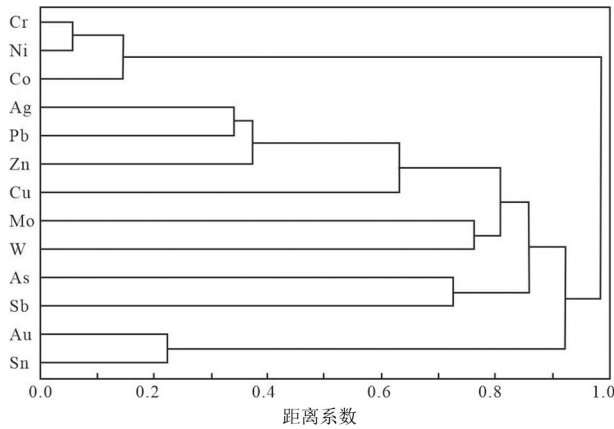


图 11 冈底斯成矿带西段地球化学元素聚类分析图

Fig.11 Cluster analysis chart of geochemical elements in the western Gangdise metallogenic belt

等值线图可以看出:(1) f_2 因子(Cu-Pb-Zn-Ag元素组合)为本区斑岩型铜矿主要成矿元素分区。该因子变量对应的分区主要在研究区南部的拉达克—南冈底斯复合岛弧带(LGX)中,与冈底斯岩基的产出较为一致,并与朱诺、红山、达若、鲁尔玛等已发现斑岩型铜矿较为吻合,说明这个区域具有寻找斑岩型、浅成低温热液型矿床的重大潜力。(2) f_3 因子(Au-Sn元素组合)为本区斑岩型铜矿主要伴生元素分区,同时代表了金矿的近矿元素组合(刘洪等, 2013)。该因子变量对应的分区主要分布在研究区北部的措勤—申扎岩浆弧带(CS),与拉萨地块北缘晚白垩世的岩浆作用有关,并与已发现的江拉昂宗、布东拉、天宫尼勒和安门弄勒等矽卡岩型、浅成低温热液型金矿吻合,可能代表了措勤—申扎岩浆弧带(CS)浅成低温热液型金矿和矽卡岩型金矿的元素背景。(3) f_4 因子(W-Mo元素组合)为本区斑岩型铜矿主要伴生元素分区。该因子变量对应的分区主要零星分布于 f_2 因子分区的周边,并与已发现的拔拉扎斑岩—矽卡岩型铜钼矿的相吻合,该分区具有寻找斑岩型铜矿的潜力。

4.3 地质-遥感异常找矿背景

从20世纪80年代遥感技术用于地质找矿以来,国内外学者就致力于遥感地质理论和遥感信息提取技术的研究(Zadeh et al., 2014),逐步构建了一套系统的遥感信息增强提取方法和流程。在西藏地区地表裸露环境下,利用遥感技术开展矿产勘查具有先天优势,在斑岩型铜矿的勘查上也有许多成

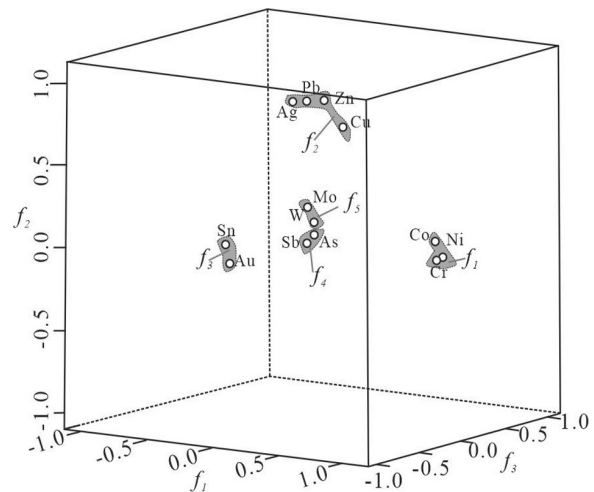


图 12 冈底斯成矿带西段旋转后因子载荷图

Fig.12 Component plot in rotated space of geochemical elements in the western Gangdise metallogenic belt

功案例,如通过比较主分量分析法、光谱角法和比值法等优缺点,建立了基于TM/ETM+“去干扰异常主分量门限化技术流程”,在藏南甲玛—驱龙矿区取得比较好的应用效果(张玉君等, 2003),在多不杂矿集区开展蚀变信息提取及找矿靶区圈定研究,为找矿远景区的圈定提供更为可靠的依据(代晶晶等, 2010)。采用的数据源为目前容易获取的24景landsat7 ETM遥感数据。主要提取解译断裂、隐伏断裂、线性构造、岩浆热液环、隐伏岩体、出露岩体和推测岩体等信息,编制形成相应的1:50万线环构造解译图和遥感异常分布图。

地质构造形迹可以由遥感图像呈现,环形构造及相关的环状、放射状遥感大节理与地下隐伏构造隆起在空间上有一定对应关系。对于地质构造的提取,首先需要获得相关的地质与成矿数据以及相应的地理数据,将各种数据整理并二次加工分析,建立起成矿构造的解译标志;然后获取原始的遥感数据,对遥感影像进行辐射校正、几何校正、图像增强及裁剪融合等处理并结合由地形数据生成的DEM,实现地形的可视化;再进行成矿构造信息的提取,提取出线性构造与环形构造,并对构造信息进行检验和修正,最后与可视化的地形结合。对于提取的地质构造,通过“概率模型法”、“网格与加权法”和“多因素异常叠加分析评判法”进行综合评判,找出成矿与控矿构造,再次进行综合研究,并作为找矿预测的判别指标之一。从遥感线环构造解

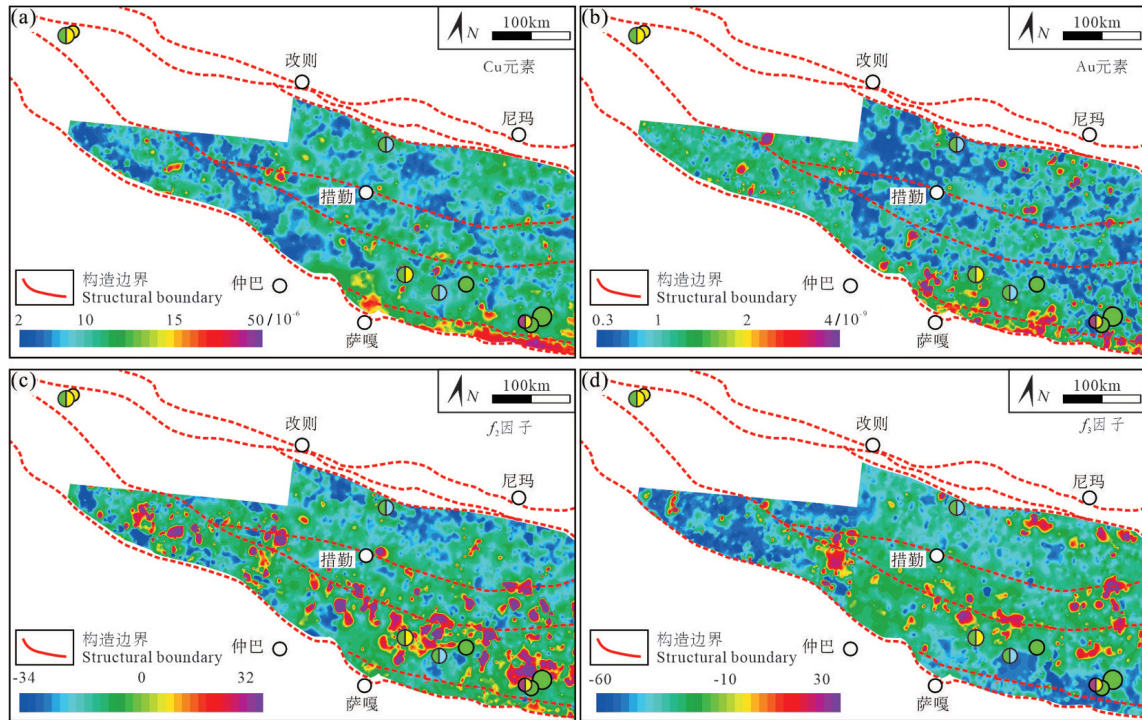


图 13 冈底斯成矿带西段地球化学图(a, b)与因子得分等值线图(c, d)
(矿产图例同图 4)

Fig.13 Geochemical maps (a, b) and factor score isogram maps (c, d) in the western Gangdise metallogenic belt
(The mineral legend is the same as Fig.4)

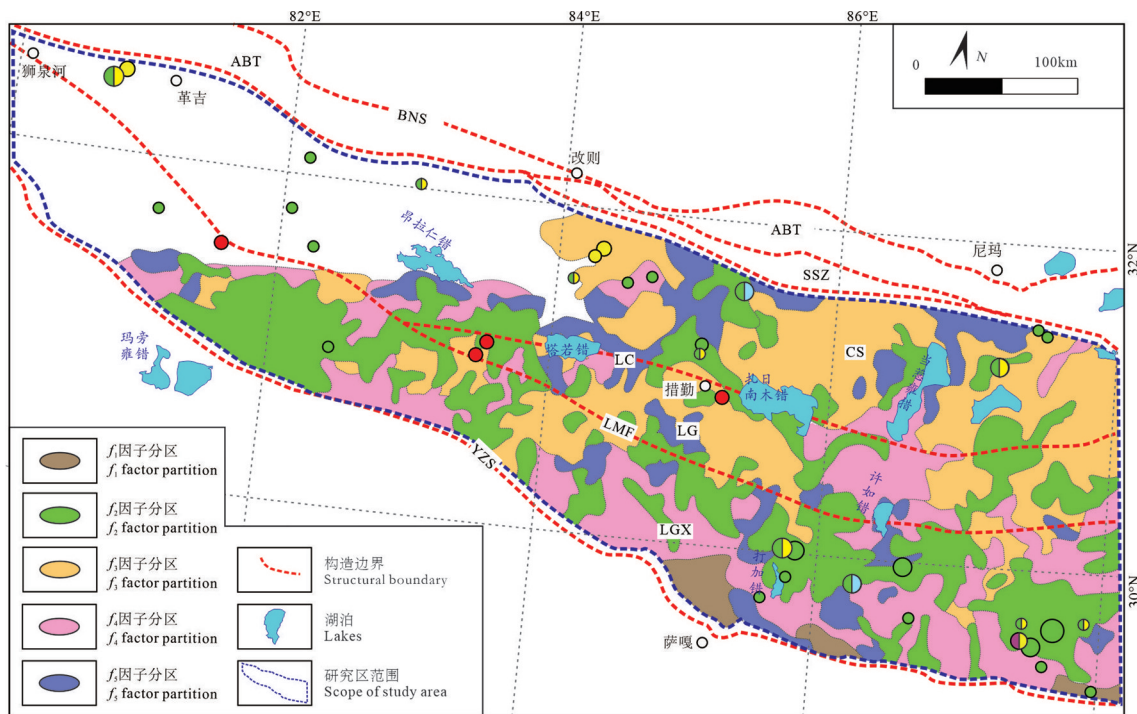


图 14 冈底斯成矿带西段地球化学分区图
(矿产图例同图 4; 构造单元代码同图 1)

