

DOI: 10.16788/j.hddz.32-1865/P.2024.01.015

引文格式: 刘百顺, 梁荣荣, 李中明, 刘蕾, 孙雪飞, 刘学飞. 2024. 河南省渑池铝土矿田地质特征及成矿规律[J]. 华东地质, 45(4): 414-429. (LIU B S, LIANG R R, LI Z M, LIU L, SUN X F, LIU X F. 2024. Geological characteristics and metallogenic regularity of bauxite in Mianchi, Henan Province[J]. East China Geology, 45(4): 414-429.)

河南省渑池铝土矿田地质特征及成矿规律

刘百顺¹, 梁荣荣², 李中明³, 刘蕾², 孙雪飞², 刘学飞²

(1. 河南省地质科学研究所有限公司, 河南 郑州 450001; 2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 3. 河南省地质研究院, 河南 郑州 450001)

摘要: 渑池铝土矿田是豫西地区重要的铝土矿聚集区, 已发现大型铝土矿床 10 余处, 但综合研究程度低、成矿规律认识不清晰, 未开展深部成矿预测。文章对渑池铝土矿田的地质背景、矿体、矿石矿物和地球化学特征等进行了详细地研究, 重点介绍了侯岭铝土矿和礼庄寨铝土矿的矿体特征、矿物组成、结构构造和主要化学成分, 分析了含铝岩系化学组分的变化规律、物源风化强度、风化沉积环境、成矿物质来源和成矿作用规律等, 结合岩相古地理及构造演化等研究成果, 认为渑池铝土矿是长期风化残余堆积的产物, 成矿物质具有多源性, 经历了多期次、周期性的沉积成矿, 淋滤作用使铝土矿品位大幅提高。渑池铝土矿具有受古岩溶地貌控制的多沉积中心成矿特征, 铝土矿形成时, 渑池地区呈缓倾的准平原喀斯特地貌, 铝土矿大面积富集成矿, 经成岩后的多期构造改造, 形成了以向斜为主的构造格局, 使向斜核部和南翼的含矿地层深埋, 预测向斜的中深部仍赋存大规模的优质铝土矿。

关键词: 渑池; 喀斯特型铝土矿; 地质特征; 矿物组成; 成矿规律

中图分类号: P595; P611

文献标识码: A

文章编号: 2096-1871(2024)04-414-16

渑池铝土矿田位于河南省三门峡市渑池县一带, 属于豫西铝土矿成矿区的北西段中部, 沿渑池向斜北翼边缘呈弧带状展布, 东西向延伸长约 50 km, 自东向西包括雷沟铝土矿、段村铝土矿、侯岭铝土矿、礼庄寨铝土矿、贯沟铝土矿、贾家洼铝(黏)土矿、曹窑铝土矿、小龙庙铝土矿、曹窑煤矿深部铝土矿和杜家沟铝土矿等 10 个矿床, 属于典型的喀斯特型铝土矿床(Liu et al., 2013; Wang et al., 2016; 刘学飞, 2011; 吴国炎等, 1996; 袁跃清, 2005)。前人曾开展了矿物特征、成矿特征和成矿作用等方面的研究(Wang et al., 2010; Zhao and Liu, 2019; Zhao et al., 2021; 刘学飞等, 2020; 孙雪飞等, 2023), 但仍存在综合研究程度低、成矿规律认识不清晰以及未开展深部成矿预测分析等问题。

基于此, 本文总结了渑池矿田的地质背景、构造、古岩溶、含铝岩系和矿体等特征, 统计分析了各矿床的矿体空间分布、矿石矿物和元素变化规律, 分析铝土矿的物质来源和富集机制, 并总结了其成矿规律, 为下一步开展深部铝土矿找矿勘查工作提供参考。

1 区域地质背景

1.1 区域地层

渑池铝土矿田位于华北陆块南部, 属于华北地层区豫西地层分区渑池—确山地层小区(图 1(a)、(b))。该矿田自下而上出露的地层为中元古界蓟县系, 下古生界寒武系和奥陶系,

* 收稿日期: 2024-01-02 修订日期: 2024-09-02 责任编辑: 谭桂丽

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“山西北部石炭系本溪组喀斯特型铝土矿成因研究——以宽草坪铝土矿床为例(编号: 41972073)”和“右江二叠纪喀斯特型铝土矿中稀土元素富集规律和吸附机制研究——以平果和田阳铝土矿床为例(编号: 42272079)”联合资助。

第一作者简介: 刘百顺, 1982 年生, 男, 工程师, 本科, 主要从事矿产勘查研究工作。Email: lbsde520@163.com。

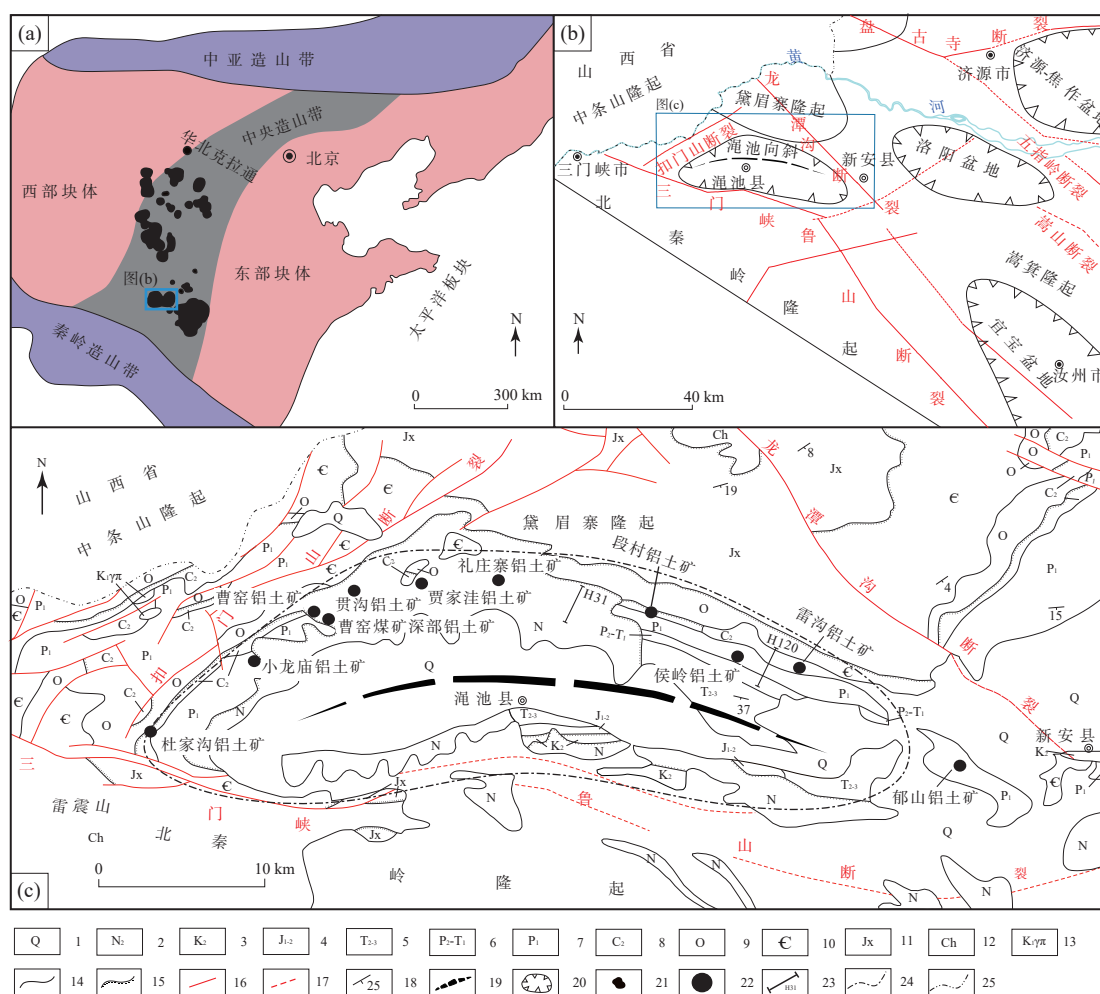
通信作者简介: 刘学飞, 1983 年生, 男, 教授, 博士, 主要从事矿床学研究工作。Email: lxf@cugb.edu.cn。

上古生界石炭系和二叠系,中生界三叠系、侏罗系和白垩系,新生界新近系和第四系(图1(c))。铝土矿产于中石炭世本溪组,主要为1套铁铝硅岩建造地层。

区内蓟县系包括汝阳群、洛峪群的部分地层,主要分布于黛眉寨隆起区,沿三门峡—鲁山断裂带两侧也有零星分布,岩性以石英砂岩为主,夹少量的页岩和长石石英砂岩,厚300~700 m,与下伏奥陶纪马家沟组呈不整合接触或断层接触。寒武系出露于渑池盆地外围,多呈断块状,自下而上分为馒头组、张夏组、崮山组、炒米店组和三山子组,岩性以碳酸盐岩为主,厚500~700 m。奥陶系仅

马家沟组沿向斜北翼边部零星出露,岩性为灰岩和白云岩,厚约90 m。区域上,西起三门峡大安,东至新安县张窑院、郁山等地区的含铝岩系底板均为马家沟组三—四段,其顶部的喀斯特风化面为铝土矿的形成提供了天然的储存空间和良好的碱性环境,与上覆含铝岩系呈平行不整合接触。

中石炭世本溪组是渑池铝土矿的含矿地层,在渑池向斜北翼内边缘呈断续带状出露,普遍沿喀斯特风化面发育,厚0.7~50 m,向南(深部)延伸稳定,多数为完整的“铁-铝-煤”沉积旋回,可分为上部 and 下部2个亚旋回。在深大溶斗、溶洼的中深部发育两个或多个不完整的“铁-铝”沉



1. 第四系; 2. 上新统; 3. 上白垩统; 4. 下-中侏罗统; 5. 中-上三叠统; 6. 中二叠统-下三叠统; 7. 下二叠统; 8. 中石炭统; 9. 奥陶系; 10. 寒武系; 11. 蓟县系; 12. 长城系; 13. 早白垩世花岗斑岩; 14. 地质界线; 15. 不整合界线; 16. 实测断层; 17. 推测断层; 18. 产状; 19. 向斜轴部; 20. 盆地; 21. 铝土矿集聚区; 22. 铝土矿床; 23. 勘探线剖面位置及编号; 24. 渑池向斜范围; 25. 省界

