

贵州务一正一道地区铝土矿成矿模式与找矿模型

金中国¹, 邹林², 张力³, 郑明泓¹, 韩英², 谷静⁴, 谢樨¹, 陈兴龙¹, 王洪¹

1. 贵州省有色金属和核工业地质勘查局, 贵阳 550005
2. 有色金属矿产地质调查中心, 北京 100012
3. 中国有色桂林矿产地质研究院有限公司, 桂林 541004
4. 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002

摘要 务一正一道铝土矿成矿区位于黔北—渝南接壤地带, 现已发现大型铝土矿床 10 余个, 探明资源储量超 7 亿吨, 是贵州重要的铝矿资源地。铝土矿产于下志留统韩家店组碎屑岩或上石炭统黄龙组碳酸盐岩古侵蚀面之上的下二叠统大竹园组中, 属古风化沉积型铝土矿床。基于前人成矿物质来源、成矿环境、成矿作用及矿床成因类型的研究成果, 进一步探讨了区域构造演化与铝土矿形成的关系, 结合典型矿床成矿地质特征, 揭示了研究区铝土矿成矿的地质—地球化学演化过程。依据 1:10 万~1:1 万遥感影像特征的提取, 总结了含矿岩系及相邻层位、主要构造的识别标志, 论述了铁化、泥化异常与含矿岩系的空间展布关系, 刻画出了大比例尺度的遥感三维立体影像模型。通过多个铝土矿区浅层地震反射波法、高密度电阻率法、频率域三极测深法、音频大地电磁测深法、大功率激电测深法等物探方法的应用和对比研究, 反演出“高、厚、凹、拐”物探异常找矿标志, 建立了典型铝土矿床三维地质—地球物理找矿预测模型。在上述基础上, 集成了铝土矿勘查技术方法体系, 建立了地质、物探、化探、遥感综合找矿模型, 示范指导找矿预测, 经工程验证, 取得显著的找矿效果, 表明建立的找矿模型在该研究区探寻铝土矿适宜、有效。

关键词 铝土矿; 勘查技术集成; 成矿模式; 找矿模型; 贵州务一正一道地区

第一作者简介 金中国, 男, 1965 年出生, 博士, 研究员, 地质找矿与成矿预测, E-mail: gzkyjzg@sina.com

中图分类号 P618.45 P622⁺.6 **文献标志码** A

0 引言

务(川)一正(安)一道(真)铝土矿区属渝南—黔北铝成矿带^[1]之务一正一道铝成矿亚带^[2], 近 10 年来相继探明了务川瓦厂坪、大竹园、道真新民等大型矿床, 探获资源量储量超 7 亿吨, 找矿取得重大突破。同期, 众多专家学者开展了该区铝土矿成矿地质背景、沉积成矿环境、成矿规律和主要控矿因素研究^[2-13], 揭示了物质来源、成矿作用和过程^[14-22], 评价了有益伴生元素的赋存状态(含渝南地区)^[23-27], 从不同认识和研究角度建立了成矿模式^[7-8, 14], 形成了大量的理论研究成果, 丰富和发展了沉积型铝土矿的成矿理论。但这些成果缺乏对地—物—化—遥勘查技术方法体系的集成, 成矿模式和找矿模型的有机结合及指导进一步找矿预测比较薄弱。本文重点介绍综合勘查技术方法在该区有效性和适宜性, 通过优选靶区实施工程验证, 发现和探明了多个大中型铝土矿床, 找矿取得了新的突破, 示范和指导作用显著, 在此基础上优化了成矿模式, 建立了找矿预测模型, 以期

对本区及相邻区找矿预测提供指导和参考作用。

1 区域地质背景与典型矿床特征

1.1 区域地质背景

务一正一道铝土矿集区位于贵州北部与重庆接壤地带, 出露寒武系至侏罗系地层, 其中, 中志留统—下石炭统缺失。寒武系、奥陶系分布于各复背斜轴部和近轴部, 为海相、海陆交互相沉积的碳酸盐岩和碎屑岩; 下志留统韩家店组(S_1hj)最发育, 为一套潮坪相沉积的页岩、粉砂岩夹灰岩, 常形成褶皱闭合构造; 上石炭统黄龙组(C_2h)灰岩及侏罗系(J)紫红色陆源碎屑砂岩零星分布; 二叠系分布于向斜两翼, 其中下二叠统大竹园组(P_1d)为铝土矿含矿层位; 三叠系大面积分布于各向斜轴部, 岩性为海相碳酸盐岩(中下统)和陆相碎屑岩(上统)。构造主体格架呈 NE 和 NNE 向展布, 褶皱发育, 常以复式背、向斜形式出现, 为典型的“侏罗山”式褶皱。断裂构造以逆冲断层为主, 多形成于背斜轴部和向斜两翼, 总体呈多字格状排列。研究区未见岩浆岩出露(图 1)^[2]。

收稿日期: 2017-04-06; 收修改稿日期: 2017-11-08

基金项目: 国家“十二五”科技支撑重点项目(2011BAB04B04); 贵州省基础性、公益性研究地质项目(2010-120); 中央地质勘查基金项目(2011520026, 2011520027, 2012520001) [Foundation: National “12 th five-year-plan” Science and Technology Major Project, No. 2011BAB04B04; Public and Basic Research Geology Subject of Guizhou Province, No.2010-120; Central Geological Exploration Fund Project, No.2011520026, 2011520027, 2012520001]

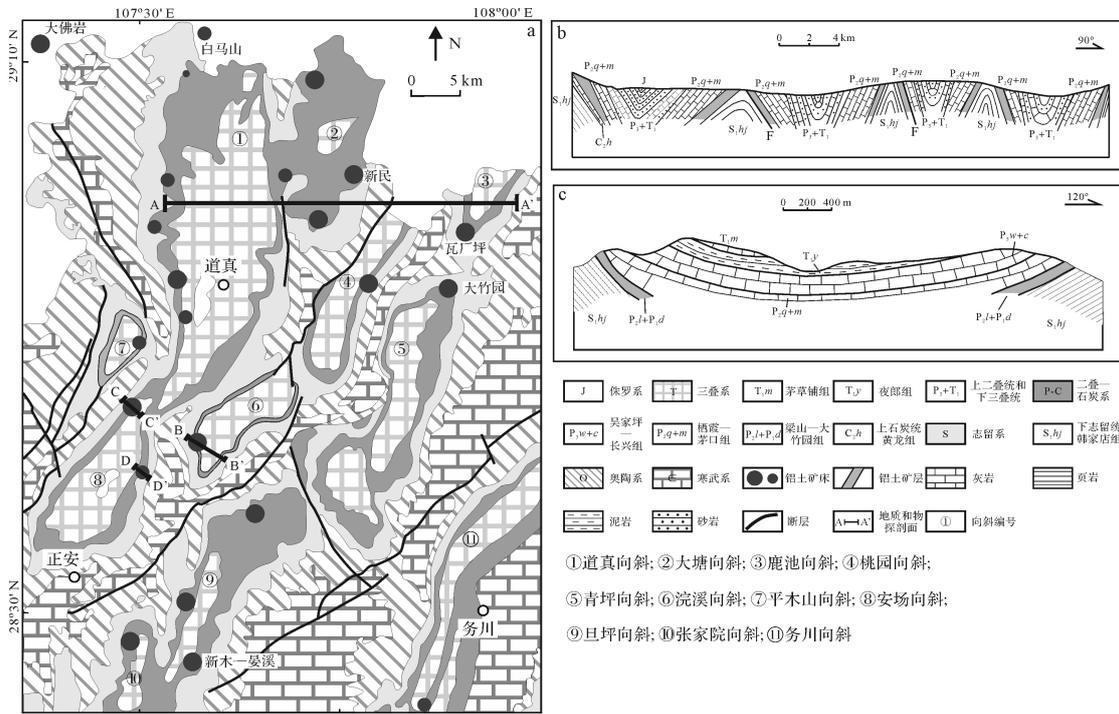


图 1 黔北务一正一道铝土矿集区地质略图

Fig.1 Sketch geological map of the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen Al metallogenic district , in north Guizhou

1.2 区域构造演化与铝土矿成矿

研究区经历了武陵—喜马拉雅等多期次构造运动。武陵运动使区域新元古代地层褶皱上升为陆,遭受风化剥蚀,为早古生代地层形成提供了丰富物源;雪峰期 Rodinia 裂解形成的南华裂谷继续发展,震旦纪至中志留世接受了巨厚的海相沉积;晚志留世的广西运动强烈升降作用形成一系列褶皱、断层及黔中—黔北古陆,泥盆纪—早石炭世为剥蚀夷平期(409~290 Ma),形成巨厚的风化物;晚石炭世—中二叠世出现了两次明显的海侵事件,其中最大的海侵出现在达拉期末至小独山期,沉积了黄龙组灰岩^[5]。大竹园期地层差异升降运动显著,形成湖盆、滨海沼泽或相对封闭的海湾环境,为区内铝土矿形成提供了富集的场所^[2];印支期本区及周边发生大规模碰撞造山事件,形成强烈的推覆构造和侏罗山式褶皱;燕山运动加剧震旦系—白垩系地层褶皱变形及断裂形成,古特提斯洋关闭;喜马拉雅及新构造运动主要发生构造叠加,加速含矿岩系在隆起背斜区风化剥蚀和在低洼向斜区的次生淋滤改造、铝土矿的富集,形成保留至今的构造形态和铝土矿分布区域。