Fig.14 Geochemical subdivisions map in the western Gangdise metallogenic belt
(The mineral legend is the same as Fig.4; The geotectonic elements code is the same as Fig.1)

译图来看(图 15a),区内各个期次的构造相互穿插交切,共同组成本区的构造格架,构造-成矿带的交汇部位为铜多金属矿化富集区,同时环形构造在区内分布较为广泛,其形态多为圆形、似圆形、椭圆形等形态,其成因较为复杂,本次工作重点解译晚三叠世—中侏罗世雅鲁藏布新特提斯洋壳俯冲环境相关的中酸性斑岩体、晚白垩世羌塘—拉萨地块碰撞环境相关的中酸性斑岩体、古新世—始新世印度—欧亚大陆同碰撞环境相关的中酸性斑岩体、渐新世—中新世印度—欧亚大陆碰撞后环境相关中酸性斑岩体引起的环形构造,以及与隐伏岩体和火山机构有关的环形构造,这对寻找斑岩铜矿具有重要的指示意义。尤其关注线形构造与环形构造的交切,通过统计线形构造交点频度和线环构造交点频度与已知矿床(点)的叠加空间分析来看(图 15b, c),线形构造交点频度高值区和线环构造交点频度高值区与已知矿床(点)套合较好,可以利用高值区来指示斑岩型铜矿的有利区。本次选择主成分分析法提取了研究区的羟基异常和铁染异常(图 15d),为了去除羟基矿物提取过程中铁氧化物的干扰,提取含羟基矿物异常时,利用 ETM1、4、5、7 波段组合进行主分量分析。由于铁氧化物在可见光谱段较为敏感,存在 Fe^{3+} 在 TM1、TM3 和 TM4 吸收带特征,所以在提取含铁染矿物异常选择 ETM1、3、4、5 组合进行主分量分析。

研究区已知斑岩型、浅成低温热液矿床的特征蚀变矿物组合为绿泥石、绢云母、黑云母等,反映了羟基矿物特征谱带特性。黄铁矿、角闪化带等反映了铁染矿物特征谱带特性。可以通过组合异常密度的计算即羟基异常和铁染异常重叠区域,叠加已知矿点进行空间分析,结果表明高异常区与已知矿床(点)相关性好,可以利用羟基+铁染组合异常的高值区来指示斑岩型铜矿的有利区(图 16)。

5 讨论

5.1 预测指标选取

冈底斯西段斑岩型矿床和浅成低温热液型矿床在时空上常相依出现,且常构成一套斑岩—浅成低温热液系统。本次研究,笔者重点开展了斑岩型铜矿床及浅成低温热液型铜多金属矿床的预测评价工作。前文已分析,晚三叠世—中侏罗世、晚

白垩世、古新世和渐新世—中新世等中酸性岩浆活动是本区斑岩型、浅成低温热液型矿床形成的主控因素;区域卫星重力异常的小波分解结果揭示了冈底斯西段浅、中、深部的地质构造特征,成矿带的各矿点受到深大断裂的控制,不同深度的重力异常高值区对应深部岩浆的上侵通道;Cu—Pb—Zn—Ag 元素组合为本区斑岩型铜矿主要成矿元素分区,Au—Sn 元素组合为本区斑岩型铜矿主要伴生元素分区,同时代表了金矿的近矿元素组合;遥感线—线、线—环复合交切的构造高频区是斑岩型铜矿化集中区的构造标志,羟基+铁染组合异常的高值区是重要的成矿有利区段。因此,上述信息可构建冈底斯成矿带西段斑岩型、浅成低温热液型矿床找矿预测的基础变量(表 3)。

5.2 预测过程

本次找矿预测工作,将成矿理论研究、计算机技术与地理信息系统(GIS)三者结合起来进行找矿预测,并在预测区内建立了 1:50 万比例尺的地质、化探、卫星重力、航磁、遥感和矿产地等多元信息数据库。在此基础上,通过研究成矿规律、典型矿床成矿模型,基于随机森林模型,结合地层、地物、地化以及遥感预测标志圈定研究区内的找矿远景区,定量给出各标志的重要性程度,进而开展定位预测。具体工作流程如下:(1)收集冈底斯成矿带西段矿集区相关的地、物、化、遥资料,建立待预测区完整的随机森林模型空间信息数据库和属性库。(2)对搜集到的化探数据运用地球化学场法重新进行异常信息提取。(3)采用网格法进行预测单元划分,确定合理的预测单元。(4)根据典型矿床研究成果,建立已知矿床的预测找矿模型,进行地质标志因素的选择和预测变量的初次预置。(5)在随机森林算法中,根据已知矿床特征和地质因素标志建立模型单元。(6)根据模型单元,运行预测得出成矿远景区。(7)运用 ROC 以及 AUC 评价模型的精确率。(8)运用随机森林回归算法,分析影响因子的重要性,对模型加以改进。

结合冈底斯成矿带西段矿床的分布特征和预测数据集的特点,在尽可能区别开矿床和不过多插值拟合预测数据的情况下,本文选取 $3.5\text{ km}\times 3.5\text{ km}$ 作为预测单元格标准,共划分出 10378 个单元格,其中含矿单元格有 326 个。通过遥感地质解译修正后

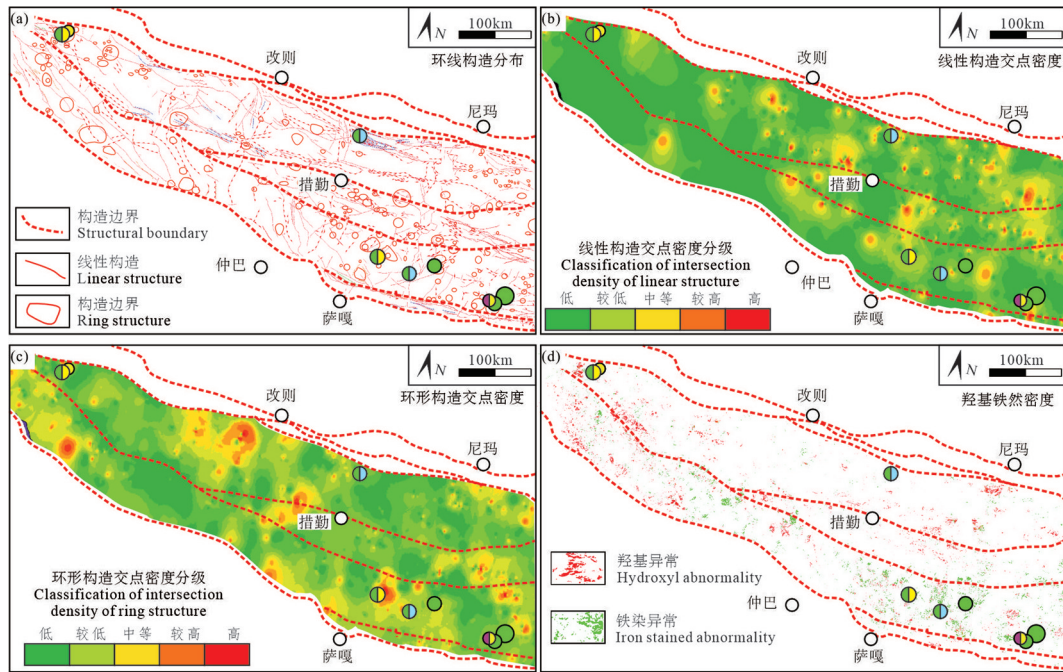


图 15 冈底斯成矿带西段遥感找矿信息图
(a、b、c、d说明见正文;矿产图例同图4)

Fig.15 Remote sensing prospecting information maps in the western Gangdise metallogenic belt
(The description of Fig.15 a, b, c, d is seen in the text; The mineral legend is the same as Fig.4)

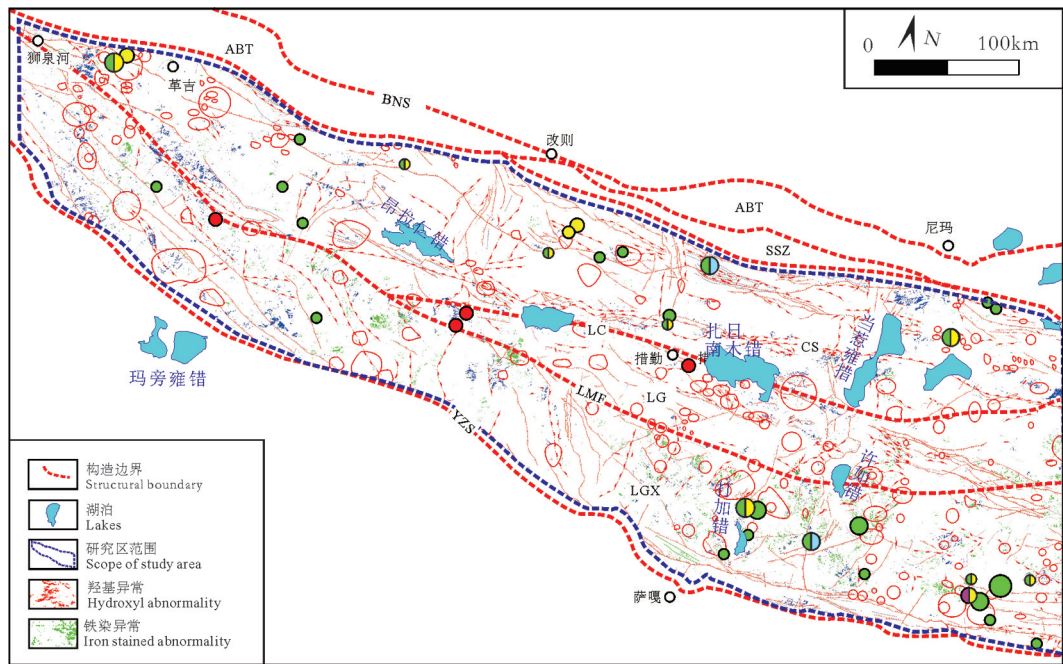


图 16 冈底斯成矿带西段遥感综合找矿信息图
(构造单元代码同图1;矿产图例同图4)

Fig.16 Remote sensing comprehensive prospecting information map in the western Gangdise metallogenic belt
(The geotectonic elements code is the same as Fig.1; The mineral legend is the same as Fig.4)

表3 冈底斯成矿带西段找矿预测基础变量
Table 3 Basic variables for prospecting prediction in the western Gangdise metallogenic belt

地质变量	遥感变量	航磁变量	卫星重力变量	化探变量	
				单元素对数 等值图	因子
1)拉萨地块南缘三叠纪—侏罗纪中酸性斑岩体;					
2)拉萨地块南缘古新世中酸性斑岩体;	1)线形构造交点密度高值区;	1)航磁小波1阶细节;	1)卫星重力小波1阶细节;	Au、Cu、Mo	f_2 、 f_3 和 f_5
3)拉萨地块南缘渐新世—中新世斑岩体;	2)线环构造交点密度高值区;	2)航磁小波2阶细节;	2)卫星重力小波2阶细节;		
4)拉萨地块北缘晚白垩世中酸性斑岩体	3)羟基-铁染综合密度高值区	3)航磁小波3阶细节;	3)卫星重力小波3阶细节;		
		4)航磁小波4阶细节	4)卫星重力小波4阶细节		