图1 渑池矿田大地构造位置图(a)、区域地质构造简图(b)和地质矿产简图(c)(河南省地质调查院, 2015; 王建平等, 2009)
Fig. 1 Tectonic location (a), regional geological structure (b) and geology and mineral resources (c) of the Mianchi mine field (Henan Geological Survey Institute, 2015; Wang et al., 2009)

积旋回,形成多层铝土矿体。

(1)下部为“铁矿-黏土岩”风化-沉积亚旋回。该亚旋回底部为铁质黏土岩,夹透镜状、似层状褐红色铁质黏土岩,含黄铁矿、菱铁矿黏土岩等,产透镜状山西式铁矿,厚度一般为 0.5~2 m;该亚旋回中部为杂色页岩、黏土岩层,以深灰黑色黏土岩居多,厚 1~2 m,混杂大量的菱铁矿和黄铁矿,其中菱铁矿呈豆鲕状、絮状、条带状和薄层状产出,黄铁矿呈自形颗粒状产出。

(2)上部为“铝土矿-黏土岩-煤”风化-沉积亚旋回。该亚旋回下部为浅灰色薄层状黏土岩,泥质结构,微具页理,是黏土矿的主要层位,厚度一般为 1~3 m;该亚旋回中部为灰色铝土矿层,厚 0.7~45 m,平均厚 3~4 m。铝土矿具粒屑结构、豆鲕结构和重结晶结构等,以块状构造为主,少量多孔构造和层理构造;该亚旋回上部为深灰色黏土岩,产透镜状黏土矿,厚 0.3~2 m,局部缺失,具泥质结构,块状构造,部分见层理;顶部为薄煤层或深灰色含碳质泥岩,厚 0.2~2 m,部分地段可开采。

二叠系断续出露于渑池向斜的翼部,自下而上包括太原组、山西组、石盒子组和孙家沟组。太原组为 1 套含煤碎屑岩夹碳酸盐岩建造,山西组、石盒子组和孙家沟组为碎屑岩夹煤层(线)建造;三叠系主要出露于盆地中部渑池县城—义马市一带,为 1 套陆相碎屑岩沉积地层,厚 3~5 km;侏罗系和白垩系出露于渑池向斜的核部,规模较小,属于陆相碎屑岩沉积地层,厚 30~100 m。

1.2 矿田构造

渑池地区南部为北秦岭隆起,北部为中条山、黛眉寨隆起,受中生代多期次伸展挤压作用的影响,形成了“周边隆起、中部凹陷”的构造格局,隆起之间具有“自西部断块台地逐渐转变为东部断陷盆地”的构造特征。

渑池向斜属于宽缓向斜,轴面近直立,轴向近 EW 向。轴线在渑池县西北部陈村一带转向 SW 向,向西倾伏,东西向长约 70 km,南北向最宽约 50 km。自向斜翼部至核部,依次出露寒武系、奥陶系、石炭系、二叠系、三叠系和白垩系。渑池东北部为龙潭沟断裂,走向 SE,倾向 NE,倾角为 70°~80°,由多条呈雁行状近平行排列的断层组成,切割中元古界蓟县系—中生界白垩系,属于印支

期—燕山期逆断层。渑池西北部为扣门山断裂带,走向 NE,由多条近平行的 NE 向断裂组成,切割寒武系—二叠系,同时发育 NW 向次级断裂。该断裂活动主要发生在印支期—燕山期和喜山期,多数为正断层。渑池南部发育三门峡—鲁山山麓推覆构造带,由多条走向 NW、倾向 S 的断层组成,属于南盘上升、北盘下降的逆冲断层,断距>1 km,由印支期—燕山期的构造挤压推覆所形成(雷显权等, 2021)。

铝土矿成矿就位后的构造作用使渑池向斜北部中生代地层抬升剥蚀,南部中生代地层深埋。受黛眉寨古陆抬升的影响,渑池向斜东北部地层遭受抬升剥蚀而缺失中生代以上的地层,向斜翼部边缘的铝土矿断续出露;西北部被扣门山次级断裂(NE 向)切割,形成断块台地,地层多呈倾向 SE 的单斜构造,控制了多个倾向 SE 的单斜构造铝土矿床。向斜北翼呈单斜南倾构造,石炭纪本溪组向南(向斜核部)稳定延伸,连续产出多个铝土矿床,构成了渑池铝土矿田。渑池向斜南翼受三门峡—鲁山山麓推覆构造带(NW 向)推覆作用影响而被深埋,使渑池向斜核部及南翼铝土矿层得以保存。

1.3 岩浆岩

区域内的岩浆岩以火山岩为主,侵入岩较少。三门峡鲁山断裂以南的雷震山一带出露长城纪马家河组火山岩,岩性主要为辉石安山玢岩、安山玢岩夹砂岩和灰岩,厚度>3 km。向斜西北部出露少量的晚侏罗世—早白垩世中酸性浅成岩,岩性为花岗斑岩和石英二长斑岩。

1.4 区域矿产

三门峡—渑池—新安一带是豫西重要的铁、铝、煤生产基地,主要矿产为铁、煤、铝土矿、耐火黏土等,并产出少量的重晶石、玻璃用砂岩、水泥灰岩和白云岩等,属于沉积矿产。

2 铝土矿矿田地质特征

渑池矿田由多个中-大型铝土矿床组成(图 1, 表 1),主矿体产于本溪组含铝岩系的中上部,连续性较好,规模较大,单矿体长几百米至数千米,宽几十米至几千米,以似层状、透镜状为主。其中,段村、雷沟和侯岭 3 个矿床的含矿层在深部相

表1 渑池矿田典型矿床铝土矿体特征一览表
Table 1 Characteristics of typical bauxite ore bodies in Mianchi ore field

矿床名称	厚度/m		矿体层数/层	天窗特征	厚度变化系数/%		产状/°		矿体形态	矿石结构	构造	矿物组合	
	最大厚度	平均厚度			倾向	倾角	主要矿物	次要矿物					
雷沟	27.4	4.9	3	多个矿体、无天窗	—	209	10	层状、似层状	粒屑、豆鲕、重结晶	块状、层状、多孔状	硬水铝石	高岭石、伊利石、水云母	
段村	12.2	3.4	2	9个矿体、无天窗	71	109	10	透镜状	粒屑、豆鲕、重结晶	块状、多孔状	硬水铝石	高岭石、伊利石、水云母	
侯岭	8.3	3.9	1	多个矿体、无天窗	74	110	20	透镜状	粒屑、豆鲕、重结晶	块状、层状、多孔状	硬水铝石	高岭石、伊利石	
礼庄寨	17.9	3.0	1	多个矿体、无天窗	74	100	10	似层状、豆夹状	粒屑、豆鲕、重结晶	块状、层状、多孔状	硬水铝石	高岭石、伊利石	
贯沟	30.5	5.7	2	1个矿体、无天窗	—	150	16	透镜状	粒屑、豆鲕、重结晶	块状、层状、多孔状	硬水铝石	高岭石、伊利石、水云母	
曹窑	17.0	4.6	3	1个无矿天窗	73	150	16	似层状、豆夹状	粒屑、重结晶	块状、层状、多孔状	硬水铝石	高岭石、伊利石、水云母	
贾家洼西矿段	18.5	4.0	1	1个无矿天窗	93	165	14	似层状、透镜状	粒屑、重结晶	块状、层状、多孔状、沙粒状	硬水铝石、伊利石	高岭石、蒙脱石、叶腊石	
贾家洼东矿段	45.1	3.4	2	8个矿体、无天窗	107	160	14	厚层状、透镜状	粒屑、豆鲕、重结晶	块状、定向、多孔状	硬水铝石、高岭石	伊利石	
曹窑深部	17.9	5.0	1	15个矿体、2个无矿天窗	74	158	15	厚层状、透镜状	粒屑、重结晶	块状、层纹状、蜂窝状	硬水铝石	高岭石、水云母	
小龙庙	8.4	2.1	0	1个无矿天窗	29	150	11	似层状、透镜状	粒屑、豆鲕、重结晶	块状、层状、多孔状	硬水铝石	高岭石、水云母	
杜家沟	25.2	—	—	8个矿体、无天窗	—	—	—	似层状、透镜状	粒屑、泥晶	块状	硬水铝石	高岭石、水云母	

注:表格数据引自地质勘察报告(河南省地质调查院,2014,2015;河南省地质矿产勘查开发局测绘队,2010a,2010b;河南省有色金属地质矿产局第六地质大队,1985;国石,2013;郑州豫源地矿勘查技术服务有限公司等,2007;中国铝业股份有限公司,2009;中国铝业股份有限公司,2004)。

连,贯沟、贾家洼、曹窑与礼庄寨西部的深部含矿层连接,多数矿床可见 2 层矿体。

该矿田的矿体产状与上覆二叠纪太原组产状相近,贾家洼以东地区倾向 SSW,在侯岭一带倾角为 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$,在礼庄寨一带倾角一般为 10° ;贾家洼以南地区倾向 SE,倾角为 $10^{\circ}\sim 16^{\circ}$ 。矿体厚度变化较大,平均厚度为 $3\sim 4$ m。其中,雷沟、曹窑、贯沟和贾家洼矿床的矿体平均厚度 > 4 m,段村、礼庄寨、侯岭和小龙庙等矿床的矿体平均厚度 < 4 m。贾家洼东矿段矿体厚度变化最大,变化系数为 107%。小龙庙矿体厚度变化最小,变化系数为 29%。矿体规模和空间特征沿走向、倾向变化较小,但受古岩溶地貌的控制明显。其中,豆鲕状矿体产于深大溶斗和溶洼的中下部,以 1 层矿体居多,少数矿床见 2 层矿体。多层矿体反映含铝岩系沉积经历了多期的风化-沉积旋回,但下部的豆鲕状矿体规模小、品位低,而上部的主矿体规模大、品位高,反映了早期成矿作用持续时间短、强度低,而晚期成矿作用持续时间长、强度高。

矿体底部为黏土岩和铁质黏土岩,顶部多为富含有机质的黏土矿和黏土岩。矿体夹层一般为铝土质黏土岩,局部相变为 1~2 层黏土矿,与铝土矿层矿物的差异主要表现为黏土矿物、铁矿物相对增多,而硬水铝石相对减少。