2 典型矿床特征

本区铝土矿均产于下二叠统大竹园组含矿岩系

中,呈层状、似层状产出,产状与围岩一致(图 2、3)。含矿岩系与上覆和下伏地层呈假整合接触,矿系厚约 0~16 m,一般 5~8 m。黄龙组在区内断续分布,也与上覆及下伏地层呈假整合接触。铝土矿矿石矿物主要为一水硬铝石,次为一水软铝石、胶铝石等;黏土矿物有高岭石、蒙脱石、绿泥石和伊利石等;重矿物有锆石、金红石、锐钛矿等;铁矿物有黄铁矿、赤铁矿、纤铁矿、磁铁矿等;碳酸盐岩及硅酸盐矿物有石英、长石、方解石、白云石、角闪石等。铝土矿具有粒屑泥晶、泥晶—微晶、复粒屑、重结晶结构以及土状、半土状、碎屑状、豆状、鲕状和致密块状构造特征^[2,8,10]。本区已发现铝土矿矿床(点)20 余处,工作程度高、具有代表性的有瓦厂坪、新民、新木—晏溪和大竹园等大型矿床,鉴于各矿区出露地层、含矿层位、矿石矿物组成及结构构造等均相同或相似,限于篇幅,本文重点简述 4 个矿床的构造、矿体产出形态及矿石品位特征。

2.1 瓦厂坪矿床

瓦厂坪矿床位于研究区东北部的鹿池向斜南西扬起端,鹿池向斜为主要的褶皱构造,断层不发育,仅见规模较小断层。矿区勘探圈定 1 个矿体,地表矿体沿向斜南西扬起端露头线呈“U”字型展布,产状与围岩一致(图 2A、图 3A),东西两翼矿体地表长均大于

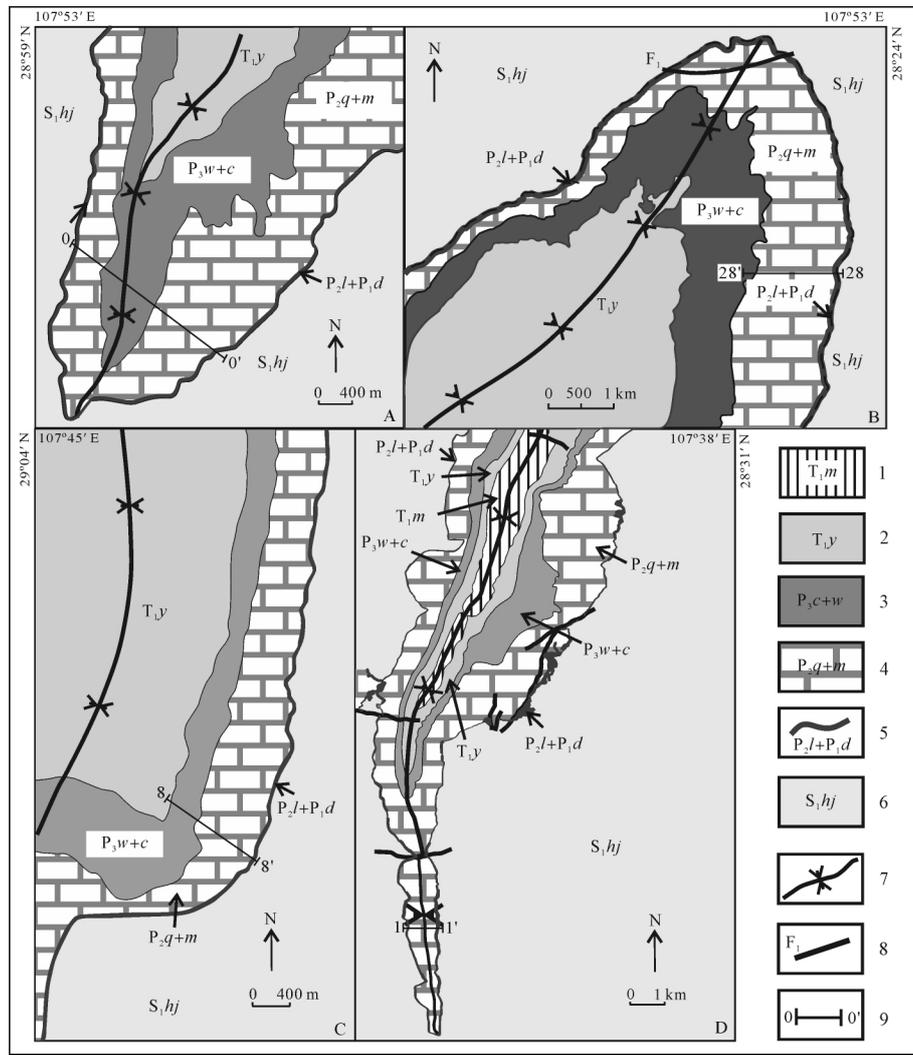


图2 务一正一道地区典型铝土矿床地质略图(A.瓦厂坪; B.大竹园; C.新民; D.新木—晏溪)

1.下三叠统茅草铺组; 2.下三叠统夜郎组; 3.上二叠统长兴组—吴家坪组; 4.中二叠统栖霞组—茅口组; 5.中二叠统梁山组—下二叠统大竹园组; 6.下志留统韩家店组; 7.铝土矿露头线; 8.向斜轴; 9.断层; 10.勘查剖面

Fig.2 Ore deposit geological map of the typical bauxite deposits in Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area , (A.Wachangping; B.Dazhuyuan; C. Xinmin; D.Xinmu-Yanxi)

4 km ,最大延伸 1.8 km ,平均厚 2.17 m ,矿石平均含量 Al_2O_3 63.05% SiO_2 10.33% ,铝硅比 (A/S) 6.1 ,圈定铝土矿资源储量 3 890 万吨 ,大型矿床^[2]。

2.2 大竹园矿床

矿床位于研究区北东部的青坪向斜北段扬起端 ,青坪向斜总体为一个东缓西陡、断层不发育的构造。矿区勘探圈定 1 个铝土矿体 ,地表矿体沿向斜扬起端东西两翼呈倒“U”字型展布(图 2B、图 3B) ,走向长大于 5 km ,延伸 200~1 350 m。矿体平均厚 1.97 m ,矿石平均含量 Al_2O_3 63.99% SiO_2 10.21% ,铝硅比(A/

S) 6.2 ,圈定铝土矿资源储量 8 431 万吨(含南段及青坪矿区详查资源量) ,大型矿床^①。

2.3 新民矿床

新民大型矿床位于研究区北部的大塘向斜南东端 ,矿区总体上为倾向北西的单斜构造(图 2C) ,地表断层不发育 ,深部见成矿期后的层间小断层错动矿层。详查圈定 5 个矿体 ,主矿体地表走向长约 6 km ,倾向延伸 0.8~2 km ,产状与围岩一致(图 3C) 。矿体平均厚 2.25 m ,矿石平均含量 Al_2O_3 64.58% , SiO_2 13.04% ,A/S 8.3 ,探获铝土矿资源量 3240 万吨 ,大

① 贵州省地质矿产勘查开发局 ,贵州省有色金属和核工业地质勘查局. 贵州省务正道地区铝土矿整装勘查报告[R]. 2013: 1-170.