的1:50万地质图,构建各地层和蚀变带的出露区及断裂缓冲区。1:50万航磁数据通过小波多尺度分解,构建了航磁小波1~4阶细节4个变量,并通过二线性内插法重采样至3.5 km×3.5 km网格。重力数据选用 Bonalot et al. (2012) 提出的 WGM2012 Global Mode, 经过小波多尺度分解后的卫星重力1~5阶细节,4个变量,并通过二线性内插法重采样至3.5 km×3.5 km网格。从1:20万水系沉积物的39个元素测量数据中提取了各个单元元素的对数值和3个因子分量中,并通过二线性内插法重采样至3.5 km×3.5 km网格。重采样后的重、磁、化探、遥感变量保留了原始数据的空间分布特征。

对构建的冈底斯成矿带西段矿集区的数据进行标准化,稀疏数据根据最大值的绝对值进行标准化,其他数据依据原始数据的均值(mean)和标准差(standard deviation)进行标准化。之后再将标准化后的数据集导入欠采样随机森林进行预测,欠采样所构建的训练子集中,本文设定的成矿单元与非成矿单元的比例为1:1(图17)。同时为了对比分析,本文在冈底斯成矿带西段矿集区的标准化数据集的基础上应用了随机森林模型、欠采样逻辑回归(US-Logistic Regression)、欠采样支持向量机(US-Support Vector Classifier)、欠采样K最近邻(US-KNN, US-k Nearest Neighbor)进行对比。

各模型的调参,使用的GridSearchCV模块系统地遍历多种参数组合,通过交叉验证确定最佳效果参数。结果显示,欠采样随机森林的最佳参数为n_estimators=300; Max_depth=3; Min_samples_leaf=10; Min_impurity_split=60。各预测模型的计算结果

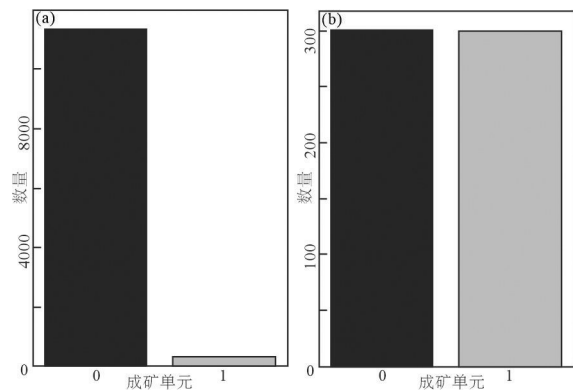


图17 冈底斯成矿带西段数据集成矿单元数量(a)和训练子集成矿单元数量(b)对比

Fig.17 The comparison of the ore units amount in data set (a) and the ore units amount in training subset (b) in the western Gangdise metallogenic belt

评估表(表4)和ROC曲线图(图18)显示,在极度不平衡的高维情况下,欠采样随机森林模型的预测结果的可靠性明显优于结合经典欠采样的决策树、逻辑回归、SVC和KNN。

一般算法中,利用投票的方式确定单元是否为成矿单元,这还不能满足对找矿预测分级的要求,这要求对后验概率进行分析。后验概率是信息理论的基本概念之一,在一个通信系统中,在收到某个消息之后,接收端所了解到的该消息发送的概率称为后验概率。这里将欠采样随机森林的预测结果中单元可能为成矿单元作为其后验概率(图19)。已知矿点均位于模型预测的后验概率相对高值区,这反证了后验概率的可靠性。将后验概率和已知矿点进行综合分析(图20),单元格的后续概率呈现偏峰分布。同时已知矿床、矿点对应的后验概

表4 冈底斯成矿带西段预测模型结果评估表

指标	欠采样随机森林	经典欠采样决策树	经典欠采样逻辑回归	经典欠采样SVC	经典欠采样KNN
TP	304	303	237	74	126
TN	9843	9257	9272	9837	9412
FP	209	695	780	215	640
FN	22	22	88	252	200
Precision	0.593	0.304	0.233	0.256	0.164
Sensitivity	0.933	0.932	0.729	0.227	0.387
F-measure	0.725	0.458	0.353	0.241	0.231
G-mean	0.743	0.532	0.412	0.241	0.252

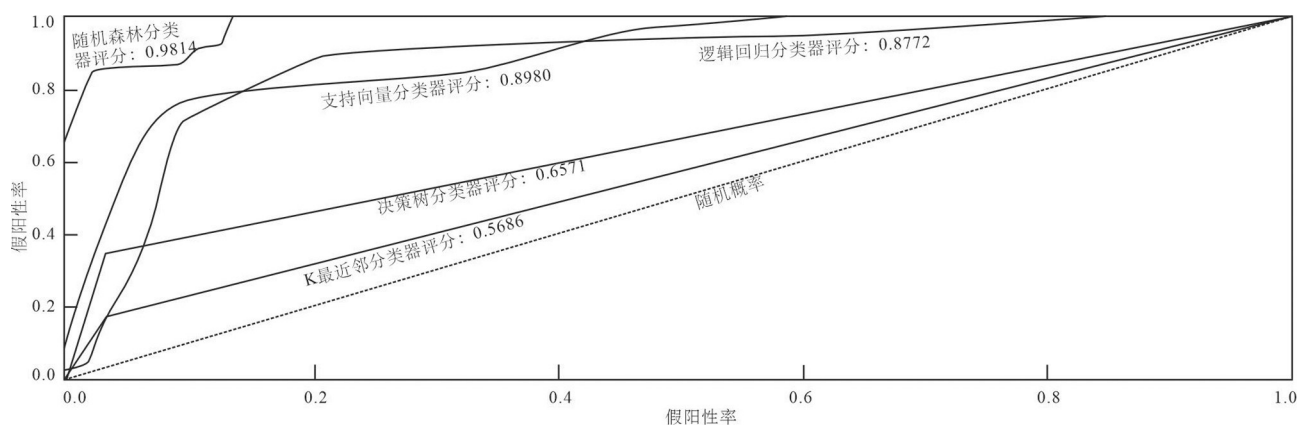


图18 冈底斯成矿带西段预测数据集在不同模型下的ROC曲线

Fig.18 ROC curves of the data set under different models in the western Gangdise metallogenic belt

率较高,且近似呈正态分布(图20),这反证了后验概率高值对找矿具有启示作用,显示了其可靠性。这里,结合后验概率、矿床分布和矿床规模,将后验概率 >0.584 的单元格作为圈定找矿靶区的最低标准,也即三级预测区的下限。同时结合成矿单元后验概率的分布规律,将其均值和均值+1倍方差作为二级预测区和一级预测区的下限,即一级预测区的后验概率 >0.721 ,二级预测区的后验概率为 $0.663\sim 0.721$,三级预测区的后验概率为 $0.584\sim 0.663$ 。

拉达克—南冈底斯岩浆弧带的斑岩—浅成低温热液型铜金多金属矿床主要的预测结果与目前已发现的斑岩—浅成低温热液型矿床较为吻合,目前已发现的朱诺、罗布真、红山、达若、鲁尔玛等矿床(点)均位于计算出的成矿有利度较高的地区,同时,在冈仁波齐到萨嘎一带的找矿有利度也较高,具有一定的找矿潜力。措勤—申扎岩浆弧带已发现的斑岩—矽卡岩型铜钼矿床和浅成低温热液金矿床与计算出的成矿有利区域也十分吻合,成矿有

利分析显示,尕尔穷、昂拉仁错、拔拉杂、当惹雍措北等地区具有较大的找矿潜力(图21)。

5.3 远景区圈定与优选

矿床属于一定的大地构造演化过程中形成的特殊地质体。因此,矿产资源的形成与特定的大地构造时空演化阶段、成矿地质作用过程及控矿构造系统具有密不可分的关系。矿床的定位不仅取决于体系与环境之间、体系内部各要素之间、外部控矿环境之间的耦合程度,而且取决于定位系统时空结构随时间变化的控矿要素主次、层次、地球化学场、能量场和应力场的转换制约。因此,地质体物理—化学条件或岩性—岩相的转换区带是成矿作用发生和矿体定位的最有利部位(叶天竺,2013;朱裕生等,2013;肖克炎等,2013)。

在后验概率分级的基础上,将预测区内集中的区块进行圈定。根据冈底斯成矿带西段晚古生代以来大地构造演化的时空结构、区域构造—岩浆—沉积作用差异、区域成矿的特点以及近年来的资源评

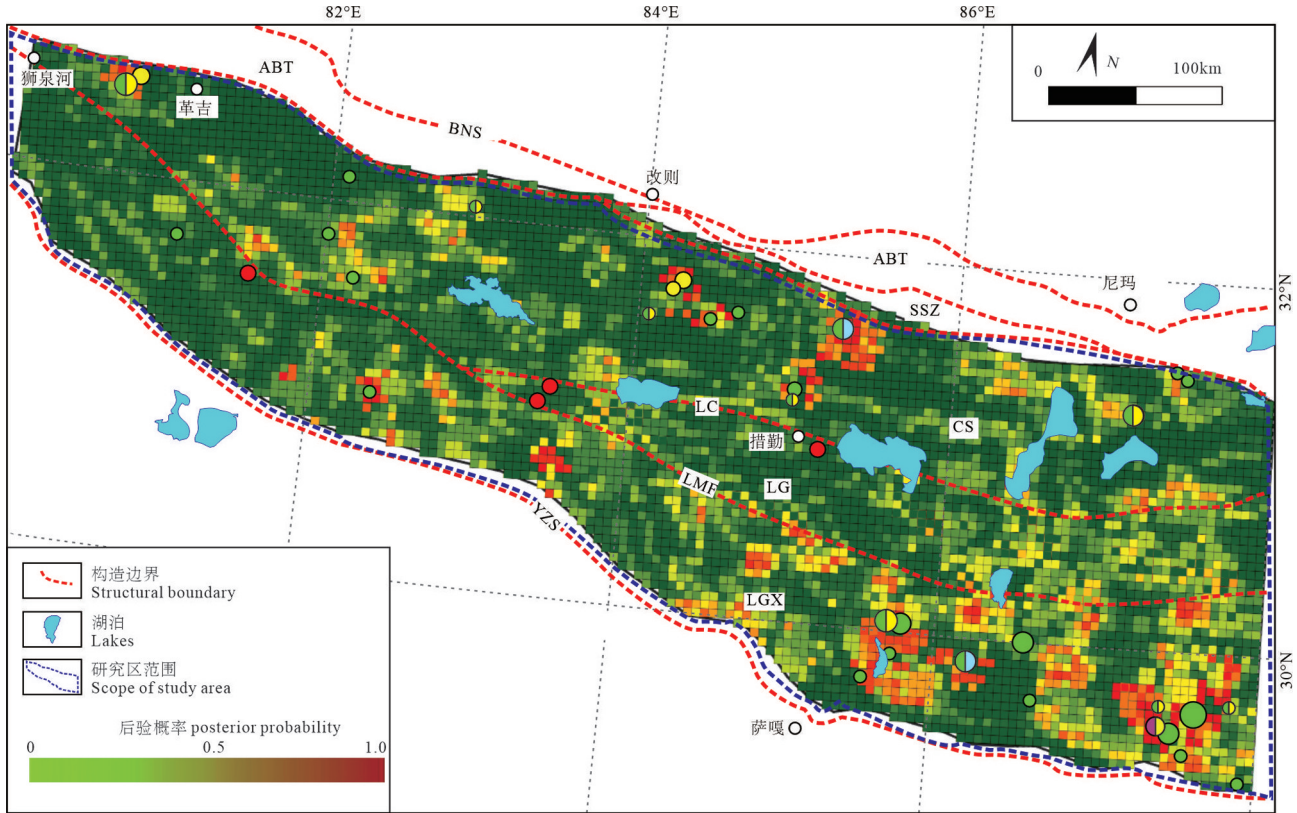


图19冈底斯成矿带西段后验概率等值图
(矿产图例同图4;构造单元代码同图1)