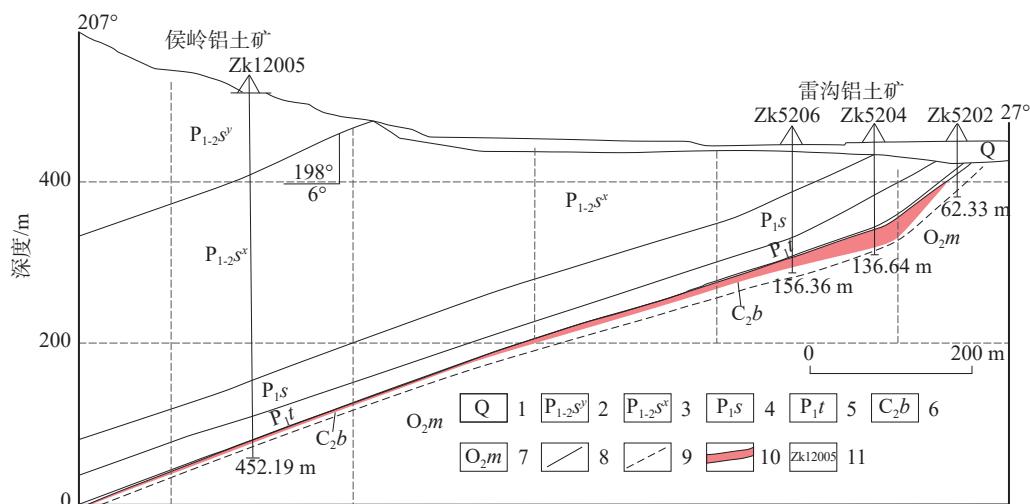
3 典型矿床特征

3.1 侯岭铝土矿床

侯岭铝土矿是段村、雷沟铝土矿床矿体向深部的延伸段,共圈定铝土矿体 4 个,埋深 $300\sim 700$ m。其中,上层矿 3 个,均产于含铝岩系的中上部;下层矿 1 个,产于含铝岩系的中下部,呈似层状-大透镜体状(图 2)。矿体主要特征如下。

(1) I 号矿体。该矿体主要呈似层状产出,走向 NE,沿走向长 > 1 km,倾向近 200° ,倾角约 27° ,沿倾向延伸 > 800 m。矿体形状简单,厚度为 $0.67\sim 3.58$ m,平均厚度为 2.19 m。矿体的 Al_2O_3 含量为 $63.32\%\sim 65.79\%$,平均含量为 65.34% ; SiO_2 含量为 $10.11\%\sim 11.80\%$,平均含量为 10.49% ; Fe_2O_3 含量为 $2.14\%\sim 5.38\%$,平均含量为 2.73% ; TiO_2 含量为 $2.14\%\sim 5.38\%$,平均含量为 2.73% ; S 含量为 $0.88\%\sim 1.08\%$,平均含量为 1.08% ; A/S 值为 $5.58\sim 6.62$,平均值为 5.69。

(2) II 号矿体。该矿体主要呈似层状产出,走向 NE,沿走向长 > 1 km,倾向 210° ,沿倾向延伸 > 800 m,倾角为 26° 。厚度为 $0.91\sim 9.27$ m,平均厚度为 3.19 m。矿体的 Al_2O_3 含量为 $53.31\%\sim 75.03\%$,平均含量为 67.79% ; SiO_2 含量为 $5.16\%\sim 18.31\%$,平均含量为 7.43% ; Fe_2O_3 含量为 $1.41\%\sim$



1. 第四系; 2. 石盒子组云盖山段; 3. 石盒子组小风口段; 4. 山西组; 5. 太原组; 6. 本溪组; 7. 马家沟组; 8. 地层界线; 9. 含铝岩系沉积基底界线; 10. 铝土矿; 11. 钻孔编号

图2 雷沟—侯岭铝土矿床 H120 勘探线剖面图(河南省地质调查院, 2015; 中国铝业有限公司, 2004)

Fig. 2 Profile of H120 exploration line of the Leiguo—Houling bauxite deposit (Henan Geological Survey Institute, 2015; Aluminum Corporation of China, 2004)

18.25%, 平均含量为 6.89%; TiO_2 含量为 2.03%~3.32%, 平均含量为 3.03%; S 含量为 0%~9.44%, 平均含量为 1.07%; A/S 值为 3.2~14.5, 平均值为 7.2。

(3) III号矿体。该矿体主要呈似层状产出, 走向 NE, 沿走向长 4.9 km, 倾向 210° , 沿倾向延伸 300~1 600 m, 倾角为 28° 。厚度为 2.34~8.33 m, 平均厚度为 3.68 m。矿体的 Al_2O_3 含量为 43.07%~76.97%, 平均含量为 61.91%; SiO_2 含量为 2.8%~22.42%, 平均含量为 13.56%; Fe_2O_3 含量为 0.58%~14.43%, 平均含量为 4.25%; TiO_2 含量为 1.79%~4.73%, 平均含量为 2.88%; S 含量为 0.02%~11.20%, 平均含量为 1.37%; A/S 值为 2.09~27.50, 平均值为 4.57。

(4) IV号矿体。该矿体为下层矿体, 倾向 210° , 倾角为 30° , 厚度为 2.67 m。其中, Al_2O_3 含量为 46.48%, SiO_2 含量为 12.24%, A/S 值为 2.98。

3.2 礼庄寨铝土矿床

矿区内普遍发育含铝岩系, 圈定铝土矿体 3 个, 矿体呈长条状展布, 产状与上部地层一致, 东部走向 NWW, 西部走向逐渐转变为 EW, 倾角为 $13^\circ\sim 27^\circ$ (图 3)。

(1) I号矿体。该矿体主要呈似层状, 走向近 90° , 沿走向长 7.6 km, 倾向 180° , 沿倾向延伸 400~1 780 m, 倾角约 10° 。厚度为 0.80~17.98 m, 平均厚度为 4.24 m, 厚度变化大, 西部厚、东部薄。矿体的 Al_2O_3 含量为 40.60%~72.15%, 平均

含量为 61.84%; SiO_2 含量为 6.38%~23.77%, 平均含量为 12.71%; A/S 值为 1.83~11.31, 平均值为 4.87。

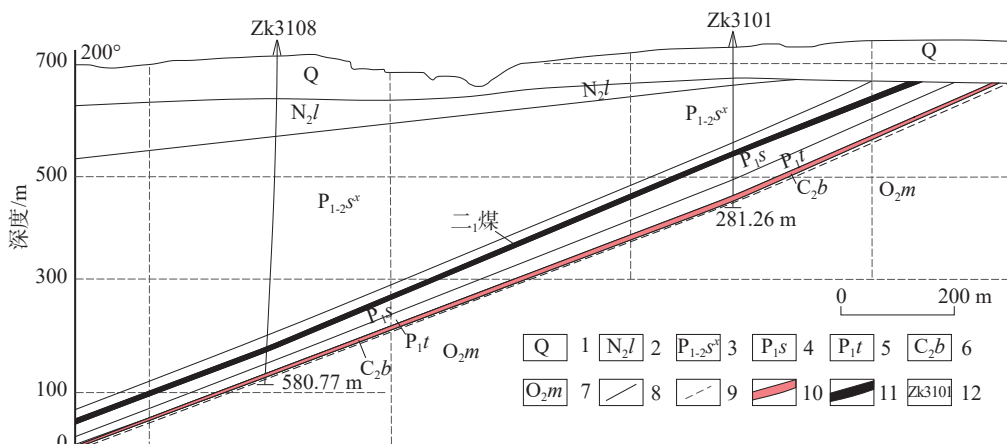
(2) II号矿体。该矿体主要呈透镜状产出, 沿走向长约 600 m, 倾向南偏西, 沿倾向延伸约 500 m, 厚度为 1.28 m。矿体的 Al_2O_3 含量为 40.15%, SiO_2 含量为 21.21%, A/S 值为 1.9。

(3) III号矿体。该矿体呈似层状, 走向近 100° , 沿走向长 4 km, 倾向 190° , 沿倾向延伸 >1 km, 倾角约 10° , 厚度为 1.43~4.9 m, 平均厚度为 2.40 m。矿体的 Al_2O_3 含量为 41.87%~66.19%, 平均含量为 59.10%; SiO_2 含量为 12.81%~21.88%, 平均含量为 13.25%; A/S 值为 1.91~5.17, 平均值为 4.3。

3.3 典型矿石物质组成、结构与构造

3.3.1 矿物组成

铝土矿的主要矿物为硬水铝石, 含量为 40%~85%, 其在高品位矿石中占 50% 以上, 其次为高岭石和伊利石(图 4(a)、图 4(c)和图 4(d))。硬水铝石多呈红褐色、绿黑色或灰白色, 主要为不规则的粒状, 少数为半自形粒状和无色透明板状晶体, 偏光显微镜下多呈红褐色、浅褐色、浅灰白色或无色, 变晶粒状集合体, 无色者呈自形-半自形板柱状, 粒径一般为 0.002~0.032 mm。高岭石含量为 1%~22%, 呈白色纤维状-鳞片状、致密状集合体(图 4(a)), 偏光显微镜下多呈显微鳞片状、纤维状, 少量呈显微粒状, 局部颗粒较大, 其