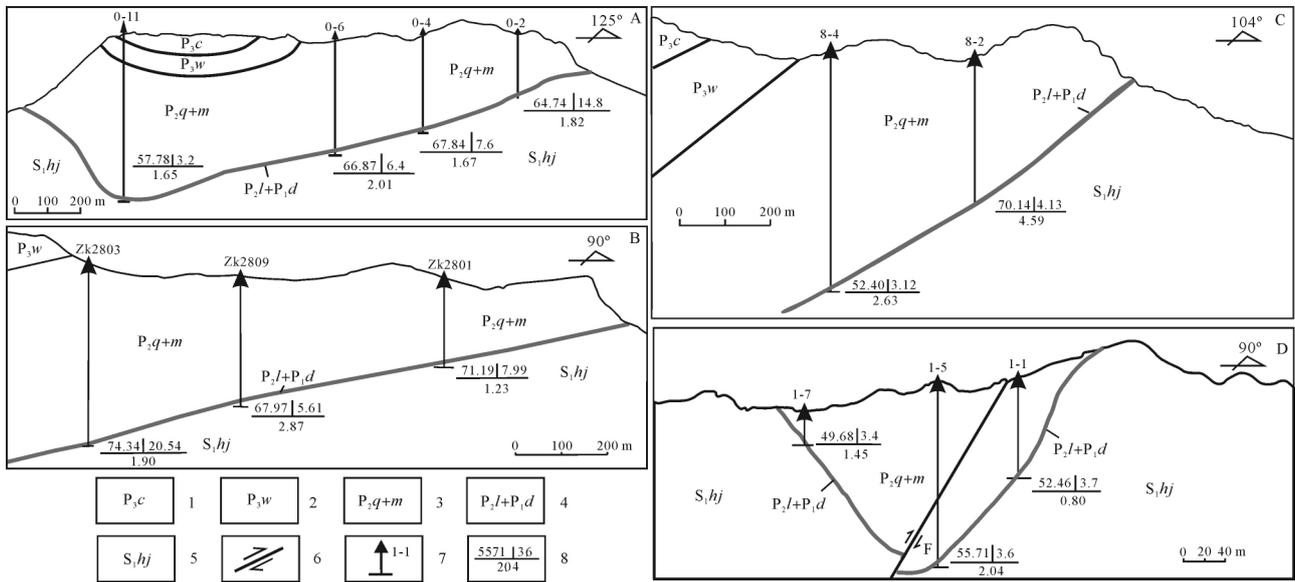


图 3 务一正一道地区典型铝土矿床剖面图

A.瓦厂坪; B.大竹园; C.新民; D.新木—晏溪。1.上二叠统长兴组; 2.上二叠统吴家坪组; 3.中二叠统栖霞组—茅口组; 4.中二叠统梁山组一下二叠统大竹园组; 5.下志留统韩家店组; 6.断层; 7.钻孔及编号; 8. $\frac{Al_2O_3 \text{ 含量} | \text{ 硅铝比}}{\text{矿体厚度} (m)}$

Fig.3 Ore deposit profile map of the typical bauxite deposits in Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area ,
A.Wachangping; B.Dazhuyuan; C. Xinmin; D.Xinmu-Yanxi

型矿床^[2]。

2.4 新木—晏溪矿床

新木—晏溪矿床位于研究区南部的旦坪向斜中南段,在向斜中地层及矿体成南陡北缓产出,构造较简单,中段东翼小断层发育(图 2D、图 3D)。自北向南 3 个矿段组成,含矿露头线单翼长约 17 km,矿段之间相距约 3 km,主矿体长 1~2.5 km,倾向延伸约 1 km,平均厚 1.81 m,矿石平均含量 Al_2O_3 56%, SiO_2 10.30%, A/S 5.5,圈定铝土矿资源量 2 812 万吨,大型矿床^[2]。

3 成矿模式

3.1 成矿物质来源

已有众多学者^[8,10,15-19,21-22]从碎屑锆石年代学,微量元素组成,稀土配分模式,Al、Ti、Hf、Zr、Th、Nb、Cr、Ta 等稳定元素的比值特征研究认为,务一正一道地区铝土矿成矿直接物源(近源)为下伏志留系韩家店组砂页岩和黄龙组灰岩,间接物源(远源)与区域含火山碎屑的基底层位密切相关。

3.2 成矿环境与成因

务一正一道地区产于下志留统韩家店组碎屑岩或上石炭统黄龙组碳酸盐岩侵蚀面之上的铝土矿,严格受大竹园组控制,矿体呈层状或似层状产于含矿岩系的中上部,沉积环境以陆相沉积为主,在含矿岩系底部有海相、海陆过渡相沉积^{①[2,8,11-13]};古气候为古赤道附近气候炎热、潮湿多雨的亚热—热带环境^[2,8];古地貌为南有黔北古陆,北有武隆孤岛,南高北低的河湖盆地;沉积成矿时代为早二叠世大竹园期,矿床成因属古风化壳沉积型^[5-9]。

3.3 成矿作用与成矿模式

主要的成矿母岩层位韩家店组和黄龙组在炎热、潮湿多雨的亚热—热带气候环境,经历超过 1 亿年的风化剥蚀期,形成分布广、厚度大的风化残积物或坡积物,经物理、化学风化作用、生物作用和氧化淋滤作用,相对活泼的碱金属、碱土金属流失,部分 SiO_2 在氧化、酸性介质环境溶解成 $Si(OH)_4$ 流失^[28],惰性的 Al、Ti、Zr 等元素残留原地或近距离搬运,发生初步脱硅、富铝作用,形成以高岭石为主的黏土矿物^[2,8,21];

① 贵州省有色金属和核工业地质勘查局,有色金属矿产地质调查中心,中国有色桂林矿产地质研究院有限公司,等.贵州省务正道地区铝土矿勘查技术集成与示范研究报告[R]. 2015: 1-318.

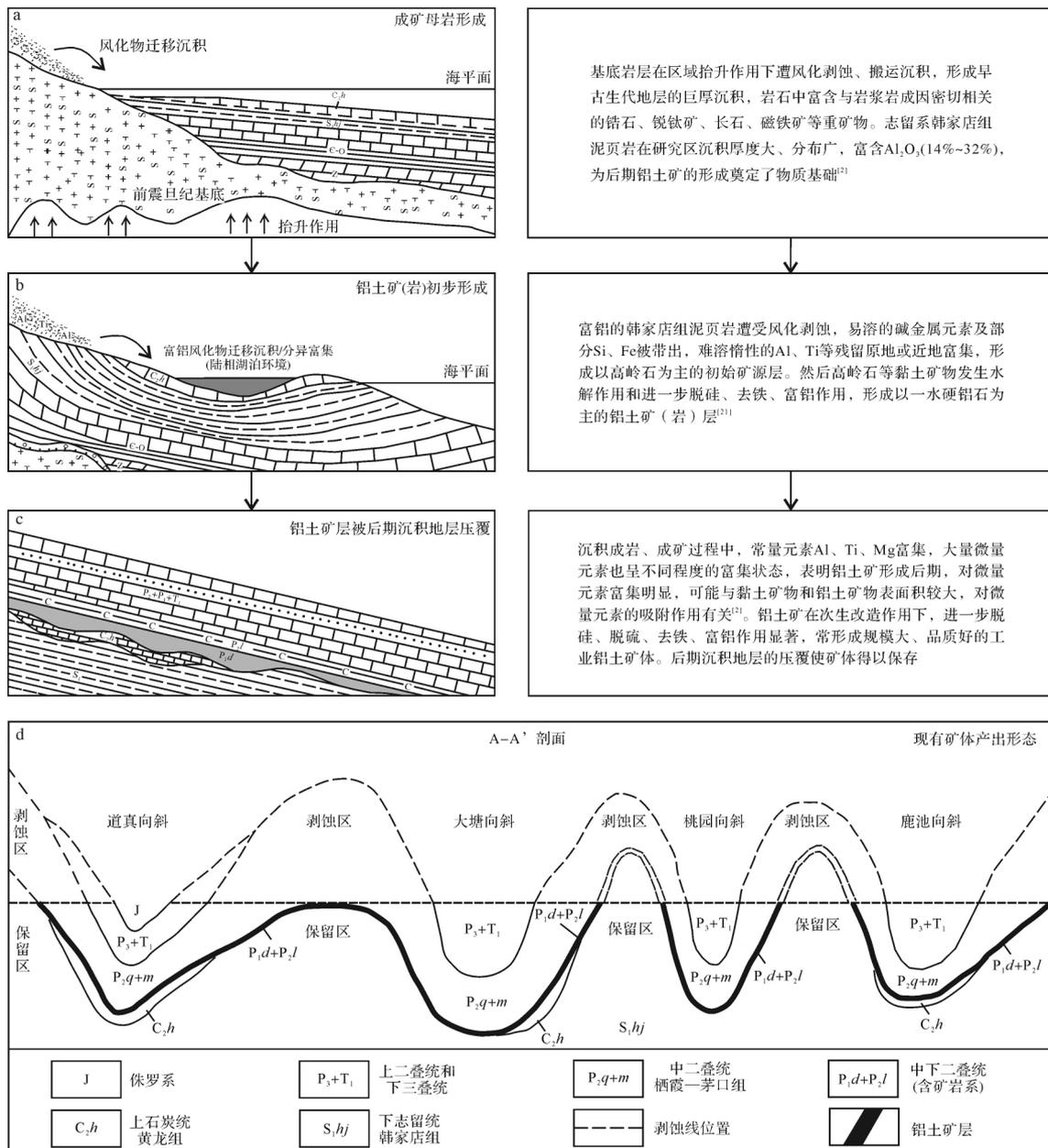


图 4 务一正一道地区铝土矿地质—地球化学成矿模式图

Fig.4 Bauxite metallogenetic model map of geology and geochemistry in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area

富铝风化物经地表水冲刷、径流作用或海侵作用, 迁移、搬运至低洼的河湖盆地或海湾环境沉积、分异, 进一步脱硅、去铁、富铝, 形成以一水硬铝石为主的铝土岩或铝土矿层; 之后在燕山—喜马拉雅及新构造运动的构造作用影响下, 导致隆起背斜区含矿岩系的风化剥蚀(图 4D), 部分向斜区含矿岩系抬升暴露地表或浅表, 遭受次生淋滤作用, 或因断层断距大、切割深, 能形成导水性较好的水文地质淋滤系统, 对含矿岩系进行不断的淋滤改造作用, 多形成质量较好的土状、碎屑状矿石; 反之因含矿岩系远离断层, 次生淋滤改