Fig.19 The isogram map of posterior probability in the western Gangdise metallogenic belt
(The mineral legend is the same as Fig.4; The geotectonic code is the same as Fig.1)

价进展,以及化探异常、物探异常、遥感异常、成矿有利度,结合研究区目前的研究现状以及已知矿床点的类型、数量、代表性、规律等信息,对找矿靶区进行优选,并将找矿远景区划分为I、II、III三级。其中远景区划分标准为: I级找矿远景为成矿条件很有利,有大中型以上斑岩型矿床分布,直接找矿信息强,矿床埋深处于目前经济技术条件可开采范围; II级找矿远景区:成矿条件有利,有一定的斑岩型矿床点的分布,或者存在与斑岩型矿床相关的小型以上浅成低温热液型和矽卡岩型矿床,直接找矿信息较强,有一定的找矿潜力,已知矿床点埋深处于目前经济技术条件可开采范围; III级找矿远景区:地质工作程度低,成矿条件有利,有一定的斑岩型或化探异常分布,具有一定的找矿潜力。最后,圈定找矿远景区11个(图21): I级成矿远景区2个, II级成矿远景区3个, III级成矿远景区6个,各个成矿远景区特征信息见表5。

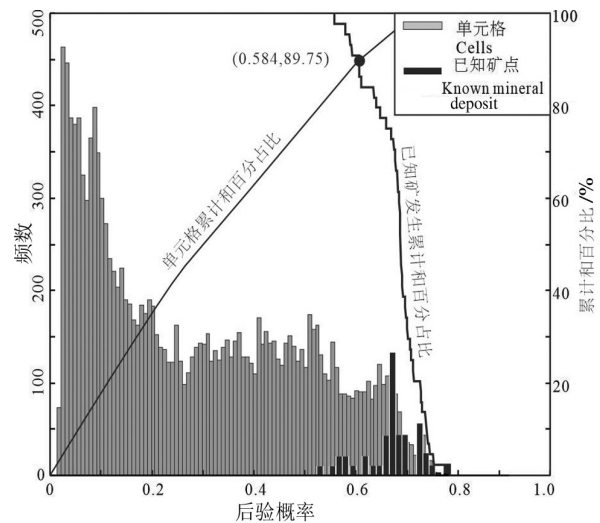


图20 冈底斯成矿带西段矿集区单元格与已知矿点后验概率对比图

Fig.20 The comparison of posterior probabilities for unit gridsto known ore spots in the western Gangdise metallogenic belt

表5 冈底斯西段与斑岩系统有关的铜多金属矿找矿远景区特征表

Table 5 Characteristics of prospecting areas for the copper polymetallic deposits related to porphyry system in the western Gangdise metallogenic belt

远景区	级别	名称	主要地层	主要侵入岩	主要构造
1 - III	III级	尕尔穷	则弄群、朗山组、捷嘎组、多爱组等侏罗系—白垩系沉积岩	晚白垩世正长花岗岩、花岗闪长岩、斜长花岗岩、花岗闪长斑岩等	区内近东西向断裂构造非常发育
2 - III	III级	昂拉仁错西	昂杰组、下拉组、则弄群、朗山组、多尼组等二叠系—白垩系沉积岩, 典中组、年波组、帕那组等古近系火山岩, 布嘎寺组等新近系火山岩	早白垩世花岗闪长岩、二长闪长岩, 晚白垩世花岗斑岩等	位于区域性的近东西向、近南北向断裂的交汇地区
3 - II	II级	布东拉	则弄群、朗山组、多尼组等侏罗系—白垩系沉积岩	晚白垩世花岗闪长岩、二长花岗岩、花岗斑岩等	近东西向断裂构造非常发育
4 - I	I级	拔拉杂	拉嘎组、昂杰组、下拉组、则弄群、朗山组、多尼组等石炭系—白垩系沉积岩	晚白垩世花岗闪长斑岩、黑云母花岗岩等	近东西向断裂构造非常发育
5 - III	III级	江拉昂宗	查果罗玛组、永珠组、拉嘎组、昂杰组、下拉组、则弄群、朗山组、多尼组等泥盆系—白垩系沉积岩	晚白垩世二长花岗岩、正长花岗岩、正长闪长岩、石英二长斑岩、花岗斑岩等	区内多组近东西向断裂构造和近南北向构造交汇
6 - III	III级	阿果错	拉嘎组、昂杰组等二叠系沉积岩; 则弄群等白垩系沉积岩; 典中组、年波组、帕那组等古近系火山岩	晚白垩世二长闪长岩、花岗斑岩等	位于区域性的近东西向、近南北向断裂的交汇地区
7 - III	III级	者布日错	典中组等古近系火山岩	白垩纪花岗闪长岩、二长闪长岩等	位于区域性的近东西向、近南北向断裂的交汇
8 - III	III级	杰萨错	典中组等古近系火山岩	晚白垩世二长闪长岩、花岗斑岩等; 始新世二长闪长岩等	位于区域性的近东西向、近南北向断裂的交汇
9 - II	II级	打加错	拉嘎组、昂杰组、下拉组等石炭系—二叠系沉积岩, 典中组、年波组、帕那组等古近系火山岩, 布嘎寺组等新近系火山岩	中二叠世辉长岩、辉绿岩、闪长岩; 晚三叠世二长闪长岩、正长岩、石英二长斑岩; 始新世花岗闪长岩、石英闪长岩等	区内多组近东西向断裂构造和近南北向构造交汇
10 - II	II级	达若	拉嘎组、昂杰组、下拉组等石炭系—二叠系沉积岩, 典中组、年波组、帕那组等古近系火山岩, 布嘎寺组等新近系火山岩	始新世花岗闪长岩、石英闪长岩等	区内多组近东西向断裂构造和近南北向构造交汇
11 - I	I级	罗布真	拉嘎组、昂杰组等石炭系—二叠系沉积岩, 典中组、年波组、帕那组等古近系火山岩	始新世花岗闪长岩、二长闪长岩, 中新世二长花岗斑岩、花岗斑岩等	多组近东西向断裂构造和近南北向构造交汇

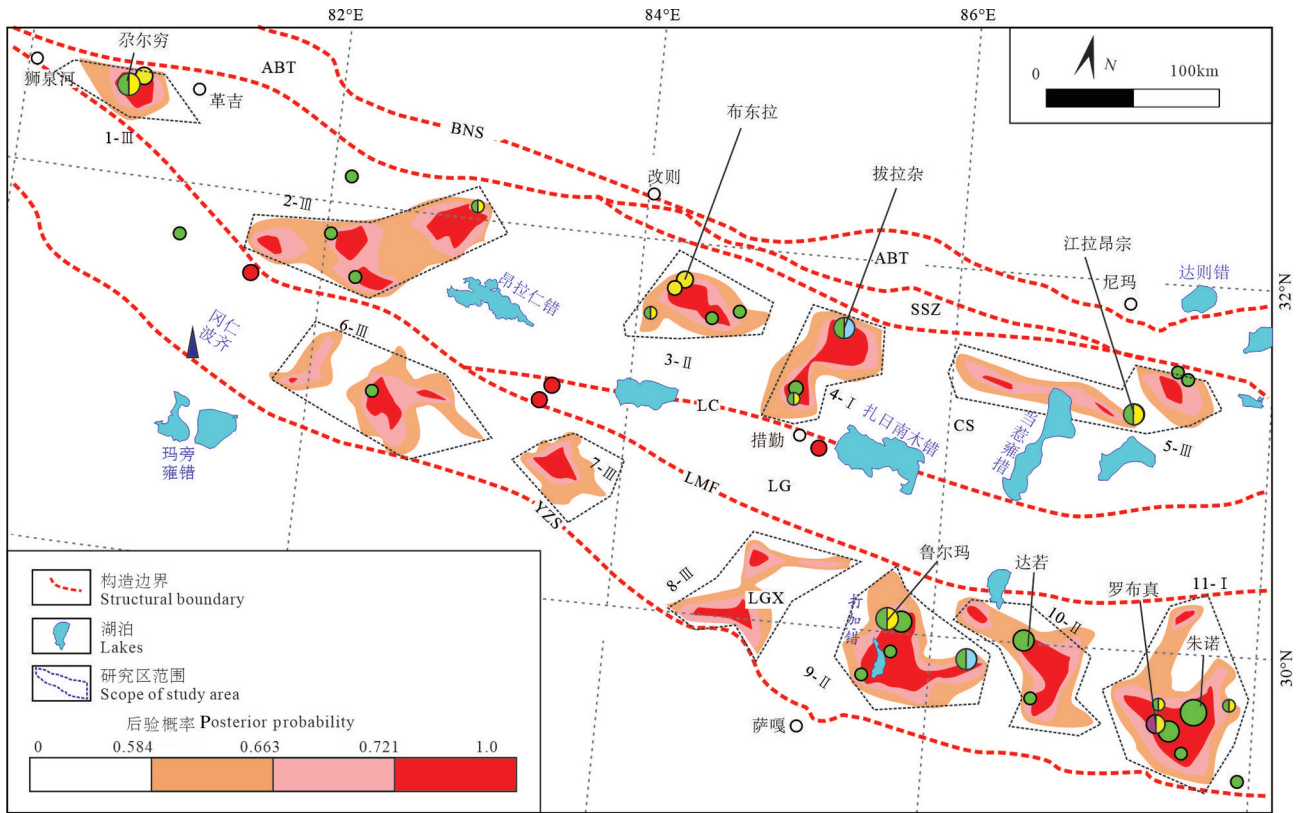


图21 冈底斯西段与斑岩系统有关的铜多金属矿找矿预测图
(矿产图例同图4;构造单元代码同图1)

Fig.21 The prospecting prediction map for the copper polymetallic deposits related to porphyry system in the western Gangdise metallogenic belt
(The mineral legend is the same as Fig.4; The geotectonic elements code is the same as Fig.1)

6 结论

(1) 运用综合找矿模型,基于随机森林算法开展了研究区找矿预测,圈定斑岩型铜多金属矿找矿远景区11个: I级远景区2个, II级远景区3个, III级远景区6个,其中罗布真、打加错、达若、拔拉杂、尕尔穷和布东拉等远景区找矿潜力较大,在这些远景区有望发现新的矿床(点),为冈底斯成矿带找矿勘查打开了新的视野。

(2) 本文研究表明,基于大数据机器学习的欠采样随机森林预测模型,有望适应综合地物化遥信息的预测数据高维和极不平衡特点,为成矿带尺度区域找矿预测提供方向,其有效性期待进一步验证。

致谢:感谢中国地质调查局成都地质调查中心王永华教授级高级工程师、张建龙教授级高级工程师、焦彦杰教授级高级工程师、张伟正高级工程师、李华正高级工程师、张志副研究员、梁维副研究员、曹华文副研究员、陈敏华高级工程师、李应栩副研

究员和黄勇工程师,中国地质调查局应用地质调查中心黄勇研究员,成都理工大学杨武年教授、李佑国教授、何政伟教授,中国地质大学(武汉)刘文浩副教授、高顺宝副教授,中国地质大学(北京)张振杰副教授,以及多年来参加中国地质调查局青藏高原地质大调查项目的众多科技人员对本论文数据的支持和论文撰写的指导。

注释

- ① 中国地质调查局成都地质调查中心. 2019. 冈底斯—喜马拉雅铜矿资源基地调查项目成果报告[R].
- ② 中国地质调查局成都地质调查中心. 2019. 西藏昂仁县鲁尔玛地区1:5万矿产地质调查成果报告[R].