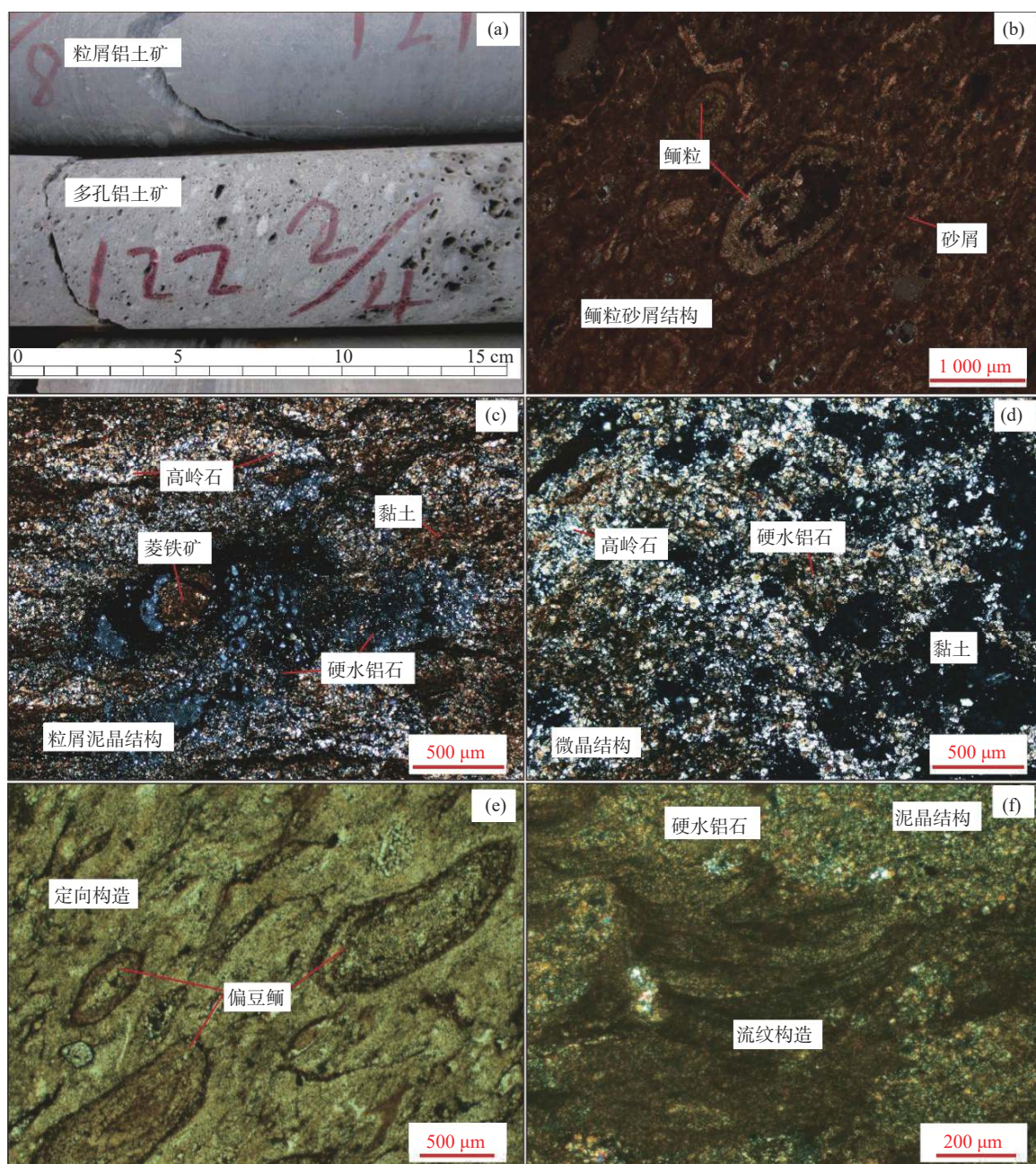
1. 第四系; 2. 洛阳组; 3. 石盒子组小风口段; 4. 山西组; 5. 太原组; 6. 本溪组; 7. 马家沟组; 8. 地层界线; 9. 含矿岩系沉积基底界线; 10. 铝土矿; 11. 煤层; 12. 钻孔编号

图3 礼庄寨铝土矿床 H31 勘探线剖面图(河南省地质调查院, 2015)

Fig. 3 Profile of H31 exploration line of the Lizhuangzhai bauxite deposit(Henan Geological Survey Institute, 2015)

集合体具有显微纹理且定向的特征,呈蠕虫状和扇状变晶,粒径一般为 0.006 mm 以下,最大粒径为 0.07 mm。伊利石含量为 1%~13%,多呈灰白色,部分呈淡绿色或被铁染呈浅黄色、黄褐色,鳞片状集合体,粒径一般<0.006 mm,常与高岭石交织分布。绿泥石含量最高为 12%,呈暗绿色,鳞片状或球粒状,多属鳞绿泥石。此外,还有菱铁矿、

黄铁矿、赤铁矿、针铁矿和磁铁矿等含铁矿物,金红石、少量锐钛矿和板钛矿以及微量钛铁矿和白钛石等含钛矿物。赤铁矿、针铁矿主要分布于浅表处(150 m 以浅)的矿石中,黄铁矿、菱铁矿主要分布于中深部的矿石中。脉石矿物主要为方解石、白云石以及锆石等,方解石、白云石主要见于矿石的微细裂隙中。



(a). 粒屑铝土矿; (b). 鲕粒砂屑结构(鲕粒-压扁砂屑-泥屑); (c). 粒屑泥晶结构(砂屑-泥屑); (d). 微晶结构(粉砂屑); (e). 定向构造(压扁鲕粒、砂屑); (f). 渗流构造

图4 渑池铝土矿矿石及其显微照片

Fig. 4 Bauxite ore and its photomicrographs of Mianchi bauxite deposit

3.3.2 矿石结构

铝土矿矿石以粒屑结构居多,豆鲕结构次之,少量重结晶结构。粒屑成分主要有内碎屑(砂屑、砾屑)和鲕(豆)粒等,次圆-次棱角状,成分主要为硬水铝石及少量高岭石。粒屑中硬水铝石的重结晶程度较高,多为0.01~0.06 mm的半自形粒状,且与少量黏土矿物及微量金红石和锐钛矿共生。根据粒屑与泥晶基质含量的多少及支撑类型的不同,粒屑结构(图4(a))还可细分为鲕粒砂屑结构(图4(b))、粒屑泥晶结构(图4(c)、图4(f))和重结晶结构(图4(d))等。鲕粒呈次圆状-扁平状,部分具薄皮鲕粒结构,可见铝土质同心鲕粒与菱铁质放射鲕粒,碎屑间被泥晶状硬水铝石及少量黏土矿物充填胶结,长轴大致定向排列。

3.3.3 矿石构造

矿石主要为块状构造,少量多孔构造(图4(a))、致密块状构造和定向构造等,偶见层理构造和渗流构造,浅部见土状构造。各类矿石结构、构造之间呈渐变过渡,分带界线模糊。矿石的产出层位、空间位置和含量变化的规律性差,具有间歇性动水环境、静水环境和往复动水环境混杂的分异特征。具体特征如下:

(1)块状构造。均一、致密,晶粒状、隐晶状矿石常具该构造特征。

(2)致密块状构造。主要是由硬水铝石重结晶形成的,隐晶状,较致密,碎后呈棱角状,可见微层理。

(3)定向构造。主要由硬水铝石组成的粒屑或扁圆状鲕粒、豆粒、碎屑组成,沿长轴平行层面定向排列(图4(e))。

(4)渗流构造。部分硬水铝石沿松软泥质及其空洞呈泥晶粒状,大致呈定向、渗流状沉积(图4(f))。

(5)层理构造。薄层状层理,层厚1~3 cm,主要分布在矿层的顶部。

4 地球化学特征

铝土矿的主要化学成分为 Al_2O_3 、 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 TiO_2 、 K_2O 、 CO_2 和S等,占总成分的98%以上。以矿床为单位进行统计(表2),渑池矿田铝土矿中 Al_2O_3 含量为60%~70%,浅部矿体的 Al_2O_3 含量略高于深部矿体; SiO_2 含量为8%~13%,浅部矿体的 SiO_2 含量略低于深部矿体; Fe_2O_3 含量为1%~5%; TiO_2 含量为2%~5%;S含量为0.1%~2.46%,深部矿体的S含量普遍高于浅部矿体。此外,铝土矿石普遍含Ga、 Li_2O 、 P_2O_5 、 V_2O_5 、Nb、Ge和轻稀土(LREE)等,总含量<5%,且它们在黏

表2 渑池矿田典型铝土矿床的地球化学特征

Table 2 Geochemical characteristics of typical bauxite deposits in Mianchi ore field

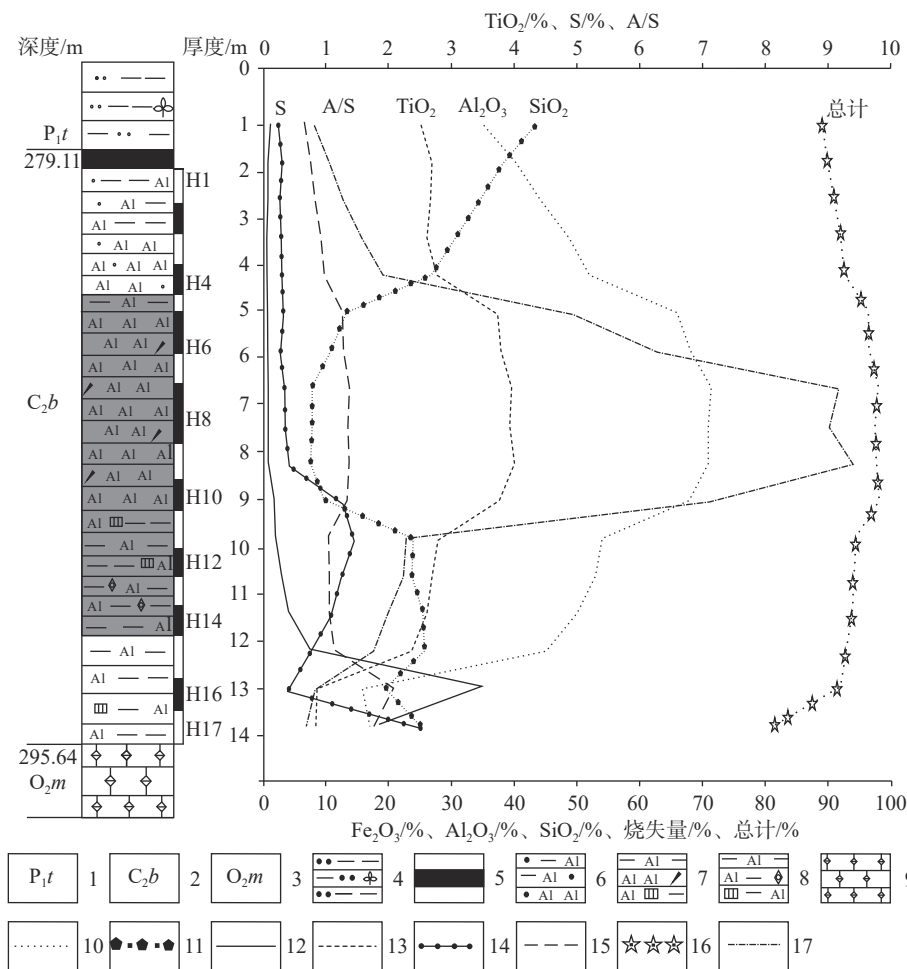
矿区	主要成分/%					A/S	备注
	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	TiO_2	S		
雷沟	68.79	8.72	3.19	2.94	0.57	7.90	浅部
段村	69.25	8.88	1.88	2.04	0.42	7.80	浅部
侯岭	63.05	12.93	3.68	2.96	1.21	4.90	深部
礼庄寨	61.79	12.49	4.89	3.67	2.46	4.90	浅-深部
贯沟	68.68	8.34	3.47	2.58	0.12	8.20	浅部
曹窑	63.67	9.97	5.29	4.58	0.10	6.40	浅部
贾家洼西段	66.42	11.74	2.72	2.75	0.15	5.70	浅部
贾家洼东矿段	66.55	10.77	3.38	3.06	0.19	6.20	浅部
曹窑深部	64.14	12.87	3.06	2.91	0.90	5.00	深部
小龙庙	65.08	12.50	3.63	2.38	0.59	4.60	浅-深部
杜家沟	54.31~78.01	3.67~21.58	1.00~17.03	2.65~4.44	—	—	浅部