造弱, 多形成质量较差的致密块状矿石。务一正一道地区铝土矿形成经历了成矿母岩的风化剥蚀及淋滤作用→风化物的搬运迁移作用→搬运物的沉积分异作用→成岩成矿作用等演化过程^[21], 成矿模式如图 4 所示(图 4D 中 A-A' 与图 1 对应)。

4 综合找矿预测模型

4.1 地质找矿方法

(1) 通过 1:2.5 万~1:1 万比例尺地质填图, 结合遥感地质解译, 厘定区域及矿区构造变形样式,

查明含矿岩系及浅表构造的空间分布特征, 研究构造变形与古地形地貌变化、铝土矿次生淋滤作用及保存环境关系^①; 通过轻型山地工程控制, 圈定各向斜含矿岩系在走向上的含矿性和矿体的产出形态, 重点圈出含矿岩系厚度大、矿体(层) 产出连续、矿石质量好、后期断层构造简单的找矿靶区。

(2) 通过岩相剖面测量, 结合矿床地球化学研究, 揭示含矿岩系及相邻层位的古地理环境, 厘定区域构造演化、古地理环境与铝土矿成矿关系(图 5), 圈定有利的成矿地段。

4.2 地球物理勘查找矿方法

地球物理勘查技术在国内广泛应用于铝土矿深部隐伏矿定位预测^[29-33]。为了获得研究区不同产状、不同埋深、不同厚度含矿岩系的地球物理找矿信息, 优选出有效的找矿方法, 本次研究在 2 个典型矿区开展了高密度电阻率、浅层地震、音频大地电磁测深、大功率激电测深、频率域三极测深等方法, 对含矿层位及其顶板界面的空间赋存情况进行了异常响应特征探寻和由浅及深的立体解析, 建立了地质—地球物理找矿预测模型, 并示范应用于 3 个矿区的找矿预测工作, 经钻探验证, 取得了显著的找矿效果。

4.2.1 测定物性参数特征

通过 590 块岩石标本及 254 块矿石标本物性参数精细测定, 得知大竹园组岩石电阻率(ρ) 为 153 ~ 2 127 $\Omega \cdot m$, 平均 711 $\Omega \cdot m$ (图 6a); 极化率(η) 为 0.26% ~ 2.48%, 平均 1.00%, 为较典型的中低电阻率、中等极化率介质(图 6b), 与上覆和下伏层位物性差

异特征明显, 且含矿岩系顶部的炭质页岩是寻找铝土矿的典型地质和物性标志层, 具备开展物探电磁法的前提条件。务川瓦厂坪矿区浅层地震剖面试验显示(图 6c), 在双程时间 0~45 ms 范围, 波速为 1 200 m/s, 与第四系浮土(Q) 对应; 45 ~ 170 ms 的波速为 3 200 m/s, 与上覆 P_2q+m+P_3w+c 碳酸盐岩对应; 170 ~ 210 ms 的波速为 1 447 m/s, 与 P_1d+P_2l 对应; 大于 210 ms 的波速为 3 400 m/s, 与 S_1hj 对应, 具典型的 4 个地质层结构, 表明波速传递差异特征明显(图 6c)。

4.2.2 典型矿床地质—地球物理找矿预测模型建立

通过物性参数系统测定, 依据地质调查、岩相古地理及已实施钻孔资料成果, 研究含矿岩系及铝土矿体(层) 在走向、倾向产出特征, 结合大功率激电测深、音频大地电磁测深、高密度电阻率测深和频率域三极梯度测深剖面实施, 定位含矿岩系的空间产出形态及侵蚀面的起伏情况, 总结出“高(矿系高异常)、厚(推测矿系厚度大)、凹(矿系形态呈凹状产出)、拐(矿系薄厚、凸凹变化处)”为找矿有利地段, 建立了浣溪向斜隆兴矿床地质—地球物理模型图(图 7) 和三维地质—地球物理找矿预测模型图(图 8)。

4.2.3 示范应用成果——以安场向斜为例

根据成矿条件分析, 安场向斜具有寻找大型、超大型铝土矿床的潜力, 为定位含矿岩系空间展布特征, 在马鬃岭和东山矿区开展了音频大地电磁测深和大功率激电测深剖面测量(图 1C—C', D—D'), 反演结果如图 9 和图 10 所示。

马鬃岭矿区 1095(C—C') 剖面两种方法反演效

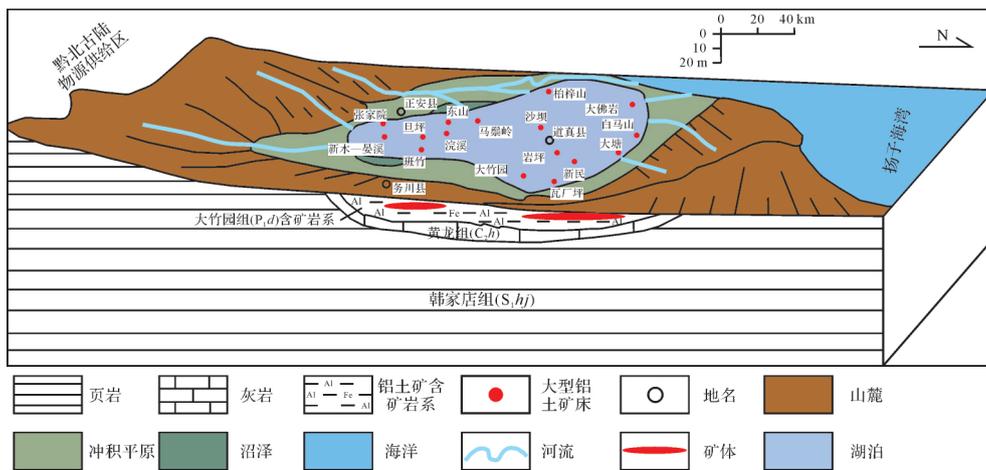


图 5 务一正一道地区铝土矿沉积环境图

Fig.5 Sedimentary environment map of bauxite in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area

① 贵州省有色金属和核工业地质勘查局, 有色金属矿产地质调查中心, 中国有色桂林矿产地质研究院有限公司, 等. 贵州省务正道地区铝土矿勘查技术集成与示范研究报告[R]. 2015: 1-318.

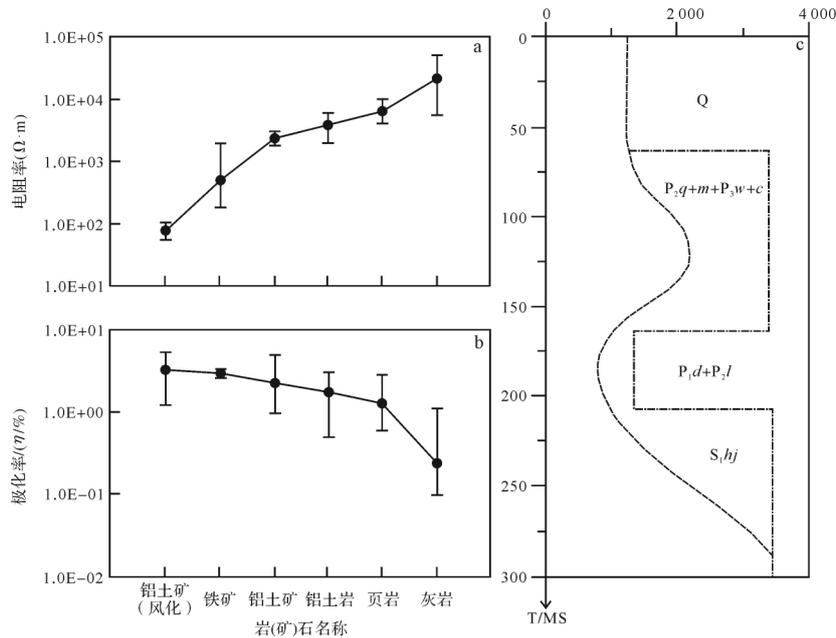


图 6 务一正一道铝土矿区岩(矿)石物性参数及浅层地震波速图

Fig.6 Physical parameters and shallow seismic wave velocity diagram of bauxite mining area rock (ore) in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area