References

Andreoletti G, Lanata C M, Trupin L, Paranjpe I, Jain T S, Nititham J, Taylor K E, Combes A J, Maliskova L, Ye C J, Katz P, Dal E M, Yazdany J, Criswell L A, Sirota M. 2021. Transcriptomic analysis of immune cells in a multi-ethnic cohort of systemic lupus

- erythematosus patients identifies ethnicity- and disease- specific expression signatures [J]. *Communications Biology*, 488: 4838.
- Asadi S, Roshan S E, Kattan M W. 2021. Random forest swarm optimization- based for heart diseases diagnosis [J]. *Journal of biomedical informatics*, 115(24): 103690.
- Bonvalot S, Balmico G, Briais A, Kuhn M, Peyrefitte A, Vales N, Biancale R, Gabalda G, Reinquin F, Sarrailh M. 2012. World Gravity Map[M]. Commission for the Geological Map of the World. Eds. BGI-CGMW-CNES-IRD, Paris.
- Cai Huihui, Zhu Wei, Li Muxuan, Liu Yuanyuan, Li Longbin, Liu Chang. 2019. Prediction method of tungsten- molybdenum prospecting target area based on deep learning [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 21(6): 928-936.
- Chen Jin, Mao Xiancheng, Liu Zhankun Deng Hao. 2020. Three- dimensional metallogenic prediction based on random forest classification algorithm for the Dayingezhuang gold deposit [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 44(2): 231-241 (in Chinese with English abstract).
- Chen Xin, Zheng Youye, Gao Sunbao, Wu Song, Jiang Xiaojia, Jiang Junsheng, Cai Pengjie, Lin Cheng'gui. 2020. Ages and petrogenesis of the late Triassic andesitic rocks at the Luerma porphyry Cu deposit, western Gangdese, and implications for regional metallogeny[J]. *Gondwana Research*, 85: 103-123.
- Cheng Qiuming. 2007. Singularity- generalized self- similarity- fractal spectrum (3S) models [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 14(5): 1-10 (in Chinese with English abstract).
- Cutler D R, Jr Edwards T C E., Beard K H, Hess K T. 2007. Random forests for classification in ecology[J]. *Ecology*, 88(11): 2783-2792.
- Dai Jingjing, Qu Xiaoming, Xin Hongbo, 2010. Extraction of alteration mineral information using ASTER remote sensing data in Duolong area, Tibet, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 9(5): 752-759 (in Chinese with English abstract).
- El B H, Rahouti M., El B M. 2021. Identification of SARS- CoV- 2 origin: using Ngrams, Principal Component Analysis and Random Forest Algorithm [J]. *Informatics in Medicine Unlocked*, 24: 100577.
- Fang Kuangnan, Wu Jianbin, Zhu Jianping, Xie Bangchang. 2011. A review of technologies on random forests[J]. *Statistics & Information Forum*, 26(3): 32-38 (in Chinese With English abstract).
- Fouedjio F. 2020. Exact conditioning of regression random forest for spatial prediction [J]. *Artificial Intelligence in Geosciences*, 1: 11-23.
- Gao Shunbao. 2015. Copper- iron Polymetal Metallogenic Regularity and Election of Targeet Areas in the Western of Gangdis Metallogenic Belt, Tibet [D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 1-110 (in Chinese with English abstract).
- Geng Quanru, Li Wengchang, Wang Li, Zeng Xiangting, Peng Zhimin, Zhang Xiangfeng, Zhang Zhang, Cong Feng, Guan Junlei. 2021. Paleozoic tectonic framework and evolution of the central and western Tethys[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 41(2): 297-315 (in Chinese with English abstract)
- Han Shanchu, Jiang Yao, Pan Jiayong, Wan Hong, Huang Tianyu. 2021. Isotopic geochemical characteristics of Yuejingou copper deposit in Gangdise metallogenic belt, Tibet[J]. *Journal of East China Institute of Technology (Natural Science Edition)*, 44(5): 423-432.
- Hardeep S R, Naresh K, Prabha G. 2022. Machine learning- based modeling to predict inhibitors of acetylcholinesterase [J]. *Molecular Diversity*, 26(1): 331-340.
- Hou Zengqian, Cook N J. 2009. Metallogenesis of the Tibetan collisional orogen: A review and introduction to the special issue [J]. *Ore Geology Reviews*, 36: 2-24.
- Huang Faming, Ye Zhou, Yao Chi, Li Yuanyao, Yin Kunlong, Huang Jinsong, Jiang Qinghui. 2020. Uncertainties of landslide susceptibility prediction: Different attribute interval divisions of environmental factors and different data based models [J]. *Earth Science*, 45(12): 4535-4549 (in Chinese with English abstract).
- Huang Hanxiao, Li Guangming, Liu Hong, Zhang Hongming, Zhang Linkui, Yu Huai, Jiao Yanjie, Liang Wei. 2018. An low sulfide epithermal gold- silver polymetallic deposit newly discovered in the western section of the Gangdise metallogenic belt[J]. *Geology in China*, 45(3): 628-629 (in Chinese with English abstract).
- Huang Hanxiao, Li Guangming, Liu Hong, Zhang Linkui, Cao Huawen, Zhou Qing, Wang Xinxin, Yan Guoqiang. 2019. Zircon U- Pb, molybdenite Re- Os and quartz vein Rb- Sr geochronology of the Luobuzhen Au- Ag and Hongshan Cu deposits, Tibet, China: Implications for the oligocene- miocene porphyry- epithermal metallogenic system [J]. *Minerals*, 9(8): 476-491.
- Huang Hanxiao, Zhang Linkui, Liu Hong, Li Guangming, Huang Yong, Lan Shuangshuang, Lü Menghong. 2019. Major types, mineralization and potential prospecting areas in western section of the Gangdise metallogenic belt, Tibet [J]. *Earth Science*, 44(6): 1876-1887 (in Chinese With English abstract).
- Huang Yong, Li Guangming, Ding Jun, Dai Jie, Yan Guoqiang, Dong Suiliang, Huang Hanxiao. 2017. Origin of the newly discovered Zhunuo porphyry Cu- Mo- Au deposit in the western part of the Gangdese porphyry copper belt in the southern Tibetan plateau, SW China [J]. *Acta Geologica Sinica (English edition)*, 91(1): 109-134.
- Huang Yong, Ren Minghua, Liang Wei, Li Guangming, Heilbron K., Dai Zuowen, Wang Yiyun, Zhang Li. 2020. Origin of the oligocene Tuolangla porphyry- skarn Cu- W- Mo deposit in Lhasa terrane,

- southern Tibet [J]. *China Geology*, 3: 369–384.
- Huang Yonggao, Han Fei, Li Yingxu, Jia Xiaochuan, Yang Xuejun, Li Guangming, Yang Qingsong. 2020. The discovery of Early Jurassic volcanism in the Nanmulin Basin, Tibet: Constraints from zircon U–Pb age[J]. *Geology in China*, 47(4): 1266–1267(in Chinese with English abstract).
- Lang Xinghai, Guo Wenbo, Wang Xuhui, Deng Yulin, Yang Zongyao, Xie Fuwei, Li Zhuang, Zhang Zhong, Jiang Kai. 2019. Petrogenesis and tectonic implications of the ore-bearing porphyries in the Xiongcu district: Constraints from the geochronology and geochemistry[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(7): 2105–2123 (in Chinese with English abstract).
- Lang Xinhai, Deng Yulin, Wang Xuhui, Tang Juxing, Xie Fuwei, Yang Zongyao, Yin Qing, Jiang Kai. 2020. Reduced fluids in porphyry copper–gold systems reflect the occurrence of the wall-rock thermogenic process: An example from the No.1 deposit in the Xiongcu district, Tibet, China [J]. *Ore Geology Reviews*, 118: 103–212.
- Langroodi A K, Vahdatikhaki F, Doree A. 2021. Activity recognition of construction equipment using fractional random forest [J]. *Automation in Construction*, 122: 103465.
- Leo B. 2001. Random forests[J]. *Mach Learn*, 45(1): 5–32.
- Li Cangbai, Xiao Keyan, Li Nan, Song Xianglong, Zhang Shuai, Wang Kai, Chu Wenkai, Cao R. 2020. Comparative study of support vector machine, random forest and artificial neural Network machine learning algorithms in geochemical anomaly information extraction[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 41(2): 309–319.
- Li Guangming, Pan Guitang, Wang Gaoming, Huang Zhiming, Gao Dafa. 2004. Evaluation and prospecting value of mineral resources in Gangdise metallogenic belt, Tibet, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 31(1): 22–27 (in Chinese with English abstract).
- Li Guangming, Zhang Linkui, Zhang Zhi, Xiao Xiangbiao, Liang Wei, Hou Chunqiu. 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.
- Li Jinghui. 2008. Metallogenic systems and regularity of porphyry-type molybdenum deposit in Dabieshan mountain[J]. *Journal of East China Institute of Technology (Natural Science Edition)*, 31(1): 25–30.
- Lin Jinxiang, Qin Kezhang, Lin Guangming, Lin Jindeng, Xiao Bo, Jiang Huazhai, Han Fengjie, Huang Shufeng, Chen Lei, Zhao Junxing. 2001. Zircon U–Pb geochronology and garnet composition of the Qiangdui Cu–Mo deposit in the eastern section of Gangdise and their significances [J]. *Geology and Prospecting*, 47(1): 11–19 (in Chinese with English abstract).
- Liu Hong, Huang Hanxiao, Li Guangming, Li Wenchang, Li Youguo, Ma Dongfang, Huang Yong, Zhou Qing, and Fu Jiangang. 2022a. Petrogenesis of the Early Cretaceous Xiabie Co I–type granite in southern Qiangtang, Tibet (Xizang), China: Evidences from whole-rock geochemistry, Rb–Sr, Sm–Nd, and Pb isotopes, and LA–ICP–MS zircon U–Pb ages and Lu–Hf isotopes [J]. *Acta Geologica Sinica (English edition)*, 96(3): 919–937.
- Liu Hong, Huang Hanxiao, Li Guangming, Li Wenchang, Zhang Linkui, Lan Shuangshuang, Lü Menghong, Song Wenjie. 2022b. Subduction-related Late Triassic Luerma porphyry copper deposit, western Gangdese, Tibet, China: Evidence from geology, geochemistry, and geochronology [J]. *Ore Geology Reviews*, 154: 105253. doi: 10.1016/j.oregeorev.2022.105253.
- Liu Hong, Huang Hanxiao, Li Guangming, Xiao Wanfang, Zhang Zhilin, Liu Bo, Ma Dongfang, Dong Lei, Ma Dong. 2015. Factor analysis in geochemical survey of the Shangxu gold deposit, northern Tibet [J]. *Geology in China*, 42(4): 1126–1136 (in Chinese with English abstract).
- Liu Hong, Huang Hanxiao, Ouyangyuan, Zhang Jinghua, Zhang Tengjiao, Li Fu, Xiao Qiliang, Zeng Jian, Hou Qian, Wen Dengkui, Duan Shengyi. 2020a. Soil's geologic investigation in Daliangshan, Xichang, Sichuan [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 40(1): 91–105 (in Chinese with English abstract).
- Liu Hong, Huang Hanxiao, Zhang Linkui, Li Guangming, Lü Menghong, Yan Guoqiang, Huang Yong, Lan Shuangshuang, Xie Hui. 2019b. Origin and evolution of ore-forming fluids in Luerma porphyry copper deposit from the western Gangdise [J]. *Earth Science*, 44(6): 1935–1956 (in Chinese With English abstract).
- Liu Hong, Huang Hanxiao, Li Guangming, Zhang Linkui, Ouyang Yuan, Xiang Anping., Huang Yong, Lü Menghong, Lan Shuangshuang. 2021a. Luerma, a newly discovered Late Triassic porphyry copper–gold ore spot in the western Gangdise metallogenic belt, Tibet [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 40(6): 569–581 (in Chinese with English abstract).
- Liu Hong, Li Guangming, Huang Hanxiao, Zhang Linkui, Lü Menghong, Lan Shuangshuang, Xiehui. 2019a. The discovery of the Late Triassic porphyry type Cu deposit from Gangdise metallogenic belt, Tibet [J]. *Geology in China*, 46(5): 1238–1240 (in Chinese with English abstract).
- Liu Hong, Li Guangming, Li Wenchang, Huang Hanxiao, Li, Youguo, Ouyang, Yuan, Zhang, Xiangfei, Zhou Qing. 2022. Petrogenesis and tectonic setting of the Late Early Cretaceous Kong Co A–type granite in the northern margin of Central Lhasa subterranean, Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 38(1): 230–252 (in Chinese with English abstract).
- Liu Hong, Li Guangming, Li Wenchang, Zhang Jinghua, Huang Hanxiao, Li Youguo, Zhang Zhilin, Zhang Tengjiao. 2021b.