注:数据来自矿区地质勘查报告。

土层中的含量普遍高于铝土矿层,这与黏土矿物的吸附性有关。

以侯岭铝土矿床 Zk11616 孔为例(图 5),含铝岩系中自下而上 Al_2O_3 、 TiO_2 含量由低升高后再降低, SiO_2 含量由高降低后再升高, Fe_2O_3 含

量逐渐降低。其中, Al_2O_3 含量与 SiO_2 含量呈负相关, Al_2O_3 含量与 TiO_2 含量呈正相关。S 主要富集于含铝岩系下部, Fe_2O_3 主要富集于含铝岩系底部, 铝土矿层下部的 SiO_2 含量与 S 含量呈正相关。



1. 太原组; 2. 本溪组; 3. 奥陶系; 4. 含植物化石粉砂质泥岩; 5. 煤线; 6. 含豆鲕铝土质泥岩; 7. 致密状碎屑铝土矿; 8. 含黄铁矿、菱铁矿铝土质泥岩; 9. 微晶白云岩; 10. Al_2O_3 ; 11. SiO_2 ; 12. Fe_2O_3 ; 13. TiO_2 ; 14. S; 15. 烧失量; 16. 总量; 17. 铝硅比

图5 侯岭铝土矿 Zk11616 钻孔含铝岩系主要化学成分垂向变化图

Fig. 5 Vertical variation curve of the primary chemical compositions of aluminium-bearing rock series in the Zk11616 drill core in the Houling bauxite deposit

5 讨论

5.1 风化强度及沉积环境分析

前人对沉积岩风化作用及沉积作用做了大量研究。Wedepohl (1969) 估算了上地壳的矿物体积百分数(近似值), 其中斜长石占 41%、石英占 21%、钾长石占 21%。Nesbitt and Young (1984) 提出上地壳化学风化的过程主要是长石的降解和黏土矿物

的形成, 长石中 Ca、Na 和 K 元素逐渐析出, 导致风化残余物中氧化铝与碱金属的比值增高, 并认为利用氧化铝与碱金属分子的比值可以计算化学蚀变指数(CIA)。徐小涛和邵龙义(2018)利用泥质岩的化学蚀变指数来分析物源区的风化程度, 提出采用 CIA 判断源区风化程度时需经钾交代作用校正, 并提出了化学蚀变指数(CIA)、化学风化指数(CIW)和成分变异指数(ICV)的计算及判断方法。

依据上述方法对侯岭铝土矿 Zk4803 孔含铝岩系相关指数进行计算(图 6),结果显示本溪组 ICV 均 <1 ,表明沉积物经历了再旋回作用和强烈的风化作用; CIA 为 80~100, CIW 为 90~100,说明含铝岩系物源区的风化作用较强烈,且为温

暖潮湿环境,铝土矿的成矿物质在成岩后仍经历了长期的淋滤作用;底部铁质黏土岩 CIA <85 , CIW 低于上部黏土岩及铝土矿层,反映了其物源区的风化程度及沉积环境存在差异,即含铝岩系具二元结构。

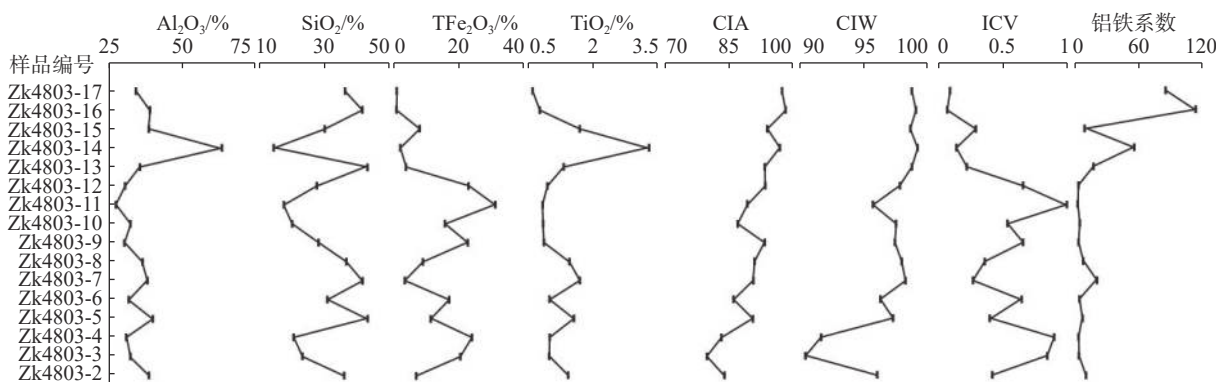


图6 侯岭铝土矿钻孔 Zk4803 含铝岩系的主要成分、CIA、CIW、ICV 关系图

Fig. 6 Relation of the main components, CIA, CIW, and ICV of the aluminum bearing rock series in the drill core Zk4803 of Houling bauxite deposit

5.2 矿物成因及物源指示

铝土矿与其上、下层的黏土岩中硬水铝石的含量决定了铝土矿的品位,其形成及富集过程即铝土矿的成矿作用过程。渑池矿田的铝土矿层与其上、下层黏土层中均产出硬水铝石,矿层的化学蚀变指数略高于上、下黏土岩层,指示了它们的物源区一致,沉积环境也相似。

铝土矿石中的主要矿物为硬水铝石,多数呈极细小、不规则的结晶粒状产出,具有半自形粒状、板状晶、泥晶和重结晶等特征,与高岭石、金红石和锐钛矿等矿物共生;粒屑中硬水铝石重结晶程度高,反映了硬水铝石的形成存在多个阶段。

铝土矿中硬水铝石有变质成因和地表结晶成因,其中地表结晶成因的硬水铝石通常沉淀在微生物广泛发育、碱性-还原的岩溶洼地中(Liu et al., 2017; Yang et al., 2022; 程顺波等, 2021; 刘蕾等, 2023)。渑池铝土矿中硬水铝石矿物共生组合及元素特征揭示了其主要为地表结晶成因(Liu et al., 2013)。高岭石成因较复杂,可以在地表风化作用阶段、沉积成岩阶段和后生作用阶段形成,渑池铝土矿中高岭石的形貌特征揭示了其主要形成于早期风化作用阶段和后生作用阶段(刘学飞等, 2012, 2020)。锐钛矿通常和硬水铝石、黄铁矿和菱铁矿等密切共生,揭示其形成于岩溶洼地碱性-

还原环境(冯跃文等, 2012; 马既民, 1991)。伊利石主要呈碎屑状,是地表长期风化作用的产物,局部显示其为后生作用阶段含硅地层水改造硬水铝石形成的(赵利华, 2020)。总之,硬水铝石、高岭石、伊利石等矿物可在风化、搬运、就位、成岩及成岩后等多阶段形成,反映铝土矿的形成经历了多期次、长时间的成矿作用(李军旗, 2011; 孙越英, 2005),含铝岩系沉积经历了多期次的风化-沉积旋回。

此外,郁山铝土矿中的锆石 U-Pb 年龄集中于 1 000 Ma 和 450 Ma(王庆飞和李中明, 2014),与北秦岭造山带元古代和古生代造山活动的时代相当。金红石、伊利石、锆石和钛铁矿等矿物组合也指示了物源与造山活动、区域变质作用等关系密切,反映了铝土矿成矿物源主要来自周边古陆。伊利石中微量元素含量特征指示铝土矿的物源为北秦岭造山带的火成岩和变质岩(Liu et al., 2020)。化学蚀变指数(CIA)、化学风化指数(CIW)和成分变异指数(ICV)等计算结果证明铝土矿成矿物质经历了长期的风化。总之,铝土矿属于长期风化残余物质沉积成岩的产物(Liu et al., 2010; 李中明等, 2009, 2012; 王庆飞等, 2012)。