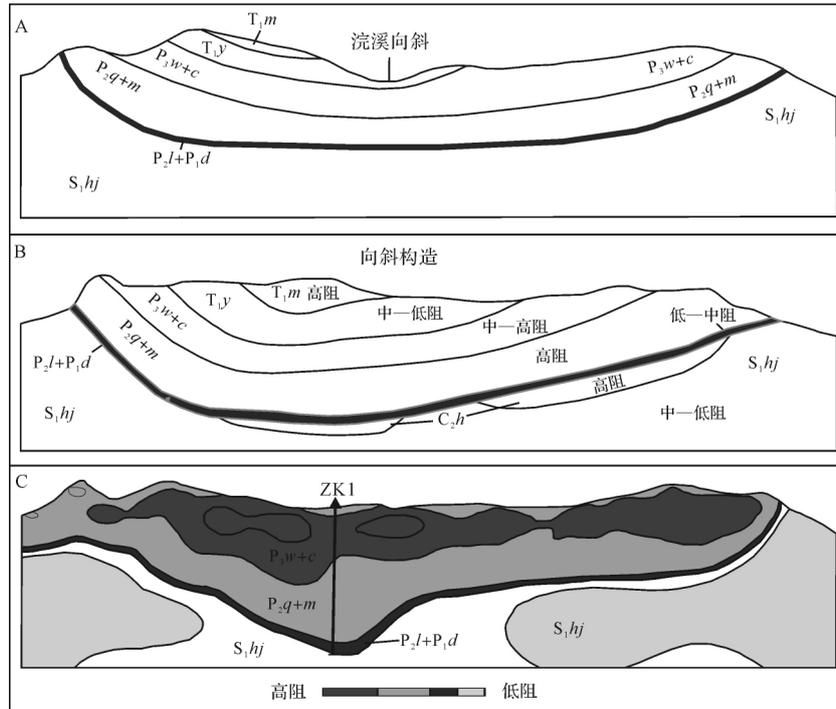


图 7 浣溪向斜地质—地球物理模型图(地层图例见图 2)

A.向斜示意地质剖面; B.物性剖面模型; C.反演电阻率剖面模型

Fig.7 Geological and geophysical model diagram of Huanxi synclinal (formation illustrations as shown in Fig.2)

A.constructed geology profile of synclinal; B.profile model of resistivity parameter; C. inversion resistivity profile model

果基本一致(图 9),异常“高、厚、凹、拐”特征明显,均能较好揭示深部 P_1d 的起伏变化情况,推测在 115~135 测点段的 400~450 m 深度可能存在较好的铝

土矿层(图 9a,b),且产状陡。2013 年实施 ZK1095-16 验证见矿埋深 380 m,矿体厚 1.65 m,矿石品位 Al_2O_3 54.55%。

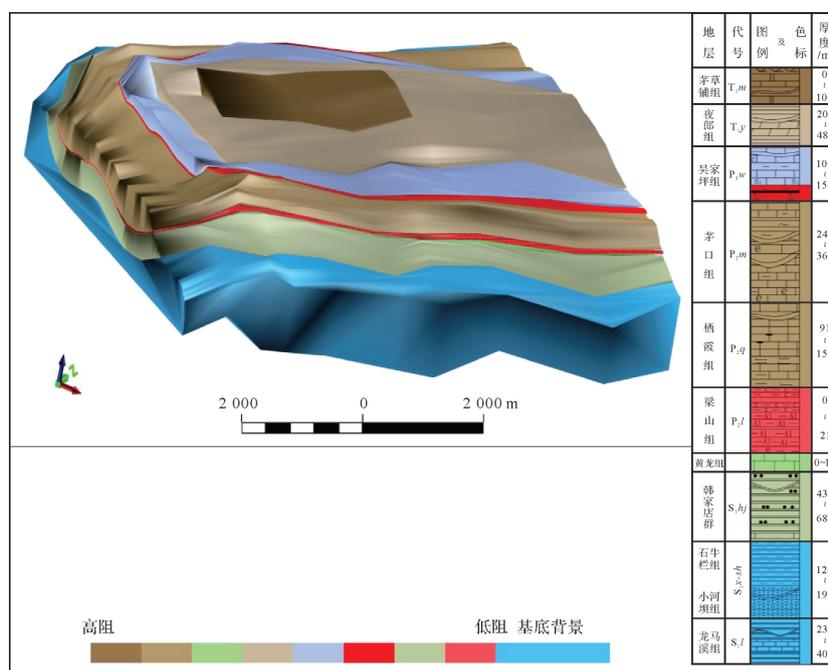


图 8 研究区铝土矿三维地质—地球物理找矿预测模型图

Fig.8 3D geological and geophysical prospecting prediction model diagram of bauxite in this study area

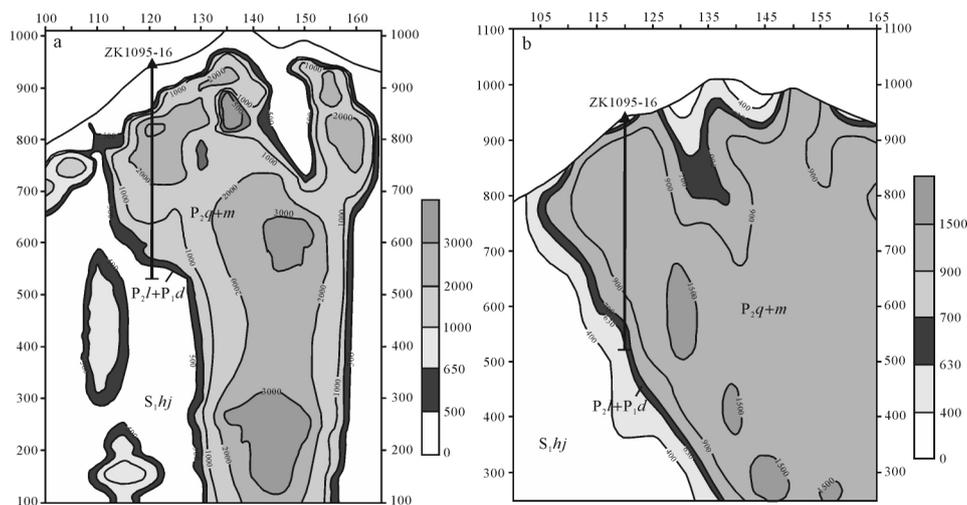


图 9 马鬃岭矿区 1095 剖面音频大地电磁测深 (a) 和大功率激电测深 (b) 反演电阻率图

Fig.9 Inversion diagrams of Audio magnetotelluric sounding (a) and high power IP sounding apparent resistivity (b) of section 1095 in Mazongling mining area

东山矿区 240 (D—D') 剖面在 145~205 测点地段异常特征较显著 (图 10) 推测为有利成矿地段 埋深分别在 290 m 和 460 m 附近 2013 年实施 ZK240-16、ZK240-32 两验证钻孔验证, 分别在 285 m 和 480 m 见矿 矿体厚度分别为 1.57 m 和 1.47 m, Al₂O₃ 品位分别为 60.79% 和 52.67% 见矿效果好。

此外在浣溪向斜轴部实施 ZK1 深部钻探验证 (图 7) 也发现隐伏矿体 将矿床规模由中型提升为大型。

4.3 遥感找矿标志

利用现代遥感技术方法提取蚀变矿化信息和宏观找矿标志已成为地质勘查的重要技术手段之一。近 10 多年来 遥感技术在国内外铝土矿资源调查评价、找矿远景区圈定得到广泛应用 [34-38]。

本次研究通过 1:10 万~1:2.5 万遥感地质解译分析 建立了研究区主要地层、构造 尤其是含矿岩系顶底板地层岩性的遥感识别标志 (表 1) 查明了全区的地质构造格架和含矿岩系的分布特征 总结出铁

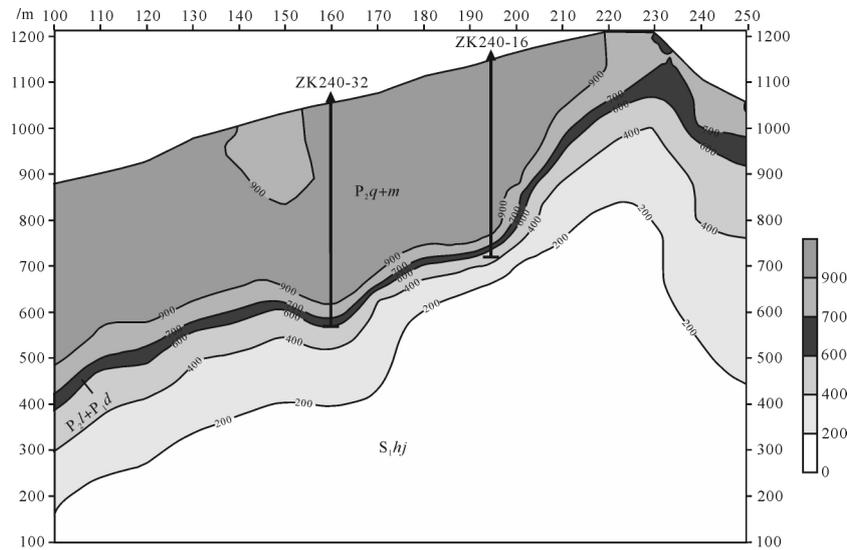


图 10 东山矿区 240 剖面音频大地电磁测深反演电阻率图

Fig.10 Audio magnetotelluric sounding apparent resistivity inversion diagram of section 240 in Dongshan mining area