- Epithermal mineralization at the Budongla gold deposit, in Zhongba, Tibet: Evidences from Fluid Inclusions and H–O Isotopes [J]. *Mineral Deposits*, 40(2): 311–328 (in Chinese With English abstract).
- Liu Hong, Li Guangming, Zhang Zhilin, Huang Hanxiao, Xiao Wanfeng. 2014b. Geochemical analysis of rock debris in Muru Area, Gerze County, Tibet [J]. *Metal Mine*, 43(11): 105–108 (in Chinese with English abstract).
- Liu Hong, Li Youguo, Li Wenchang, Li Guangming, Ma Dongfang, Ouyang Yuan, Huang Hanxiao, Zhang Zhilin, Li Tong, Wu Junyi, 2022c. Petrogenesis of the late Cretaceous Budongla Mg–rich monzodiorite pluton in the central Lhasa subterrane, Tibet, China: Wholerock geochemistry, zircon U–Pb dating, and zircon Lu–Hf isotopes [J]. *Frontiers in Earth Science*, 10: 927695.
- Liu Hong, Lü Xinbiao, Li Chuncheng, Liu Ge, Shang Shichao, Wang Lin, Zhang Wei, Mao Rongwei. 2013. Metallogenic conditions and ore–searching prospect at depth of the Jincheng gold ore deposit in Luoshan county, Henan province [J]. *Geology and Prospecting*, 49(2): 265–273 (in Chinese with English abstract).
- Liu Hong, Lü Xinbiao, Yuan Qian, Ke Changshu, Zhu Qiaoqiao, Liu Xiao, Wang Yuqi, Zhang Shanming. 2014a. A study on geology and prospecting potential of Louziwan district of gaoliangdian Fe–Cu deposit, Xinyang area, Henan province, China [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 34(3): 337–342 (in Chinese with English abstract).
- Liu Hong, Xia Xiangbiao, Huang Hanxiao, Zhang Linkui, Lan Shuangshuang, Lü Menghong, Ai Jinbiao, Xie Hui. 2019c. Geochemical statistics analysis of stream sediment and prospecting potential of Xuexiumaer area in western Gangdese metallogenic belt, Tibet [J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 39(5): 847–855 (in Chinese with English abstract).
- Liu Hong, Zhang Hui, Li Guangming, Huang Hanxiao, Xiao Wanfeng, You Qin, Ma Dongfang, Zhang Hai, Zhang Hong. 2016. Petrogenesis of the Early Cretaceous Qingcaoshan strongly peraluminous S–type granitic pluton, southern Qiangtang, northern Tibet: Constraints from whole–rock geochemistry and zircon U–Pb geochronology [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 52(5): 848–860 (in Chinese with English abstract).
- Liu Hong, Zhang Linkui, Huang Hanxiao, Li Guangmin, Yu Huai, Huang Yong, Liang Wei, Yan Guoqiang, Zhang Hongming, Chen Xiaoping. 2020c. 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).
- Liu Hong, Zhang Linkui, Huang Hanxiao, Li Guangming, Ouyang Yuan, Lü Menghong, Liu Han, Lan Shuangshuang, Yan Guoqiang, 2019d. Petrogenesis of Late Triassic Luerma monzodiorite in western Gangdise, Tibet, China [J]. *Earth Science*, 44(7): 2339–2352 (in Chinese with English abstract).
- Liu Weidong, Tang Zhipeng, Xiao Yan, Han Mengyao, Jiang Wanbei. 2019. Identifying the key factors influencing Chinese carbon intensity using machine learning, the random forest algorithm, and evolutionary analysis [J]. *Acta Geographica Sinica*, 74(12): 2592–2603 (in Chinese with English abstract).
- Luciano A C D S, Picoli M C A, Duft D G, Rocha J V, Leal M R .L V, Le M G. 2021. Empirical model for forecasting sugarcane yield on a local scale in Brazil using Landsat imagery and random forest algorithm [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 184: 106063.
- Makungwe M, Chabala L M, Chishala B H, Lark R M. 2021. Performance of linear mixed models and random forests for spatial prediction of soil pH [J]. *Geoderma*, 379(4): 115079.
- Mao J W, Pirajno F, Lehmann B, Lehman B, Luo M C, Berzina A. 2014. Distribution of porphyry deposits in the eurasian continent and their corresponding tectonic settings [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 79(2): 576–584.
- Milanović S, Marković N, Pamučar D, Gigović L, Kostić P, Milanović S D. 2020. Forest fire probability mapping in eastern Serbia: Logistic Regression versus random forest method [J]. *Forests*, 12(1): 1–15.
- Mo Xuanxue, Niu Yaolin, Dong Guochen, Zhao Zhidan, Hou Zengqian, Zhou Su, Ke Shan. 2008. Contribution of syncollisional felsic magmatism to continental crust growth: A case study of the Paleogene Linzizong volcanic succession in southern Tibet [J]. *Chemical Geology*, 250(1): 49–67.
- Mpanya D, Celik T, Klug E, Ntsinjana H. 2021. Predicting mortality and hospitalization in heart failure using machine learning: A systematic literature review [J]. *IJC Heart & Vasculature*, 34: 100773.
- Naeini E Z, Prindle K. 2018. Machine learning and learning from machines[J]. *The Leading Edge*, 37(12): 886–893.
- Ni Pei, Chui Zhe, Pan Junyi. 2020. An integrated investigation of ore–forming fluid evolution in porphyry and epithermal deposits and their implication on exploration [J]. *Earth Science Frontiers*, 27(2): 60–78 (in Chinese with English abstract).
- Ouyang Yuan, Liu Hong, Huang Hanxiao, Li Guangming, Yang Wunian, Xiao Wanfeng, Zhang Zhilin, Ma Chengyi, Ma Buying. 2016. Study on geochemical multivariate statistics analysis and prospecting potential of Shangxu–Daze area in the northern Tibet[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 36(4): 586–594 (in Chinese with English abstract).
- Ouyang Yuan, Yang Wunian, Huang, Huanxiao, Liu Hong, Zhang Jianlong, Zhang Jinhua. 2017. Metallogenic dynamics background of Ga'erqiong Cu–Au deposit in Tibet, China [J]. *Earth Sciences*