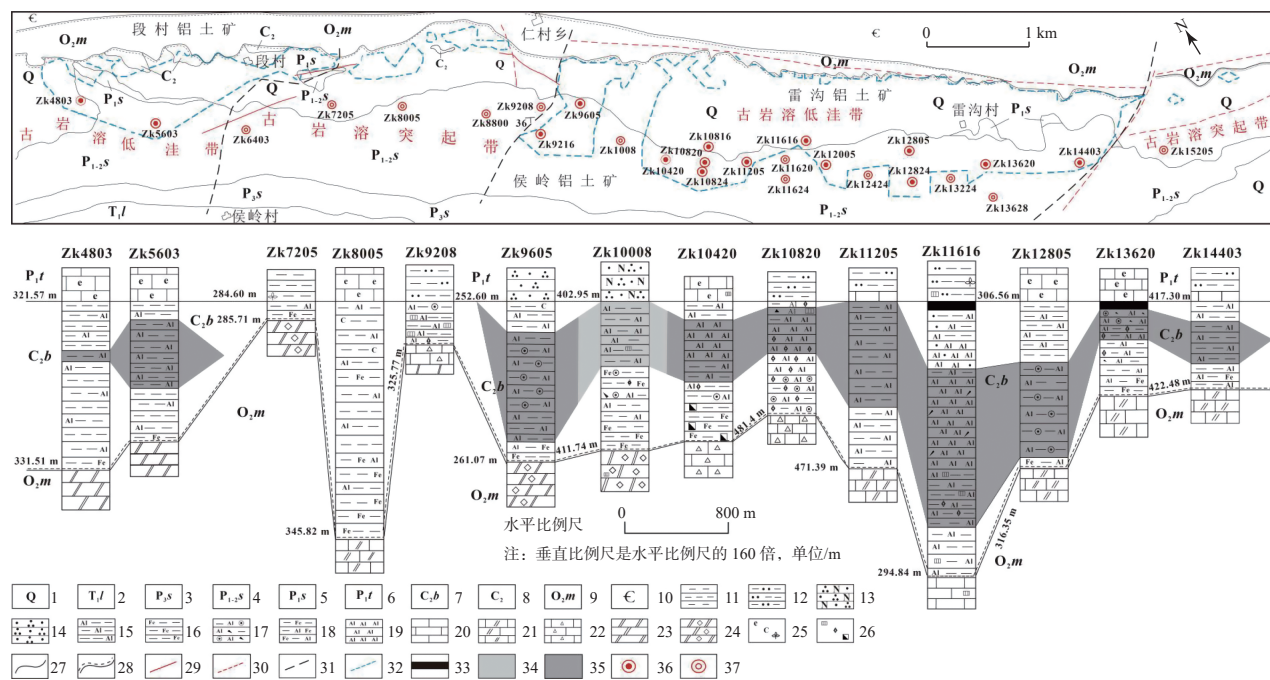
5.3 古岩溶控矿规律及成矿预测

温同想(1996)对豫西部分铝土矿床开展了岩

溶地貌单元分类及其与矿体之间控矿关系的相关研究,将铝土矿细分为溶斗、溶洼、溶沟和溶原等岩溶地貌控矿类型,普遍具有由溶斗、溶洼和溶沟的边部向中部低洼带富集成矿的特征,表现为矿体厚度逐渐增大, Al_2O_3 含量逐渐增高, SiO_2 、Fe 含量逐渐降低,高品位矿石往往形成于低洼带中部,具有致密块状、蜂窝状构造以及多次搬运再沉积等特征。类似地,渑池矿田铝土矿也严格赋存于含铝岩系的中上部,古岩溶地貌对铝土矿的

形成具有严格的控制作用。

以侯岭铝土矿床为例(图 7),浅部为段村、雷沟铝土矿床,含铝岩系单斜构造普遍发育,倾向 S 偏 W,段村矿床及其南部与雷沟矿床其南部铝土矿成矿条件差异明显,段村一带矿体多呈透镜体状,钻孔见矿率较低。雷沟一带矿体呈似层状,向深部稳定延伸,而雷沟东部矿体再次渐变为大透镜体状,自西向东古岩溶由地势高带渐变为地势低带,向东部再次渐变为地势高带。



1. 第四系; 2. 刘家沟组; 3. 孙家沟组; 4. 石盒子组; 5. 山西组; 6. 本溪组; 7. 太原组; 8. 本溪组-太原组; 9. 马家沟组; 10. 寒武系; 11. 泥岩; 12. 粉砂质泥岩; 13. 长石石英砂岩; 14. 石英砂岩; 15. 铝土质泥岩; 16. 铁质泥岩; 17. 豆鲕砂粒屑铝土矿; 18. 铁质黏土岩; 19. 块状铝土矿; 20. 灰岩; 21. 白云质灰岩; 22. 角砾灰岩; 23. 白云岩; 24. 细晶白云岩; 25. 生物碎屑、碳质、植物化石; 26. 黄铁矿、菱铁矿、褐铁矿; 27. 地质界线; 28. 角度不整合界线; 29. 实测断层; 30. 推测断层; 31. 推测古岩溶分带边界; 32. 铝土矿边界; 33. 煤线; 34. 耐火黏土矿; 35. 铝土矿体; 36. 见矿钻孔; 37. 未见矿钻孔

图 7 渑池侯岭铝土矿的古岩溶地貌、钻孔分布及钻孔柱状对比图(河南省地质调查院, 2015)

Fig. 7 Paleokarst terrain, borehole distribution and borehole column correlation of Houling bauxite deposit in Mianchi (Henan Geological Survey Institute, 2015)

通过钻孔柱状对比图也可分析古岩溶地貌的特征。钻孔 Zk7205、Zk9208 含铝岩系厚度小,且缺失太原组底部灰岩,反映了其填平补齐作用结束后仍处于地势较高的区域,是典型的古岩溶隆起地段。Zk8005 含铝岩系主要为厚大的铝土质泥岩,碎屑及豆鲕等风化搬运再沉积物质较少,仅形成了稳定水环境下的沉积物。由于受周边突起的底板碳酸盐岩保护,再次剥蚀搬运次数少,且难

以接受再次剥蚀搬运的碎屑沉积物,推测其属于地势相对较高的岩溶洼斗。Zk9605 段至 Zk14403 段的铝土矿普遍发育,具豆鲕状和碎屑状结构,发生了多期次搬运再沉积作用,接受了多期次的沉积物,矿体厚度、矿石特征等变化频繁,是典型的大面积古岩溶低洼段。因此,将段村、雷沟和侯岭一带的奥陶纪古岩溶地貌进行分带预测,划分了低洼带与隆起带的边界(图 7)。低洼带长 4~

6 km, 宽 2~3 km, 呈走向近 SN 向的不规则带状, 是铝土矿成矿的有利部位; 隆起带长 2~3 km, 宽 2~3 km, 多呈不规则的近椭圆状, 长轴走向 NE-SW 向, 其上部多形成薄层状矿体或无矿段。

5.4 成矿作用及成矿预测

中奥陶世—晚石炭世, 豫西地区存在长达 1.2 亿年的沉积间断, 长期的风化剥蚀导致奥陶系形成了喀斯特地貌, 为铝土矿的形成提供了就位空间及物质条件。含铝岩系沉积物的主要成分为铝、硅、铁矿物, 物源区具有强风化特征, 为潮坪沼泽相湿热气候环境。矿物特征、锆石定年和金红石微量元素组成等研究证实, 渑池含铝岩系沉积物质主要来源于北秦岭造山带的火成岩和变质岩, 铝土矿层接受了多源风化残积物(Liu et al., 2013, 2017; 冯跃文等, 2012; 刘蕾等, 2023; 赵利华, 2020; 刘欢等, 2022), 主要为风化残留物简单堆积成岩成矿。

渑池铝土矿的空间分布规律显示, 主矿体呈似层状、透镜状, 产于本溪组含铝岩系的中上部, 大厚矿体、多层矿体均产于岩溶洼斗内。矿石结构构造反映成矿物质经历了长期的静水环境、往复且动荡的动水环境及多期次搬运沉积作用, 沉积过程兼有机械搬运沉积和胶体化学沉积(李中明等, 2012; 周曙光等, 2023)。成矿物质由古陆向深海搬运的同时, 又自岩溶低洼带边部向中部搬运堆积, 形成了厚大矿体。压实成岩过程中, 水流经古岩溶低洼带向下渗流, 经底部溶洞、裂隙等排出, 形成以溶斗、溶洼为中心的多沉积中心堆积富集。长期的渗流作用为成岩后的淋滤作用提供了动力, 而长期的淋滤作用使硬水铝石进一步富集, 这是形成大厚矿体的重要因素。

奥陶纪—石炭纪, 华北克拉通整体抬升, 中奥陶世碳酸盐岩经历了强烈的风化作用和喀斯特化作用, 形成了不同形态的喀斯特地貌。中石炭世, 受华力西运动和邻区海侵作用的影响, 豫西地区逐渐下沉, 处于广阔的陆表海沉积环境(王建平等, 2009; 刘桃等, 2023)。渑池向斜南侧为秦岭隆起, 北缘为中条隆起, 古地形呈西高东低的趋势, 海侵方向自 NE 向 SW, 形成滨海及泻湖沉积环境, 该古构造格局为铝土矿成矿提供了沉积空间及成矿物质, 形成了以铝土矿细粒碎屑岩建造为主的

沉积(刘学飞等, 2020; 孙雪飞等, 2023)。晚石炭世, 海侵范围进一步扩大, 沉积了 1 套海陆交互相含煤建造地层覆盖于含铝岩系上部。早二叠世, 华力西运动加强, 豫西地区逐渐隆起, 以陆相盆地沉积为主, 形成了豫西地区主要的成煤期; 上部太原组宽缓的地层指示含铝岩系完成了对古岩溶地貌填平补齐作用, 也说明豫西地区的喀斯特地貌呈缓沉降、微倾斜的准平原地貌(薛虎和董茂兴, 1984; 邢文臣等, 1989)。自渑池向斜边缘至深部, 含铝岩系空间组合、结构构造、主要矿物和元素变化特征等差异较小, 无受盆地构造及沉积相控制的分带特征。渑池向斜的形成主要受铝土矿成岩后构造作用控制, 向斜保护了矿层免受剥蚀, 推测渑池盆地深部仍赋存大量优质的铝土矿。

6 结论

(1) 渑池铝土矿是长期风化残余堆积的产物, 成矿物质具有多源性, 经历了多期次、周期性沉积成矿, 长期的淋滤作用大幅度提升了铝土矿的质量。

(2) 渑池铝土矿具有多沉积中心成矿的特征, 高品位铝土矿严格产出于岩溶低洼带, 缓沉降、微倾斜的准平原状喀斯特地貌为大面积赋存铝土矿提供了空间条件。

(3) 渑池向斜中深部含铝岩系发育稳定, 推测向斜中深部仍赋存着大规模的铝土矿, 具有寻找优良大厚矿体的找矿空间。

References

- ALUMINUM CORPORATION OF CHINA LIMITED. 2004. Detailed investigation (middle) report of bauxite in Leigou mining area, Mianchi county, Henan Province[R]. Aluminum Corporation of China Limited, 12-24 (in Chinese).
- ALUMINUM CORPORATION OF CHINA LIMITED. 2009. Verification report on bauxite resource reserve in Duan village, Mianchi county, Zhongzhou branch of aluminum corporation of China limited[R]. Aluminum Corporation of China Limited, 8-17 (in Chinese).
- CHENG S B, LIU A S, CUI S, LI R Z, WEI Y S. 2021. Mineralization process of Permian karst bauxite in western Guangxi[J]. Earth Science, 46(8): 2697-2710 (in Chinese with English abstract).