表 1 务一正一道地区地层、构造遥感影像识别标志表

Table 1 Remote sensing image identification of strata , structure in the Wuchuan-Zheng'an- Daozhen area

地层或构造	空间位置	色调及影纹	地形地貌
T—碳酸盐岩	矿系层位之上 >500 m	平面上呈紫红色蜂窝状、面状展布	陡立状峰林、峰丛等喀斯特地貌
P ₂ +P ₃ —碳酸盐岩	矿系之上 0~500 m	平面上呈桔皮纹状、花生壳纹状展布。迎光影像为封闭的黄绿色带、色块,背光影像常成黑色条带	陡崖、陡壁
P ₁ d+P ₂ l	含矿岩系	阴坡表现为黑色条带状阴影,阳坡呈浅黄色条带	环绕向斜形成圈闭小缓坡
S ₁ h _j 碎屑岩	矿系之下 0~400 m	呈特征醒目的浅灰色、灰紫色,发射状“刘海”式密集沟影纹	密集“刘海”式冲沟 缓坡
中上寒武统白云岩	矿系之下 >3 km	呈紫红—绿色条带、条块和影像粗糙感强的棋盘格子状展布	峰林、溶蚀冲沟
向斜构造	控制矿系分布	浅黄绿色条带环绕紫红色、黄绿色条块,平面形态较完整	凸凹相间
断层	破坏矿系连续展布	影纹色调异常线	陡壁和狭窄沟谷,菱形网格状水系

化、泥化异常与含矿岩系的空间展布关系,即成带状断续分布的异常区指示有含矿岩系产出,且其剥蚀程度低,产出稳定,为铝土矿有利成矿区;反之异常规模大、强度高,且成面状连续分布区,推测含矿岩系剥蚀程度高,异常为其底部铁绿泥化、黏土化的反映,为不利成矿区。结合成矿地质和地形地貌条件,快速圈定找矿远景区;通过 1:1 万遥感解译结合三维立体影像模型(图 11),精细提取含矿层及其顶底板的遥感找矿标志,为矿区中大比例尺地质填图和地表工程施工提供重要的参考信息。

4.4 化探找矿标志

研究区 1:20 万水系沉积物和重砂测量成果显

示, F、CaO、MgO 水系沉积物异常发育,且 B、Ba、Li、U、Sr 等元素的地球化学背景高,与大面积分布的碳酸盐岩和以海相沉积为主的沉积环境吻合;平坦的汇水盆地 Al₂O₃ 重砂异常规模大,而含矿岩系分布区未见其异常^①、^[39],推测为地形切割强烈,富含 Al₂O₃ 的沉积物难以近距离保留所致。

4.5 综合找矿模型

以找矿增储为目的,以地质、物探、化探和遥感异常特征、找矿标志为依据^[40],建立了研究区铝土矿综合找矿预测模型(图 12)。结合古地理特征及勘查现状分析认为,道真向斜西翼中北段、大塘向斜东翼、安场向斜北段、浣溪向斜南西段、青坪向斜中南段等区

① 贵州省地质矿产勘查开发局,贵州省有色金属和核工业地质勘查局. 贵州省务正道地区铝土矿整装勘查报告[R]. 2013: 1-170.

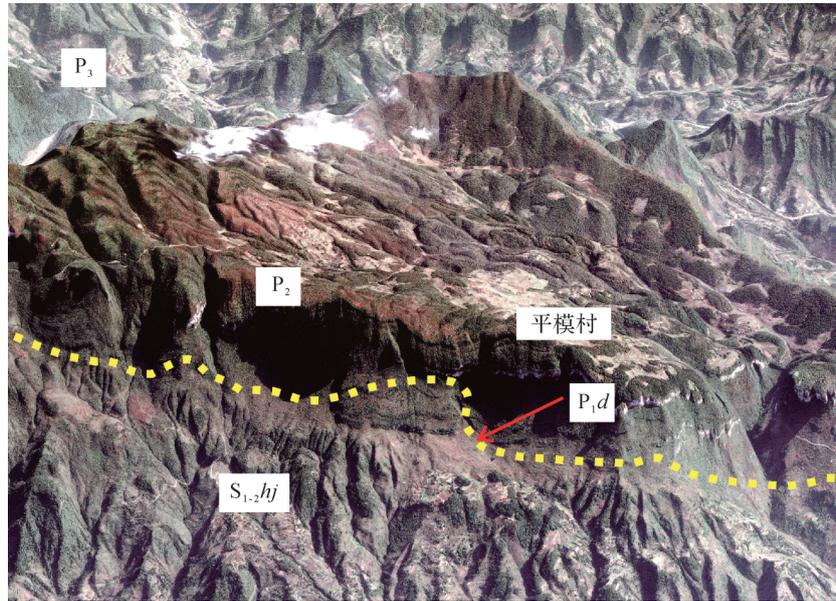


图 11 平模向斜东翼遥感三维立体影像解译图

Fig.11 3D remote sensing imagery interpretation diagram of east wing of Pingmu syncline

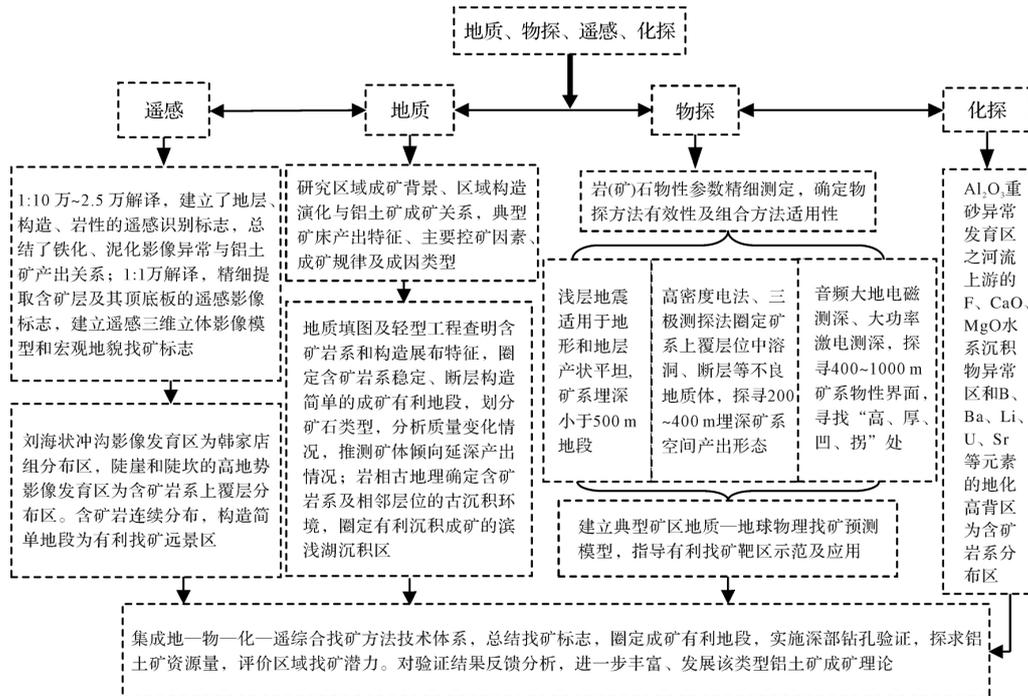


图 12 务一正一道地区铝土矿综合找矿模型图

Fig.12 Comprehensive prospecting model diagram of bauxite in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area

段已知矿床的深、边部(图 1),含矿岩系沉积厚度大(5~15 m)地表分布稳定连续,产状较平缓(多小于 40°),埋藏相对浅(<1 000 m)的区域分布面积大,次生淋滤改造作用强(多有规模较大的成矿期后断层深切含矿岩系),工作程度低(多为预查—普查),具有较大的找矿潜力和增量空间。

5 结论

- (1) 务一正一道地区铝土矿成矿与广西运动和海西运动的隆升事件密切相关,前者为成矿提供了丰富物源,后者为成矿提供了沉积环境和富集场所。
- (2) 中小比例尺遥感解译能快速圈定找矿远景区,大比例尺遥感解译结合地质填图和沉积相研究能

较好圈定成矿有利地段。

(3) 多矿区多物探方法应用和对比研究认为, 研究区具备开展物探电磁法的地质条件, 反演的“高、厚、凹、拐”异常能较好揭示含矿岩系深部的产出形态, 是探寻深部铝土矿的重要指示标志, 建立的三维地质—地球物理找矿预测模型具有适宜性和有效性。

(4) 集成的勘查技术方法, 建立的综合找矿模型指导找矿效果显著, 对研究区及相邻区具有较好的示范作用。

致谢 对审稿专家及编辑部马素萍老师提出的宝贵修改意见表示衷心感谢!