- Research Journal, 21(2): 51–65.
- Ouyang Yuan. 2020. Metallogenic Regularity and Metallogenic Prediction of Porphyry Copper Deposits in the Western of Gangdise Metallogenic Belt, Tibet [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 1–110 (in Chinese with English abstract).
- Pan Guitang, Mo Xuanxue, Hou Zengqian, Zhu Dicheng, Wang Liquan, Li Guangming, Zhao Zhidan, Geng Quanru, Liao Zhongli. 2006. Spatial–temporal framework of the Gangdese orogenic belt and its evolution [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 521–533 (in Chinese with English abstract).
- Pan Guitang, Wang Liquan, Li Rongshe, Li Rongshe, Yuan Shihua, Ji Wenhua, Yin Fuguang, Zhang Wanping, Wang Baodi. 2012. Tectonic evolution of the Qinghai–Tibet plateau [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 53: 3–14.
- Pan Guitang, Wang Liquan, Geng Quanru, Yin Fuguang, Wang Baodi, Wang Dongbing, Peng Zhimin, Ren Fei. 2020. Space–time structure of the Bangonghu–Shuanghu–Nujiang–Changning–Menglian Mega–suture zone: A discussion on geology and evolution of the Tethys Ocean [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 40(3): 1–19 (in Chinese with English abstract).
- Pan Guitang, Wang Liquan, Li Xingzhen, Wang Jiemin, Xu Qiang. 2001. The tectonic framework and spatial allocation of the archipelagic arc–basin systems on the Qinghai–Xizang Plateau [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 21(3): 1–26 (in Chinese with English abstract).
- Panagiotis G. Asteris, Mohammadreza Koopialipoor, Danial J. Armaghani, Evgenios A. Kotsonis, Paulo B. Lourenço. 2021. Prediction of cement–based mortars compressive strength using machine learning techniques [J]. *Neural Computing and Applications*, 33: 13089–13121.
- Prasad A M, Iverson L R, Liaw A. 2006. Newer classification and regression tree techniques: Bagging and random forests for ecological prediction [J]. *Ecosystems*, 9(2): 181–199.
- Qin Yaozu, Wu Weicheng, Xie Lifeng, Ou Penghui, Huang Xiaolan. 2021. Application of machine learning based mineral prospectivity mapping in the Yuexi antimony orefield, Hunan Province [J]. *Journal of East China University of Technology (Natural Science)*, 44(1): 28–40 (in Chinese with English abstract).
- Sillitoe R H. 2010. Porphyry copper systems [J]. *Economic Geology*, 105: 3–41.
- Song S H. 2021. Random forest approach in modeling the flow stress of 304 stainless steel during deformation at 700° C–900° C [J]. *Materials*, 14(7): 1812.
- Song Shufang, He Ruysng. 2021. Importance measure index system based on random forest [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 43(2): 25–32 (in Chinese with English abstract).
- Song Yang, Tang Juxing, Qu Xiaoming, Wang Denghong, Xin Hongbo, Yang Chao, Lin Bin, Fan Shufang. 2014. Progress in the study of mineralization in the Bangongco–Nujiang metallogenic belt and some new recognition [J]. *Advances in Earth Science*, 29(7): 795–809 (in Chinese with English abstract).
- Tang Juxing, Duo Ji, Liu Hongfei, Lang Xinghai, Zhang Jinshu, Zheng Wenbao, Ying Lijuan. 2012. Mineralogical series of ore deposits in the east part of the Gangdise metallogenic belt [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 33(4): 393–410 (in Chinese with English abstract).
- Tang Juxing, Yang Huanhuan, Song Yang, Wang Liqiang, Liu Zhibo, Li Baolong, Lin Bin, Peng Bo, Wang Genhou, Zeng Qinggao, Wang Qin, Chen Wei, Wang Nan, Li Zhijun, Li Yubin, Li Yanbo, Li Haifeng, Lei Chuanyang. 2021. The copper polymetallic deposits and resource potential in the Tibet Plateau [J]. *China Geology*, 4: 1–16.
- Tang Juxing, Zhang Li, Li Zhijun, Chen Jianping, Huang Wei, Wang Qian. 2006. Porphyry copper deposit controlled by structural nose trap: Yulong porphyry copper deposit in eastern Tibet [J]. *Mineral Deposits*, 25(6): 652–662.
- Tang Yuan, Liu Yuping, Wang Peng, Tang Wenqing, Qin Yadong, Gong Xiaodong, Wang Dongbing, Wang Baodi. 2021. A new understanding of Demala Group complex in Chayu area, southeastern Qinghai–Tibet Plateau: Evidence from zircon U–Pb and mica ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating [J]. *China Geology*, 4: 77–94.
- Wan C H, Lee L H, Rajkumar R, Isa D. 2012. A hybrid text classification approach with low dependency on parameter by integrating K–nearest neighbor and support vector machine [J]. *Expert Systems with Applications*, 39(15): 11880–11888.
- Wang Liquan, Wang Baodi, Li Guangming, Wang Dongbing, Peng Zhimin. 2021. Major progresses of geological survey and research in East Tethys: An overview [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 41(2): 283–296 (in Chinese with English abstract).
- Wu Huoxing, Fu Bin, Gao Ren, Fan Tao, Zha Zhiqiang, Tong Jizhong, Chen Tiandi. 2020. Characteristics analysis and prospecting potential prediction of newly discovered ore bodies in the Jiujiang Chengmenshan copper deposit [J]. *Journal of East China Institute of Technology (Natural Science Edition)*, 43(2): 115–120.
- Xiang Jie, Chen Jianping, Xiao Keyan, Li Shi, Zhang Zhiping, Zhang Ye. 2019. 3D metallogenic prediction based on machine learning: A case study of the Lala copper deposit in Sichuan Province [J]. *Geological Bulletin of China*, 38(12): 2010–2021.
- Xiao Keyan, Lou Debo, Sun Li, Li Jingchao, Ye Tianzhu. 2013. Some progresses of mineral prediction theory and method in important mineral resource potential assessment of China [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 43(3): 1053–1082.

- Xu Zhiqin, Dilek Y, Cao Hui, Yang Jingsui, Robinson Paul, Ma Changqian, Li Huaqi, Jolivet Marc, Roger Franoise, Chen Xijie. 2015. Paleo-Tethyan evolution of Tibet as recorded in the East Cimmerides and West Cathaysides [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 105: 320–337.
- Xu Zhiqin, Yang Jinsui, Li Wenchang, Li Huaqi, Cai Zhihui, Yan Zhen, Ma Changqian. 2013. Paleo-tethys system and accretionary orogen in the Tibet plateau [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(6): 1847–1860 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jinsui, Xu Zhiqing, Li Tianfu, Li Huaqi, Li Zhaoli, Ren Yufeng, Xu Xiangzheng, Chen Songyong. 2007. Oceanic subduction-type eclogite in the Lhasa block, Tibet, China: Remains of the paleo-tethys ocean basin? [J]. *Geological Bulletin of China*, 26(10): 1277–1287 (in Chinese with English abstract).
- Yang Zhiming, Hou Zengqian, Chang Zhaoshan, Li Qiuyun, Liu Yunfei, Qu Huanchun, Sun Maoyu, Xu Bo. 2016. Cospacial Eocene and Miocene granitoids from the Jiru Cu deposit in Tibet: Petrogenesis and implications for the formation of collisional and postcollisional porphyry Cu systems in continental collision zones [J]. *Lithos*, 245(3): 243–257.
- Ye Tianzhu. 2013. Theoretical framework of methodology of deposit modeling and integrated geological information for mineral resource potential assessment [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 43(4): 1053–1072.
- Zadeh M H, Tangestani M H, Roldan F V, Yusta I. 2014. Spectral characteristics of minerals in alteration zones associated with porphyry copper deposits in the middle part of Kerman copper belt, SE Iran [J]. *Ore Geology Reviews*, 62(6): 191–198.
- Zeng Yuanchuan, Chen Jianlin, Xu Jifeng, Lei Ming, Xiong Qiuwei. 2017. Origin of Miocene Cu-bearing porphyries in the Zhunuo region of the southern Lhasa subterrane: Constraints from geochronology and geochemistry [J]. *Gondwana Research*, 41: 51–64.
- Zhang Shihong, Xiao Keyan. 2020. Random forest-based mineralization prediction of the Lala-type Cu deposit in the Huili area, Sichuan Province [J]. *Geology and Exploration*, 56(2): 239–252 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Shizhen, Qin Yadong, Li Yong, Li Fengqi, Gong Xiaodong. 2021. U–Pb dating for detrital zircons from the Jiejunazhuo Formation in Xuru Co area and its geological significances [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 41(1): 24–32.
- Zhang Ye, Li Mingchao, Han Shuai, Ren Qiubing, Zhu Yueqin. 2020. Machine learning methods application in gold mineralization prediction based on gold unit data [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 44(2): 183–191.
- Zhang Yujun, Zeng Chaoming, Chan Hui. 2003. The Methods for Extraction of alteration anomalies from the ETM+(TM) data and their application: Method selection and technological flow chart [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2: 44–50 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhenjie, Cheng Qiuming, Yang Jie, Wu Guopeng, Ge Yunzhao. 2021. Machine learning for mineral prospectivity: A case study of iron polymetallic mineral prospectivity in Southwestern Fujian [J]. *Earth Science Frontiers* 28(3): 281–215 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Jinxiang, Qin Kezhang, Li Guangming, Li Jinxiang, Xiao Bo, Chen Lei, Yang Yueheng, Li Chao, Liu Yongsheng. 2014. Collision-related genesis of the sharang porphyry molybdenum deposit, Tibet: Evidence from zircon U–Pb ages, Re–Os ages and Lu–Hf isotopes [J]. *Ore Geology Reviews*, 56: 312–326.
- Zhao Pengda. 2007. Quantitative mineral prediction and deep mineral exploration [J]. *Earth Science Frontiers*, 14(5): 1–10 (in Chinese With English Abstract).
- Zhao Xiliang, Gong Chen, He Jun, Peng Jianhua, Huang Shaochun, Yang Zhilong. 2013. Discovery of porphyry copper deposit and its significance of Dajiacuo in Cuoqin county, Tibet [J]. *Journal of East China Institute of Technology (Natural Science Edition)*, 36(6): 13–20 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Youye, Sun Xiang, Gao Sunbao, Gao Shunbao, Wu Song, Xu Jing, Jiang Junsheng, Chen Xin, Zhao Zhongying, Liu Yan. 2015. Metallogenesis and the minerogenetic series in the Gangdese polymetallic copper belt [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 103: 23–39.
- Zhou Qing, Jiang Yaohui, Zhao Peng, Liao Shiyong, Jin Guodong, Liu Zheng, Jia Ruya. 2012. SHRIMP U–Pb dating on hydrothermal zircons: Evidence for an Early Cretaceous epithermal event in the Middle Jurassic Dexing porphyry copper deposit, southeast China [J]. *Economic Geology*, 107: 1507–1514.
- Zhu Dicheng, Pan Guitang, Chung Shenlin, Liao Zhongli, Li Guangming. 2008. SHRIMP zircon age and geochemical constraints on the origin of lower Jurassic volcanic rocks from the Yeba formation, southern Gangdese, south Tibet [J]. *International Geology Review*, 50(5): 442–471.
- Zhu Yusheng, Xiao Keyan, Ma Yubo, Ding Jianhua. 2013. Review and status of mineralization belt study in China [J]. *Journal of Geology*, 37(3): 349–357.

附中文参考文献

- 蔡惠慧, 朱伟, 李孜轩, 刘园园, 李龙斌, 刘畅. 2019. 基于深度学习的钨钼找矿靶区预测方法研究 [J]. *地球信息科学学报*, 21(6): 928–936.
- 陈进, 毛先成, 刘占坤, 邓浩. 2020. 基于随机森林算法的大尹格庄金矿床三维成矿预测. *大地构造与成矿学* [J]. 44(2): 231–241.
- 成秋明. 2006. 非线性成矿预测理论: 多重分形奇异性—广义自相似

