

引用格式: 宋小军, 李占轲, 金中国, 等. 2026. 贵州务正道地区下二叠统大竹园组沉积旋回及沉积模式[J]. 沉积学报, DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2026.011.  
SONG Xiaojun, LI ZhanKe, JIN ZhongGuo, et al. 2026. Sedimentary Cycles and Models of the Lower Permian Dazhuyuan Formation in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen Area, Guizhou Province[J]. Acta Sedimentologica Sinica, DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2026.011.  
DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2026.011 CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2026.011

# 贵州务正道地区下二叠统大竹园组沉积旋回及沉积模式

宋小军<sup>1,2</sup>, 李占轲<sup>2</sup>, 金中国<sup>1,3</sup>, 叶霖<sup>4</sup>, 曾道国<sup>1</sup>, 范宏鹏<sup>4</sup>, 巩鑫<sup>1</sup>,  
苏永虎<sup>1</sup>, 周文龙<sup>1,5</sup>, 任永林<sup>1</sup>

1. 贵州省有色金属和核工业地质勘查局地质矿产勘查院, 贵阳 550005

2. 中国地质大学(武汉)资源学院, 武汉 430074

3. 贵州省地质矿产局, 贵阳 550004

4. 中国科学院地球化学研究所关键矿产成矿与预测全国重点实验室, 贵阳 550081

5. 贵州省地质矿产开发院, 贵阳 550081

**摘要** 【目的】贵州北部务川—正安—道真(务正道)地区含铝岩系为下二叠统大竹园组, 长期以来对其沉积盆地演化、沉积物质来源、成岩成矿与地质事件关系、矿产资源所属类型等认识依然存在较大争议。

【方法】基于地层学、岩石学、矿物学、地球化学、古地理学等方法, 研究大竹园组岩石类型、矿物共生组合、沉积物源、沉积环境、沉积旋回等特征。【结果】大竹园组主要由黏土岩、铝质岩、铝土矿组成, 沉积于半封闭海湾, 由北向南划分为道真海湾、滨海湿地及近海平原; 沉积物源以基底韩家店组铝硅酸盐岩为主; 古气候条件温暖湿润至炎热潮湿, 化学风化强度中等至强烈, 以富氧原始沉积与风氧化混合的半咸水为主; 至少存在两次沉积旋回。【结论】大竹园组受基底黄龙组碳酸盐岩溶蚀洼地与韩家店组铝硅酸盐岩准平原化的控制, 具有层序性及旋回性, 其产出的铝土矿、锂矿属于沉积型; 含铝岩系经历了风化分解与搬运重组、渗流淋滤与潜流胶结、同生叠加与后期改造等三个阶段, 具有同生、准同生、互叠加、再改造、差异成矿等特征; 基于此, 建立了贵州务正道地区下二叠统大竹园组沉积模式。

**关键词** 含铝岩系; 沉积型铝土矿; 黏土型锂矿; 稀土资源; 关键金属资源; 沉积旋回; 沉积模式

**第一作者** 宋小军, 男, 1985年生, 本科, 高级工程师, 地质找矿及矿产资源, E-mail: 285008743@qq.com

**通信作者** 李占轲, 男, 教授, 博士生导师, 矿床地质和矿产勘查研究, E-mail: lizk@cug.edu.cn;

曾道国, 男, 硕士, 正高级工程师, 矿产勘查及技术管理, E-mail: 826845843@qq.com

中图分类号: P618.45 P534.46 P588.22 文献标志码: A 文章编号: 1000-0550(2025)00-0000-00

## 0 引言

晚古生代中期是古特提斯域铝土矿床重要的成矿阶段(罗培麒等, 2023; 徐林刚等, 2023), 分布于我国华北中部和华南地区(申博恒等, 2022); 含铝岩系形成之前经历了漫长的沉积间断, 为其成岩成矿提供时间与空间保障(高兰等, 2014; 杜远生等, 2026)。贵州务正道地区含铝岩系为下二叠统大竹园组( $P_{1d}$ ), 超覆于基底黄龙组( $C_2h$ )碳酸盐岩或

收稿日期: 2025-12-11; 收修改稿日期: 2026-03-26

基金项目: 贵州省“甲秀之光”访问学者研修培养项目(2025)2; 贵州省铝土矿探矿顶尖专家团队(CXTD(2025)006); 贵州省新一轮找矿突破战略行动项目(2023)119, (2025)71; 中国科学院战略性先导科技专项(XDA0430103); 贵州省科技支撑项目(2025)070