参考文献 (References)

- [1] 陈毓川, 裴荣富, 宋天锐, 等. 中国矿床成矿系列初论 [M]. 北京: 地质出版社, 1998: 1-104. [Chen Yuchuan, Pei Rongfu, Song Tianrui, et al. Preliminary study on minerogenetic series in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998: 1-104.]
- [2] 金中国, 黄志龙, 刘玲, 等. 黔北务正道地区铝土矿成矿规律研究 [M]. 北京: 地质出版社, 2013: 1-152. [Jin Zhongguo, Huang Zhilong, Liu Ling, et al. Study on the metallogenic regularity of bauxite deposits in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, Guizhou province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2013: 1-152.]
- [3] 武国辉, 金中国, 鲍淼, 等. 黔北务正道铝土矿成矿规律探讨 [J]. 地质与勘探, 2008, 44(6): 31-35. [Wu Guohui, Jin Zhongguo, Bao Miao, et al. Bauxite metallogenic regularity in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou [J]. Geology and Prospecting, 2008, 44(6): 31-35.]
- [4] 刘平, 廖友常, 张雅静. 黔中—渝南石炭纪铝土矿含矿岩系中的海相沉积特征 [J]. 中国地质, 2015, 42(2): 641-654. [Liu Ping, Liao Youchang, Zhang Yajing. Characteristics of marine deposits of the bauxite-bearing rock series in central Guizhou-southern Chongqing area [J]. Geology in China, 2015, 42(2): 641-654.]
- [5] 杜远生, 周琦, 金中国, 等. 黔北务正道地区铝土矿基础地质与成矿作用研究进展 [J]. 地质科技情报, 2013, 32(1): 1-6. [Du Yuansheng, Zhou Qi, Jin Zhongguo, et al. Advances in basic Geology and metallogenic regularity study of bauxite in Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou province [J]. Geological Science and Technology Information, 2013, 32(1): 1-6.]
- [6] 雷志远, 翁申富, 陈强, 等. 黔北务正道地区早二叠世大竹园期岩相古地理及其对铝土矿的控矿意义 [J]. 地质科技情报, 2013, 32(1): 8-12. [Lei Zhiyuan, Weng Shenfu, Chen Qiang, et al. Lithofacies paleogeography of the Dazhuyuan age, early Permian in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou province and its implication for bauxitisation [J]. Geological Science and Technology Information, 2013, 32(1): 8-12.]
- [7] 杜远生, 周琦, 金中国, 等. 黔北务正道地区早二叠世铝土矿成矿模式 [J]. 古地理学报, 2014, 16(1): 1-8. [Du Yuansheng, Zhou Qi, Jin Zhongguo, et al. Mineralization model for the early Permian bauxite deposits in Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou province [J]. Journal of Palaeogeography, 2014, 16(1): 1-8.]
- [8] 黄智龙, 金中国, 向贤礼, 等. 黔北务正道铝土矿成矿理论及预测 [M]. 北京: 科学出版社, 2014: 1-241. [Huang Zhilong, Jin Zhongguo, Xiang Xianli, et al. Metallogenic theory and prediction of bauxite deposits in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou province, China [M]. Beijing: Science Press, 2014: 1-241.]
- [9] 崔滔, 焦养泉, 杜远生, 等. 黔北务正道地区早二叠世铝土矿沉积古地理及其控矿意义 [J]. 古地理学报, 2014, 16(1): 9-18. [Cui Tao, Jiao Yangquan, Du Yuansheng, et al. Sedimentary palaeogeography and its mineralization significance of the early Permian bauxite in Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou province [J]. Journal of Palaeogeography, 2014, 16(1): 9-18.]
- [10] 李沛刚, 王登红, 赵芝, 等. 贵州大竹园铝土矿床地质、地球化学与成矿规律 [M]. 北京: 科学出版社, 2014: 1-218. [Li Peigang, Wang Denghong, Zhao Zhi, et al. Geology, geochemistry and metallogeny regularities of the Dazhuyuan bauxite deposit, Guizhou province [M]. Beijing: Science Press, 2014: 1-218.]
- [11] 刘辰生, 金中国, 于汪. 黔北地区铝土矿床沉积相研究 [J]. 矿物岩石, 2014, 34(3): 81-88. [Liu Chensheng, Jin Zhongguo, Yu Wang. Sedimentary facies analysis of bauxite in northern Guizhou [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2014, 34(3): 81-88.]
- [12] 刘辰生, 金中国, 郭建华. 黔北务正道地区淡水沉积型铝土矿床沉积相 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(3): 962-969. [Liu Chensheng, Jin Zhongguo, Guo Jianhua. Facies analysis of sedimentary bauxite deposition in freshwater of Wuzhengdao in northern Guizhou [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(3): 962-969.]
- [13] 刘辰生, 金中国, 郭建华. 黔北务正道地区沉积型铝土矿床层序地层学 [J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(1): 179-189. [Liu Chensheng, Jin Zhongguo, Guo Jianhua. Sequence stratigraphy of bauxite deposition in Wuzhengdao area in Qianbei, North Guizhou [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(1): 179-189.]
- [14] 殷科华. 黔北务正道铝土矿的成矿作用及成矿模式 [J]. 沉积学报, 2009, 27(3): 452-457. [Yin Kehua. Mineralization and metallogenic model for bauxite in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(3): 452-457.]
- [15] 金中国, 刘玲, 黄智龙, 等. 贵州务正道地区铝土矿床稀土元素组成及其地质意义 [J]. 地质与勘探, 2012, 48(6): 1067-1076. [Jin Zhongguo, Liu Ling, Huang Zhilong, et al. REE composition of the bauxite deposits in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, Guizhou province and its geological significance [J]. Geology and Prospecting, 2012, 48(6): 1067-1076.]
- [16] 金中国, 周家喜, 黄智龙, 等. 贵州务川—正安—道真地区铝土矿碎屑锆石 U-Pb 年龄及其地质意义 [J]. 地学前缘, 2013, 20(6): 226-239. [Jin Zhongguo, Zhou Jiayi, Huang Zhilong, et al. Detrital zircon U-Pb dating and its geological significance for the bauxite in Wuchuan-Zheng'an-Daozhen Al metallogenic province,