- 性-分形谱系模型与方法[J]. 地球科学, 31(3): 337-348.
- 代晶晶, 曲晓明, 辛洪波. 2010. 基于 ASTER 遥感数据的西藏多龙矿集区示矿信息的提取[J]. 地质通报, 9(5): 752-759.
- 方匡南, 吴见彬, 朱建平, 谢邦昌. 2011. 随机森林方法研究综述[J]. 统计与信息论坛, 26(3): 32-38.
- 高顺宝. 2015. 西藏冈底斯西段铜铁多金属成矿作用与找矿方向[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 1-120.
- 耿全如, 李文昌, 王立全, 曾祥婷, 彭智敏, 张向飞, 张璋, 丛峰, 关俊雷. 2021. 特提斯中西段古生代洋陆格局与构造演化[J]. 沉积与特提斯地质, 41(2): 297-315.
- 韩善楚, 姜委, 潘家永, 万弘, 黄天宇. 2021. 西藏冈底斯成矿带跃进沟铜矿床同位素地球化学特征研究[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 44(5): 423-432.
- 黄发明, 叶舟, 姚池, 李远耀, 殷坤龙, 黄劲松, 姜清辉. 2020. 滑坡易发性预测不确定性: 环境因子不同属性区间划分和不同数据驱动模型的影响[J]. 地球科学, 45(12): 4535-4549.
- 黄瀚霄, 李光明, 刘洪, 张洪铭, 张林奎, 余槐, 焦彦杰, 陈小平, 梁维. 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): 50-65.
- 黄瀚霄, 李光明, 刘洪, 张洪铭, 张林奎, 余槐, 焦彦杰, 梁维. 2018. 冈底斯成矿带西段首次发现低硫化型浅成低温热液型矿床——罗布真金银多金属矿床[J]. 中国地质, 45(3): 628-629.
- 黄瀚霄, 张林奎, 刘洪, 李光明, 黄勇, 兰双双, 吕梦鸿. 2019. 西藏冈底斯成矿带西段矿床类型、成矿作用和找矿方向[J]. 地球科学, 44(6): 1876-1887.
- 黄永高, 韩飞, 李应棚, 贾小川, 杨学俊, 李光明, 杨青松. 2020. 西藏南木林盆地发现早侏罗世火山作用——来自锆石 U-Pb 年龄的证据[J]. 中国地质, 47(4): 1266-1267.
- 郎兴海, 郭文铂, 王旭辉, 邓煜霖, 杨宗耀, 谢富伟, 李壮, 张忠, 姜楷. 2019. 西藏雄村矿集区含矿斑岩成因及构造意义: 来自年代学及地球化学的约束[J]. 岩石学报, 35(7): 2105-2123.
- 李苍柏, 肖克炎, 李楠, 宋相龙, 张帅, 王凯, 楚文楷, 曹瑞. 2020. 支持向量机、随机森林和人工神经网络机器学习算法在地球化学异常信息提取中的对比研究[J]. 地球学报, 41(2): 309-319.
- 李光明, 潘桂棠, 王高明, 黄志英, 高大发. 2004. 西藏冈底斯成矿带矿产资源远景评价与展望[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 31(1): 22-27.
- 李光明, 张林奎, 张志, 夏祥标, 梁维, 侯春秋. 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.
- 李金祥, 秦克章, 李光明, 林金灯, 肖波, 江化寨, 韩逢杰, 黄树峰, 陈雷, 赵俊兴. 2001. 冈底斯东段堆堆铜钼矿床年代学、矽卡岩石榴石成分及其意义[J]. 地质与勘探, 47(1): 11-19.
- 李靖辉. 2008. 大别山(北麓)斑岩型钼矿床成矿系列及成矿规律[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 31(1): 25-30.
- 刘洪, 黄瀚霄, 李光明, 肖万峰, 张智林, 刘波, 马东方, 董磊, 马东. 2015. 因子分析在藏北商旭金矿床地球化学勘查中的应用[J]. 中国地质, 42(4): 1126-1136.
- 刘洪, 黄瀚霄, 欧阳渊, 张景华, 张腾蛟, 李富, 肖启亮, 曾建, 侯谦, 文登奎, 段声义. 2020a. 基于地质建造的土壤地质调查及应用前景分析——以大凉山区西昌市为例[J]. 沉积与特提斯地质, 40(1): 91-105.
- 刘洪, 黄瀚霄, 张林奎, 李光明, 欧阳渊, 黄勇, 吕梦鸿, 兰双双. 2021a. 冈底斯西段打加错地区鲁尔玛晚三叠世斑岩型铜(金)矿点的地质特征及发现意义[J]. 沉积与特提斯地质, 41(6): 569-581.
- 刘洪, 李光明, 黄瀚霄, 张林奎, 吕梦鸿, 兰双双, 解惠. 2019a. 西藏冈底斯成矿带发现晚三叠世斑岩型铜矿[J]. 中国地质, 46(5): 1238-1240.
- 刘洪, 李光明, 李文昌, 黄瀚霄, 李佑国, 欧阳渊, 张向飞, 周清. 2022. 西藏中拉萨地块北部早白垩世晚期控错 A 型花岗岩的成因及构造环境研究[J]. 岩石学报, 38(1): 230-252.
- 刘洪, 李光明, 李文昌, 张景华, 李佑国, 张智林, 黄瀚霄, 欧阳渊, 张腾蛟. 2021b. 西藏仲巴县布东拉金矿床的浅成低温热液成矿作用: 来自流体包裹体和 H-O 同位素的证据[J]. 矿床地质, 40(2): 311-328.
- 刘洪, 李光明, 张智林, 黄瀚霄, 肖万峰. 2014b. 西藏改则县木如地区岩屑地球化学分析[J]. 金属矿山, 43(11): 105-108.
- 刘洪, 吕新彪, 李春诚, 刘阁, 尚世超, 王林, 张伟, 毛荣威. 2013. 河南罗山金城金矿床成矿条件与深部找矿前景分析[J]. 地质与勘探, 49(2): 265-273.
- 刘洪, 吕新彪, 袁迁, 柯长书, 朱乔乔, 柳潇, 王玉奇, 张善明. 2014a. 河南信阳高梁店铁铜矿床姜子湾矿段地质特征与找矿方向[J]. 矿物学报, 34(3): 337-342.
- 刘洪, 夏祥标, 黄瀚霄, 张林奎, 兰双双, 吕梦鸿, 艾金彪, 解惠. 2019b. 西藏冈底斯成矿带西段学修玛尔幅水系沉积物地球化学统计分析找矿前景[J]. 桂林理工大学学报(自然科学版), 39(4): 847-855.
- 刘洪, 张晖, 李光明, 黄瀚霄, 肖万峰, 游钦, 马东方, 张海. 2016. 藏北羌塘南缘早白垩世青草山强过铝质 S 型花岗岩的成因: 地球化学和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学的约束[J]. 北京大学学报(自然科学版), 52(5): 848-860.
- 刘洪, 张林奎, 黄瀚霄, 李光明, 余槐, 黄勇, 梁维, 闫国强, 张洪铭, 陈小平. 2020b. 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): 50-65.
- 刘洪, 张林奎, 黄瀚霄, 李光明, 吕梦鸿, 闫国强, 黄勇, 兰双双, 解惠. 2019c. 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): 1935-1956.
- 刘洪, 张林奎, 黄瀚霄, 李光明, 欧阳渊, 吕梦鸿, 刘函, 兰双双, 闫国强. 2019d. 西藏冈底斯西段鲁尔玛晚三叠世二长闪长岩的成因[J]. 地球科学, 44(7): 2339-2352.
- 刘卫东, 唐志鹏, 夏炎, 韩梦瑶, 姜宛贝. 2019. 中国碳强度关键影响因素的机器学习识别及其演进[J]. 地理学报, 74(12): 2592-2603.

- 倪培, 迟哲, 潘君屹. 2020. 斑岩型和浅成低温热液型矿床成矿流体与找矿预测研究: 以华南若干典型矿床为例[J]. 地学前缘, 27(2): 60-78.
- 欧阳渊, 刘洪, 黄瀚霄, 李光明, 杨武年, 肖万峰, 张智林, 马成义, 马步英. 2016. 藏北商旭-达则地区水系沉积物地球化学多元统计分析与找矿方向[J]. 矿物学报, 36(4): 586-594.
- 欧阳渊. 2020. 西藏冈底斯成矿带西段斑岩型铜矿成矿规律与成矿预测研究[D]. 成都: 成都理工大学, 1-110.
- 潘桂棠, 莫宣学, 侯增谦, 朱弟成, 王立全, 李光明, 赵志丹, 耿全如, 廖忠礼. 2006. 冈底斯造山带的时空结构及演化[J]. 岩石学报, 22(3): 521-533.
- 潘桂棠, 王立全, 耿全如, 尹福光, 王保弟, 王冬兵, 彭智敏, 任飞. 2020. 班公湖—双湖—怒江—昌宁—孟连对接带时空结构——特提斯大洋地质及演化问题[J]. 沉积与特提斯地质, 40(3): 1-19.
- 潘桂棠, 王立全, 李兴振, 王洁民, 徐强. 2001. 青藏高原区域构造格局及其多岛弧盆系的空间配置[J]. 沉积与特提斯地质, 21(3): 1-26.
- 秦耀祖, 吴伟成, 谢丽凤, 欧鹏辉, 黄小岚. 2021. 基于机器学习的找矿预测模型在湖南岳溪锑矿田的应用[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 44(1): 28-40.
- 宋述芳, 何入洋. 2021. 基于随机森林的重要性测度指标体系[J]. 国防科技大学学报, 43(2): 25-32.
- 宋扬, 唐菊兴, 曲晓明, 王登红, 辛洪波, 杨超, 林彬, 范淑芳. 2014. 西藏班公湖—怒江成矿带研究进展及一些新认识[J]. 地球科学进展, 29(7): 795-809.
- 唐菊兴, 多吉, 刘鸿飞, 郎兴海, 张金树, 郑文宝, 应立娟. 2012. 冈底斯成矿带东段矿床成矿系列及找矿突破的关键问题研究[J]. 地球学报, 33(4): 393-410.
- 唐菊兴, 张丽, 李志军, 陈建平, 黄炜, 王强. 2006. 西藏玉龙铜矿床——鼻状构造圈闭控制的特大型矿床[J]. 矿床地质, 25(6): 652-662.
- 王立全, 王保弟, 李光明, 王冬兵, 彭智敏. 2021. 东特提斯地质调查研究进展综述[J]. 沉积与特提斯地质, 41(2): 283-296.
- 吴火星, 付斌, 高任, 樊涛, 查志强, 童继中, 陈天迪. 2020. 九江城门山铜矿新发现矿体特征分析及找矿潜力预测[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 43(2): 115-120.
- 向杰, 陈建平, 肖克炎, 李诗, 张志平, 张焯. 2019. 基于机器学习的三维矿产定量预测——以四川拉拉铜矿为例[J]. 地质通报, 38(12): 2010-2021.
- 肖克炎, 娄德波, 孙莉, 李景朝, 叶天竺. 2013. 全国重要矿产资源潜力评价一些基本预测理论方法的进展[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 43(4): 1073-1082.
- 许志琴, 杨经绥, 李文昌, 李化启, 蔡志慧, 闫臻, 马昌前. 2013. 青藏高原中的古特提斯体制与增生造山作用[J]. 岩石学报, 29(6): 1847-1860.
- 杨经绥, 许志琴, 李天福, 李化启, 李兆丽, 任玉峰, 徐向珍, 陈松永. 2007. 青藏高原拉萨地块中的大洋俯冲型榴辉岩: 古特提斯洋盆的残留? [J]. 地质通报, 26(10): 1277-1287.
- 叶天竺. 2013. 矿床模型综合地质信息预测技术方法理论框架[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 43(4): 1053-1072.
- 张士红, 肖克炎. 2020. 基于随机森林的四川省会理地区“拉拉式”铜矿成矿预测[J]. 地质与勘探, 56(2): 239-252.
- 张士贞, 秦雅东, 李勇, 李奋其, 巩小栋. 2021. 西藏许如错地区洁居纳卓组碎屑锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 沉积与特提斯地质, 41(1): 24-32.
- 张野, 李明超, 韩帅, 任秋兵, 朱月琴. 2020. 基于金矿规格单元数据的机器学习方法在成矿建模分析中的应用[J]. 大地构造与成矿学, 44(2): 183-191.
- 张玉君, 曾朝铭, 陈薇. 2003. ETM+(TM)蚀变遥感异常提取方法研究与应用—方法选择和技术流程[J]. 国土资源遥感, 2: 44-50.
- 张振杰, 成秋明, 杨玠, 武国朋, 葛云钊. 2021. 机器学习与成矿预测: 以闽西南铁多金属矿预测为例[J]. 地学前缘, 28(3): 281-215.
- 赵鹏大. 2007. 成矿定量预测与深部找矿[J]. 地学前缘, 14(5): 1-10.
- 赵希良, 龚臣, 何俊, 彭建华, 黄韶春, 杨志龙. 2013. 西藏措勤县打加错地区斑岩型铜矿点发现及其意义[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 36(6): 13-20.
- 朱裕生, 肖克炎, 马玉波, 丁建华. 2013. 中国成矿区带划分的历史与现状[J]. 地质学刊, 37(3): 349-357.