- FENG Y W, LIU X F, LI Z M, CAI S H. 2012. Mineral composition and characteristics of the Guangou Bauxite deposit in Sanmenxia city, Henan Province[J]. *Geology and Exploration*, 48(3): 471-478 (in Chinese with English abstract).
- HENAN GEOLOGICAL SURVEY INSTITUTE. 2014. Report on the investigation and evaluation results of bauxite mines in Lizhuangzhai area, Mianchi, Henan Province[R]. Henan: Henan Geological Survey Institute, 37-103 (in Chinese).
- HENAN GEOLOGICAL SURVEY INSTITUTE. 2015. Survey report on bauxite mines in Lizhuangzhai area, Mianchi county, Henan Province[R]. Henan: Henan Geological Survey Institute, 27-62 (in Chinese).
- LEI X Q, LIU F C, TANG H D, XIONG Y W, LIU E Y. 2021. Characteristics of geological structure and its ore-controlling role in Shanzhou-Mianchi-Xin'an bauxite metallogenic belt, western Henan Province[J]. *Metal Mine*, 50(11): 142-150 (in Chinese with English abstract).
- LI J Q. 2011. Geological characteristics and prospecting direction of bauxite in Shisi-Beiye area, Xin'an county, Henan Province[J]. *Resources Survey & Environment*, 32(3): 199-206 (in Chinese with English abstract).
- LI Z M, YAN C H, LIU X F, ZHAO J M, LIU B S. 2012. Genesis of the Yushan concealed bauxite deposit in Xin'an county, Henan Province[J]. *Geology and Exploration*, 48(3): 421-429 (in Chinese with English abstract).
- LI Z M, ZHAO J M, WANG Q F, MA R S, JIAO Z C, LIU X F, SHI C R. 2009. Sedimentary environment research for the Yushan bauxite ore deposit in western Henan Province, China[J]. *Geoscience*, 23(3): 481-489 (in Chinese with English abstract).
- LIU X F. 2011. Mineral composition and mineralization process of aluminium (clay) soil in western Henan[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 1-176 (in Chinese).
- LIU L, LIU X F, MA Y, ZHAO L H, ZHANG S Q, SUN X F. 2023. Genetic mechanism of the large Carboniferous Aiyutou karstic bauxite in North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 39(2): 621-637 (in Chinese with English abstract).
- LIU X F, WANG Q F, DENG J, ZHANG Q Z, SUN S L, MENG J Y. 2010. Mineralogical and geochemical investigations of the Dajia Salento-type bauxite deposits, western Guangxi, China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 105(3): 137-152.
- LIU X F, WANG Q F, FENG Y W, LI Z M, CAI S H. 2013. Genesis of the Guangou karstic bauxite deposit in western Henan, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 55: 162-175.
- LIU X F, WANG Q F, LI Z M, FENG Y W, CAI S H, KANG W, WANG J Q, JIANG L L. 2012. Mineral genesis and evolutionary sequence of the bauxite deposits in Henan Province[J]. *Geology and Exploration*, 48(3): 449-459 (in Chinese with English abstract).
- LIU X F, WANG Q F, MA Y, LI Z M, ZHAO L H, ZHOU Z H, LIU B S, MA X L. 2020. Provenance of iron, bauxite and clay deposits of the Carboniferous Benxi Formation in southern margin of North China Craton: an example from Da'an bauxite and clay deposit of Sanmenxia area, Henan Province[J]. *Journal of Palaeogeography*, 22(5): 965-976 (in Chinese with English abstract).
- LIU X F, WANG Q F, ZHANG Q Z, YANG S J, ZHANG Y, LIANG Y Y, QING C. 2017. Transformation from Permian to quaternary bauxite in southwestern South China Block driven by superimposed orogeny: A case study from Sanhe ore deposit[J]. *Ore Geology Reviews*, 90: 998-1017.
- LIU H, HUO H D. 2022. The relationship between the shear zones flanking Tongbai orogenic belt and implications for the tectonic evolution[J]. *East China Geology*, 43(4): 514-526.
- LIU T, WU T, FANG C G, ZHANG C C, SHAO W, LIAO S B. 2023. Overpressure characteristics and genesis of the Triassic gas reservoirs in Wuwei Depression of Lower Yangtze Region[J]. *East China Geology*, 44(4): 415-423 (in Chinese with English abstract).
- LIU H, HUO H D. 2022. The relationship between the shear zones flanking Tongbai orogenic belt and implications for the tectonic evolution[J]. *East China Geology*, 43(4): 514-526 (in Chinese with English Abstract).
- MA J M. 1991. Mineralization characteristics and genetic analysis on Dujiagou bauxite deposit[J]. *Mineral Resources and Geology*, 5(5): 344-348, 356 (in Chinese with English abstract).
- NESBITT H W, YOUNG G M. 1984. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48(7): 1523-1534.
- SUN Y Y. 2005. Geological character and origin of Wacun clay mine in Henan[J]. *Resources Survey Environment*, 26(3): 199-204 (in Chinese with English abstract).
- SUN X F, LIU X F, ZUO P F, MA Y, ZHAO L H, LIU L. 2023. Source and metallogenic process of the Carboniferous Rencun large karstic bauxite deposit in the southern margin of North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 39(2): 600-620 (in Chinese with English abstract).
- SURVEYING AND MAPPING TEAM OF HENAN PROVINCIAL BUREAU OF GEOLOGY AND MINERAL EX-

- PLORATION AND DEVELOPMENT. 2010a. Verification report on resource reserve in the bauxite verification. Area of Jiajiawa west section in Mianchi county Henan Province[R]. Henan: Surveying and Mapping Team of Henan Provincial Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, 9-14 (in Chinese).
- SURVEYING AND MAPPING TEAM OF HENAN PROVINCIAL BUREAU OF GEOLOGY AND MINERAL EXPLORATION AND DEVELOPMENT. 2010b. Verification report on resource reserve in Caoyao bauxite mine verification area, Mianchi county, Henan Province[R]. Henan: Surveying and Mapping Team of Henan Provincial Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, 15-24 (in Chinese).
- THE SIXTH GEOLOGICAL GROUP OF HENAN NONFERROUS METALS GEOLOGY AND MINERAL RESOURCES BUREAU. 1985. Geological exploration report of the west section of Jiajiawa bauxite mining area, Mianchi County, Henan Province[R]. Henan: The sixth geological Group of Henan Nonferrous Metals Geology and Mineral Resources Bureau, 9-28 (in Chinese).
- WANG Q F, DENG J, LIU X F, ZHANG Q Z, LI Z M, KANG W, CAI S H, LI N. 2012. Review on research of bauxite geology and genesis in China[J]. *Geology and Exploration*, 48(3): 430-448 (in Chinese with English abstract).
- WANG Q F, DENG J, LIU X F, ZHAO R, CAI S H. 2016. Provenance of Late Carboniferous bauxite deposits in the North China Craton: new constraints on marginal arc construction and accretion processes[J]. *Gondwana Research*, 38: 86-98.
- WANG Q F, LI Z M. 2014. Research report on the enrichment law of bauxite in western Henan and the localization prediction of hidden deposits[R]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese).
- WANG J P, ZHOU H R, WANG X L, WANG S Y, PEI F, WANG J Y, WANG Z Q, HUANG X, GAO J H, GUO H, CHEN R B, BA Y, ZHAO T, WANG X Y. 2009. Lithofacies paleogeography and tectonic paleogeography of Mesoproterozoic-Paleozoic main metallogenic stages in North China Plate, Henan Province[R]. Henan: Henan Geological Survey Institute (in Chinese).
- WANG Y, ZHOU L Y, ZHAO L J, JI M, GAO H L. 2010. Palaeozoic uplands and unconformity in the North China Block: constraints from zircon LA-ICP-MS dating and geochemical analysis of bauxite[J]. *Terra Nova*, 22(4): 264-273.
- WEDEPOHL K H. 1969. Handbook of geochemistry[M]. Berlin: Springer.
- WEN T X. 1996. The geological characteristics of carboniferous bauxite in Henan[J]. *Journal of Geology & Mineral Resources of North China*, 11(4): 491-579 (in Chinese with English abstract).
- WU G Y, YAO G Y, LV X, HE Z Y, LI Z L, GUO B J. 1996. Henan bauxite deposits[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 113-140 (in Chinese).
- XING W C, WANG W B, JI S X, WU H R, ZHOU H M. 1989. Diagenetic mineralization of stratabound ore deposit[J]. *Bulletin of the Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources Chinese Academy of Geological Sciences*, 10(2): 52-62 (in Chinese with English abstract).
- XU X T, SHAO L Y. 2018. Limiting factors in utilization of chemical index of alteration of mudstones to quantify the degree of weathering in provenance[J]. *Journal of Palaeogeography*, 20(3): 515-522 (in Chinese).
- XUE H, DONG M X. 1984. A new method to determine and analyse the present and original occurrences of rock Formations[J]. *Bulletin of the Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources Chinese Academy of Geological Sciences*, 5(4): 54-65 (in Chinese with English abstract).
- YAN S. 2013. Study on geological characteristics and metallogenic regularity of Xiaolongmiao bauxite deposit in Sanmenxia, Henan[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 1-45 (in Chinese with English abstract).
- YANG S J, WANG Q F, LIU X F, KAN Z Y, SANTOSH M, DENG J. 2022. Global spatio-temporal variations and metallogenic diversity of karst bauxites and their tectonic, paleogeographic and paleoclimatic relationship with the Tethyan realm evolution[J]. *Earth-Science Reviews*, 233: 104184.
- YIMA COAL INDUSTRY CO, LTD. 2007. Detailed investigation report of deep bauxite in Caoyao coal mine, Mianchi county, Henan Province[R]. Yima: Yima Coal Industry (Group) Limited Liability Company, 20-55 (in Chinese).
- YUAN Y Q. 2005. Genesis of bauxite deposit in Henan[J]. *Mineral Resources and Geology*, 19(1): 52-56 (in Chinese with English abstract).
- ZHAO L H. 2020. Genesis of the Late Carboniferous karstic bauxite deposits in western Henan, southern North China Craton: taking the Rencun bauxite deposit in Mianchi mine area as an example[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 1-76 (in Chinese with English abstract).
- ZHAO L H, LIU X F. 2019. Metallogenic and tectonic implications of detrital zircon U-Pb, Hf isotopes, and detrital rutile geochemistry of Late Carboniferous karstic bauxite on the southern margin of the North China Craton[J]. *Lithos*, 350-351: 105222.