- Guizhou, SW China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(6): 226-239.]
- [17] Gu J, Huang Z L, Fan H P, et al. Mineralogy, geochemistry, and genesis of lateritic bauxite deposits in the Wuchuan-Zheng'an- Daozhen area, northern Guizhou province, China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2013, 130: 44-59.
- [18] Gu J, Huang Z L, Fan H P, et al. Provenance of lateritic bauxite deposits in the Wuchuan-Zheng'an- Daozhen area, northern Guizhou province, China: LA - ICP - MS and SIMS U - Pb dating of detrital zircons [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 70-71: 265-282.
- [19] 汪小妹, 焦养泉, 杜远生, 等. 黔北务正道地区铝土矿稀土元素地球化学特征[J]. *地质科技情报*, 2013, 32(1): 27-33. [Wang Xiaomei, Jiao Yangquan, Du Yuansheng, et al. Rare earth element geochemistry of bauxite in Wuchuan-Zheng'an- Daozhen area, northern Guizhou province [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2013, 32(1): 27-33.]
- [20] 余文超, 杜远生, 顾松竹, 等. 黔北务正道地区早二叠世铝土矿多期淋滤作用及其控矿意义[J]. *地质科技情报*, 2013, 32(1): 34-39. [Yu Wenchao, Du Yuansheng, Gu Songzhu, et al. Multi-period leaching process of early Permian bauxite in Wuchuan-Zheng'an- Daozhen area, northern Guizhou province and its significance of ore-control [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2013, 32(1): 34-39.]
- [21] 金中国, 周家喜, 黄智龙, 等. 黔北务一正一道地区铝土矿床的矿物学特征[J]. *地质学报*, 2015, 89(8): 1458-1470. [Jin Zhongguo, Zhou Jiayi, Huang Zhilong, et al. Mineralogical characteristics of the bauxite deposit in the Wuchuan-Zheng'an- Daozhen area, northern Guizhou province, China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(8): 1458-1470.]
- [22] 韩英, 邹林, 王京彬, 等. 贵州省务正道地区铝土矿地球化学特征及意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2016, 35(4): 653-662, 691. [Han Ying, Zou Lin, Wang Jingbin, et al. Geochemical Characteristics of Bauxite in the Wuzhengdao area, Guizhou province [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2016, 35(4): 653-662, 691.]
- [23] 王登红, 李沛刚, 屈文俊, 等. 贵州大竹园铝土矿中钨和锂的发现与综合评价[J]. *中国科学: 地球科学*, 2013, 43(1): 44-51. [Wang Denghong, Li Peigang, Qu Wenjun, et al. Discovery and preliminary study of the high tungsten and lithium contents in the Dazhuyuan bauxite deposit, Guizhou, China [J]. *Science China Earth Sciences*, 2013, 56(1): 145-152.]
- [24] 金中国, 周家喜, 黄智龙, 等. 黔北务一正一道地区典型铝土矿床伴生有益元素锂、镓和钪分布规律[J]. *中国地质*, 2015, 42(6): 1910-1918. [Jin Zhongguo, Zhou Jiayi, Huang Zhilong, et al. The distribution of associated elements Li, Sc and Ga in the typical bauxite deposits over the Wuchuan-Zheng'an- Daozhen bauxite ore district, northern Guizhou province [J]. *Geology in China*, 2015, 42(6): 1910-1918.]
- [25] 李军敏, 丁俊, 尹福光, 等. 渝南申基坪铝土矿矿区钪的分布规律及地球化学特征研究[J]. *沉积学报*, 2012, 30(5): 909-918. [Li Junmin, Ding Jun, Yin Fuguang, et al. Regularities of distribution and geochemical characteristics of Sc in bauxite of Shenjiping mine, southern Chongqing [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2012, 30(5): 909-918.]
- [26] 李军敏, 陈莉, 徐金沙, 等. 渝南大佛岩矿区铝土矿碎屑锆石中钪的赋存形式研究[J]. *沉积学报*, 2013, 31(4): 630-638. [Li Junmin, Chen Li, Xu Jinsha, et al. Existing form of scandium in detrital zircon from bauxite of the Dafuyan mine, southern Chongqing [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(4): 630-638.]
- [27] 赵晓东, 李军敏, 陈莉, 等. 重庆银矿垭口铝土矿床地球化学特征及成矿环境研究[J]. *沉积学报*, 2013, 31(6): 1022-1030. [Zhao Xiaodong, Li Junmin, Chen Li, et al. Analysis on gallium geochemical characteristics and ore-forming environment of bauxite mine in Yinkuangyakou of Chongqing [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(6): 1022-1030.]
- [28] 廖士范. 我国铝土矿成因及矿层沉积过程[J]. *沉积学报*, 1986, 4(1): 1-7. [Liao Shifan. The genesis of bauxite and the sedimentary process of its ore deposit in China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1986, 4(1): 1-7.]
- [29] 罗小南, 蔡运胜. 物探直流电法寻找铝土矿层的应用效果[J]. *地质与勘探*, 2003, 39(3): 53-57. [Luo Xiaonan, Cai Yunsheng. The application effectiveness of DC electric prospecting method in bauxite layer survey [J]. *Geology and Prospecting*, 2003, 39(3): 53-57.]
- [30] 马振波, 燕长海, 宋要武, 等. CSAMT与SIP物探组合法在河南省栾川山区隐伏金属矿勘查中的应用[J]. *地质与勘探*, 2011, 47(4): 654-662. [Ma Zhenbo, Yan Changhai, Song Yaowu, et al. Application of combined geophysical methods CSAMT and SIP to the survey of concealed metal deposits in the Luanchuan Mountainous area, Henan province [J]. *Geology and Exploration*, 2011, 47(4): 654-662.]
- [31] 王桥, 万汉平, 王闻文, 等. 综合物探方法在铝土矿勘查中的应用[J]. *地球物理学进展*, 2012, 27(2): 709-714. [Wang Qiao, Wan Hanping, Wang Wenwen, et al. The application of integrated geophysical exploration in bauxite [J]. *Progress in Geophysics*, 2012, 27(2): 709-714.]
- [32] 樊金生, 郭文波, 王美丁, 等. 古风化壳沉积型铝土矿物探异常模式及系列方案[J]. *矿产与地质*, 2013, 27(1): 52-55. [Fan Jinsheng, Guo Wenbo, Wang Meiding, et al. Geophysical anomaly patterns and series programmes in sedimentary bauxite deposits of fossil weathering crust [J]. *Mineral Resources and Geology*, 2013, 27(1): 52-55.]
- [33] 李华, 艾斯卡尔, 吾守艾力, 等. 渝东南地区隐伏铝土矿物探勘查技术试验研究: 以车盘矿区试验结果为例[J]. *地质学报*, 2013, 87(3): 384-392. [Li Hua, Askar, Wuxuraly, et al. Examination study of geophysical methods in exploring buried bauxite deposit in southeast of Chongqing city: An example from the Chepan mining area [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87(3): 384-392.]
- [34] 刘沛, 姚智, 况顺达. 遥感在贵州沉积矿产资源调查中的应用[J]. *贵州地质*, 2003, 20(1): 20-24. [Liu Pei, Yao Zhi, Kuang

- Shunda. Application of remote sensing (RS) to the survey of sedimentary mineral resources in Guizhou [J]. *Guizhou Geology*, 2003, 20(1): 20-24.]
- [35] 罗允义. 广西铝土矿遥感综合成矿预测及资源总量估算[J]. *地质与勘探*, 2003, 39(3): 58-62. [Luo Yunyi. Synthetic remote sensing metallogenic prognosis and total amount estimation of bauxite resources in Guangxi [J]. *Geology and Prospecting*, 2003, 39(3): 58-62.]
- [36] 成功, 朱战军, 高泽润. ETM+与 ASTER 数据在老挝红土型铝土矿勘查中的应用[J]. *轻金属*, 2012, 16(10): 6-10. [Cheng Gong, Zhu Zhanjun, Gao Zerun. Application of ETM+ and ASTER remote sensing data in the prospecting of lateritic bauxite in Laos [J]. *Light Metals*, 2012, 16(10): 6-10.]
- [37] 罗一英, 高光明, 于信芳, 等. 基于 ETM+ 的几内亚铝土矿蚀变信息提取方法研究[J]. *遥感技术与应用*, 2013, 28(2): 330-337. [Luo Yiyang, Gao Guangming, Yu Xinfang, et al. A study on extraction of bauxite alteration information of Guinea based on ETM + remote sensing data [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2013, 28(2): 330-337.]
- [38] 张云峰, 李领军, 冯淳. ASTER 数据在北方铝土矿预普查中的应用: 以豫西澠池地区为例[J]. *国土资源遥感*, 2012, 24(1): 48-52. [Zhang Yunfeng, Li Lingjun, Feng Chun. The application of ASTER data to bauxite deposit pre-survey in northern China: A case study of Mianchi area, western Henan [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2012, 24(1): 48-52.]
- [39] 贵州省地质矿产勘查开发局. 贵州省地球化学图集[M]. 北京: 地质出版社, 2007: 1-60. [Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development. *Geochemical atlas of Guizhou province, China* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007: 1-60.]
- [40] 施俊发, 唐金荣, 周平, 等. 关于找矿模型的探讨[J]. *地质通报*, 2011, 30(7): 1119-1125. [Shi Junfa, Tang Jinrong, Zhou Ping, et al. A discussion on the exploration model [J]. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(7): 1119-1125.]

Metallogenic and Prospecting Models of Bauxite in Wuchuan-Zheng' an- Daozhen Area, Guizhou Province

JIN ZhongGuo¹, ZOU Lin², ZHANG Li³, ZHENG MingHong¹, HAN Ying², GU Jing⁴, XIE Xi¹, CHEN XingLong¹, WANG Hong¹

1. Non-Ferrous Metals and Nuclear Industry Geological Exploration Bureau of Guizhou, Guiyang 550005, China

2. China Non-Ferrous Metals Resource Geological Survey, Beijing 100012, China

3. China Non-Ferrous Metal (Guilin) Geology and Mining Co., Ltd., Guilin 541004, China

4. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

Abstract: The Wuchuan-Zheng' an-Daozhen Bauxite metallogenic belt, located in the contiguous area of north Guizhou and south Chongqing, is an important bauxite resource area in Guizhou with more than 10 large deposits and 800 million tons reserves discovered. The bauxite occurred in the lower Silurian Hanjiadian formation of clastic rocks or the lower Permian Dazhuyuan Formation above the ancient erosion surface of Carboniferous Huanglong formation of carbonate. The deposits belongs to ancient weathering sedimentary type. Based on previous researchs of ore-forming sources, ore-forming environments, mineralization and ore deposit genesis types, the relationship between regional tectonic evolution and bauxite formation was studied in this paper, to disclosure the geology-geochemistry evolution process of bauxite mineralization combined with special geological features. According to extraction of 1:100 000-1:10 000 remote sensing image features, the series of ore-bearing rocks and adjacent layers, main structure identification, relationship among iron, mud anomaly and the space distribution of the rock series were summarized to establish a remote sensing 3D image model in large scale. Through the application and comparative study of multiple bauxite mining areas by geophysical methods, such as Shallow seismic reflection wave method, high density resistivity method, frequency domain tripole sounding method, audio earth electromagnetic sounding method, high power excitation sounding method, the geophysical prospecting marks of "high, sunken, concave, thick" and typical mine 3D geological and geophysical prospecting prediction model of the bauxite deposit was established. On the study above, the technical method system of bauxite exploration and furtheron the geological, geophysical, geochemical and remote sensing prospecting models may demonstrate guidance to prospect and acquire remarkable prospecting effect through engineering verification, indicating the proposed mining model is suitable and effective in the exploration of bauxite in the study area.

Key words: bauxite; exploration techniques integrating; metallogenic model; prospecting mode; Wuchuan-Zheng' an-Daozhen area of Guizhou province