- ZHAO L H, LIU X F, YANG S J, MA X L, LIU L, SUN X F. 2021. Regional multi-sources of Carboniferous karstic bauxite deposits in North China Craton: insights from multi-proxy provenance systems[J]. *Sedimentary Geology*, 421: 105958.
- ZHENGZHOU YUYUAN GEOLOGICAL AND MINERAL EXPLORATION TECHNOLOGY SERVICE CO., LTD., YIMA COAL INDUSTRY GROUP CO., LTD., HENAN NONFERROUS METAL GEOLOGICAL AND MINERAL BUREAU. 2007. Detailed investigation report on deep bauxite in Caoyao coal mine, Mianchi county, Henan Province [R]. Yima Yima Coal Industry Group Co., Ltd., 20-55.
- ZHOU S G, CAI Y, DU J G, WU S, SHI K, LI Z T. 2023. Skarn mineralogical characteristics and ore sulfur isotope geochemistry of Tianmashan sulfur-gold deposit, Tongling area[J]. *East China Geology*, 44(1): 51-66(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 程顺波, 刘阿睢, 崔森, 李荣志, 韦义师. 2021. 桂西二叠纪喀斯特型铝土矿地质成矿过程[J]. *地球科学*, 46(8): 2697-2710.
- 冯跃文, 刘学飞, 李中明, 蔡书慧. 2012. 河南三门峡贯沟铝土矿矿物组成及其特征[J]. *地质与勘探*, 48(3): 471-478.
- 河南省地质调查院. 2014. 河南渑池礼庄寨地区铝土矿调查评价成果报告[R]. 郑州: 河南省地质调查院, 37-103.
- 河南省地质调查院. 2015. 河南省渑池县礼庄寨地区铝土矿普查报告[R]. 郑州: 河南省地质调查院, 27-62.
- 河南省地质矿产勘查开发局测绘队. 2010a. 河南省渑池县曹窑铝土矿核查区资源储量核查报告[R]. 郑州: 河南省地质矿产勘查开发局测绘队, 15-24.
- 河南省地质矿产勘查开发局测绘队. 2010b. 河南省渑池县贾家洼西段铝土矿核查区资源储量核查报告[R]. 郑州: 河南省地质矿产勘查开发局测绘队, 9-14.
- 河南省有色金属地质矿产局第六地质大队. 1985. 河南省渑池县贾家洼铝土矿区西段勘探地质报告[R]. 郑州: 河南省有色金属地质矿产局第六地质大队, 9-28.
- 雷显权, 刘福春, 唐华东, 熊有为, 刘恩彦. 2021. 豫西陕渑新铝土矿成矿带构造特征及其控矿作用[J]. *金属矿山*, 50(11): 142-150.
- 李军旗. 2011. 河南新安县石寺—北冶铝土矿地质特征及找矿方向[J]. *资源调查与环境*, 32(3): 199-206.
- 李中明, 燕长海, 刘学飞, 赵建敏, 刘百顺. 2012. 河南省新安县郁山隐伏铝土矿成因分析[J]. *地质与勘探*, 48(3): 421-429.
- 李中明, 赵建敏, 王庆飞, 马瑞申, 焦赞超, 刘学飞, 史春睿. 2009. 豫西郁山铝土矿床沉积环境分析[J]. *现代地质*, 23(3): 481-489.
- 刘学飞. 2011. 豫西铝(粘)土矿物质组成与成矿过程[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 1-176.
- 刘蕾, 刘学飞, 马遥, 赵利华, 张尚清, 孙雪飞. 2023. 华北石炭纪艾雨头大型喀斯特铝土矿成因机制研究[J]. *岩石学报*, 39(2): 621-637.
- 刘学飞, 王庆飞, 李中明, 冯跃文, 蔡书慧, 康微, 王佳奇, 江露露. 2012. 河南铝土矿矿物成因及其演化序列[J]. *地质与勘探*, 48(3): 449-459.
- 刘学飞, 王庆飞, 马遥, 李中明, 赵利华, 周智慧, 刘百顺, 马欣莉. 2020. 华北克拉通南缘石炭系本溪组铁-铝黏土矿物质来源: 以河南三门峡大安铝黏土矿床为例[J]. *古地理学报*, 22(5): 965-976.
- 刘桃, 吴通, 方朝刚, 章诚, 邵威, 廖圣兵. 2023. 下扬子地区无为凹陷三叠系气藏超压特征及其成因分析[J]. *华东地质*, 44(4): 415-423.
- 刘欢, 霍海东. 2022. 桐柏造山带两侧剪切带构造关系讨论及地质意义[J]. *华东地质*, 43(4): 514-526.
- 马既民. 1991. 杜家沟铝土矿成矿特征及成因分析[J]. *矿产与地质*, 5(5): 344-348, 356.
- 孙越英. 2005. 河南省洼村粘土矿床地质特征及成因探讨[J]. *资源调查与环境*, 26(3): 199-204.
- 孙雪飞, 刘学飞, 左鹏飞, 马遥, 赵利华, 刘蕾. 2023. 华北南缘石炭纪仁村大型喀斯特型铝土矿物质来源与成矿过程研究[J]. *岩石学报*, 39(2): 600-620.
- 王庆飞, 邓军, 刘学飞, 张起钻, 李中明, 康微, 蔡书慧, 李宁. 2012. 铝土矿地质与成因研究进展[J]. *地质与勘探*, 48(3): 430-448.
- 王庆飞, 李中明. 2014. 豫西铝土矿富集规律及隐伏矿床定位预测研究报告[R]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 王建平, 周洪瑞, 王训练, 王世炎, 裴放, 王金友, 王自强, 黄秀, 高金汉, 郭辉, 陈瑞保, 巴燕, 赵甜, 王小玉. 2009. 河南省华北板块中元古代—古生代主要成矿期岩相古地理和构造古地理研究[R]. 郑州: 河南省地质调查院.
- 温同想. 1996. 河南石炭纪铝土矿地质特征[J]. *华北地质矿产杂志*, 11(4): 491-579.
- 吴国炎, 姚公一, 吕夏, 何振镛, 李忠烈, 郭保健. 1996. 河南铝土矿床[M]. 北京: 冶金工业出版社, 113-140.
- 邢文臣, 王文斌, 季绍新, 巫怀仁, 周汉民. 1989. 层控矿床的成岩成矿[J]. *中国地质科学院南京地质矿产研究所所刊*, 10(2): 52-62.
- 徐小涛, 邵龙义. 2018. 利用泥质岩化学蚀变指数分析物源区风化程度时的限制因素[J]. *古地理学报*, 20(3): 515-522.
- 薛虎, 董茂兴. 1984. 判析岩层现产状和原始产状的新方法[J]. *中国地质科学院南京地质矿产研究所所刊*, 5(4): 54-65.

- 闫石. 2013. 河南省三门峡市小龙庙铝土矿地质特征及成矿规律研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 1-45.
- 袁跃清. 2005. 河南省铝土矿床成因探讨[J]. 矿产与地质, 19(1): 52-56.
- 赵利华. 2020. 豫西晚石炭世喀斯特型铝土矿成因——以渑池仁村铝土矿为例[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 1-76.
- 郑州豫源地矿勘查技术服务有限公司, 义马煤业集团股份有限公司, 河南省有色金属地质矿产局. 2007. 河南省渑池县曹窑煤矿深部铝土矿详查报告[R]. 义马: 义马煤业集团股份有限公司, 20-55.
- 周曙光, 蔡杨, 杜建国, 吴硕, 施珂, 李孜腾. 2023. 铜陵天马山硫金矿床矽卡岩矿物学特征及矿石硫同位素地球化学研究[J]. 华东地质, 44(1): 51-66.
- 中国铝业股份有限公司. 2009. 中国铝业股份有限公司中州分公司渑池县段村铝土矿资源储量核实报告[R]. 北京: 中国铝业股份有限公司, 8-17.
- 中国铝业有限公司. 2004. 河南省渑池县雷沟矿区铝土矿详查(中间)报告[R]. 北京: 中国铝业有限公司, 12-24.

Geological characteristics and metallogenic regularity of bauxite in Mianchi, Henan Province

LIU Baishun¹, LIANG Rongrong², LI Zhongming³, LIU Lei², SUN Xuefei², LIU Xuefei²

(1. *Henan Institute of Geological Sciences Co., Ltd, Zhengzhou 450001, Henan, China*; 2. *School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China*; 3. *Henan Academy of Geology, Zhengzhou 450001, Henan, China*)

Abstract: The Mianchi bauxite field is an important bauxite accumulation area in western Henan, where more than 10 large bauxite deposits have been discovered. However, the low degree of comprehensive research on bauxite deposits has resulted in unclear metallogenic regularity and no deep metallogenic prediction has been carried out. This paper introduced geological background, orebody, ore minerals and geochemical characteristics of Mianchi bauxite field in detail, focusing on the orebody characteristics, mineral composition, ore structure and main chemical composition of Houling and Lizhuangzhai bauxite deposits. Based on the analysis of the chemical composition changing rule, the weathering intensity of provenance, the weathering depositional environment, the metallogenic materials and the metallogenic regularities in aluminum-bearing rock series, combined with the research results of lithofacies paleogeography and tectonic evolution of aluminum-bearing rock series, it is proved that Mianchi bauxite has experienced multi-stage and periodic deposition and is the product of long-term weathering residual accumulation. The ore-forming materials of bauxite in Mianchi is multi-source. Leaching during bauxite formation results in significant improvement in ore grade. The bauxite deposit has the characteristics of multi-sedimentary center mineralization controlled by paleo-karst terrain. During the forming of bauxite, the Mianchi area was a gently inclined peneplain karst terrain, and bauxite extensively enriched in this area. After multi-stage structural transformation after diagenesis, a tectonic pattern dominated by syncline was formed in Mianchi, which deeply buried the ore-bearing strata in the core and south wing of the syncline, and it is predicted that large-scale high-quality bauxite still exists in the middle and deep parts of the syncline.

Key words: Maichi; karstic bauxite; geological features; mineral composition; metallogenic regularity