韩家店组 (*S<sub>1h</sub>*) 铝硅酸盐岩侵蚀面之上 (杜远生等, 2013), 其产出的铝土矿是我国二叠纪铝土矿床的典型代表 (Yu *et al.*, 2019; 余文超等, 2023)。近年来已发现大型铝土矿床 10 余处, 累计探获资源量逾 7 亿吨 (武国辉等, 2006; 金中国等, 2011, 2018b, 2023), 另外探寻还打岩、蕨基塘、白果坪、华尖、古城等多个黏土型锂矿床, 并实现深部找矿突破 (范宏鹏等, 2021; 宋小军等, 2021, 2023)。此外, 勘查过程中发现 *P<sub>1d</sub>* 除产出铝土矿 (Al)、锂矿 (Li) 外, 还富集铁 (Fe)、钛 (Ti)、镓 (Ga)、钪 (Sc)、稀土 (REE) 等金属元素 (宋小军等, 2025a, 2025b, 2025c)。同期, 前人开展了务正道地区铝土矿成矿地质背景、成矿环境 (Gu *et al.*, 2013a)、成矿规律及找矿预测等研究 (杜远生和余文超, 2020), 揭示了铝土矿物质来源、成矿作用及成矿过程 (Zhou *et al.*, 2022), 并建立了成矿模式 (金中国等, 2018c; Li *et al.*, 2020), 形成了大量的理论成果。然而, 这些成果侧重于对铝土矿的单一认识, 缺乏对含铝岩系的整体研究, 特别是对其层序性、旋回性等基本沉积特征的研究更加薄弱, 以至于对务正道地区含铝岩系沉积盆地演化、沉积物质来源、成岩成矿与地质事件关系、矿产资源所属类型等认识依然存在较大争议, 制约了沉积模式的建立与统一, 也限制了 Li、REE 等的勘查与开发 (温汉捷等, 2020)。

铝土矿形成于强化学风化条件, 受湿热古气候 (Yu *et al.*, 2019; 余文超等, 2023)、较长暴露淋滤期、低洼古地貌等成矿条件与空间的制约 (金中国等, 2018c; Li *et al.*, 2020); 铝土矿分为红土型、喀斯特型、沉积型三种 (唐波等, 2021; 杜远生等, 2024), 而务正道地区铝土矿、锂矿等矿产资源是否为沉积型, 可以根据成矿体系中沉积物或沉积域是否具有层序性、旋回性等基本沉积特征进行判断 (杜远生等, 2026)。其中, 沉积层序是沉积物的成分、粒度、颜色及结构差异显现的成层或层状构造, 沉积域在垂向上与成因关联的沉积相发生改变后而形成的组合序列, 反映不同沉积阶段 (沉积作用) 性质的变化, 与风化作用、水动力作用、叠加改造等条件密切相关 (张启连等, 2024)。沉积旋回是指沉积物在不同沉积阶段 (沉积作用) 按一定规律周期性出现的组合次序, 沉积域常表现为沉积序列或岩相的交替重复变化, 与岩石圈事件 (超大陆旋回聚合与裂解)、气候事件 (冰室、温室、暖室气候转换)、古海平面升降 (海侵、海退) 等重大地质事件密切相关 (李维波等, 2015; 杜远生等, 2020b)。

含铝岩系成岩成矿是复杂的、多变的、多阶段的、可改造的沉积过程 (徐林刚等, 2023; 余文超等, 2023)。母岩或原岩经风化后矿物被分解, 大量金属阳离子流失; 而残余金属转变为氧化物或氢氧化物, 形成风化产物, 为含铝初始物源 (杜远生等, 2024; 宋小军等, 2025c); 初始物源经搬运作用后迁移至负地形或盆地中进行重组, 在适宜的沉积环境中经成岩、矿化

作用形成初始含铝岩系（杜远生等，2013，2026）；与此同时，初始含铝岩系持续进行风化分解、搬运重组、渗流淋滤、潜流胶结等地质作用且相互同生叠加，最终经后期改造作用成岩成矿，具有层序性、旋回性等基本沉积特征。因此，对与含铝岩系成岩成矿相关的沉积盆地演化、沉积物源分析、沉积环境判别、沉积旋回特征等进行研究具有重要意义（杜远生等，2020a，2020b；宋小军等，2025c），也是本文建立务正道地区下二叠统大竹园组沉积模式的理论基础。

## 1 地质背景概述

贵州务正道地区位于渝南—黔北—黔中 Al-Fe-Li-Ti 等关键金属资源成矿带上（胡瑞忠等，2020；宋小军等，2021，2025c），大地构造为扬子地块南部被动边缘褶冲带（金中国等，2015，2019；毛景文等，2019）；本文黔北地区泛指贵州北部，包括桐梓以东、沿河以西、武隆以南、湄潭以北的区域；黔中地区泛指贵州中部，包括织金以东、凯里以西、遵义以南、龙里以北的区域（刘平等，2022；杜远生等，2026）（图 1a）。

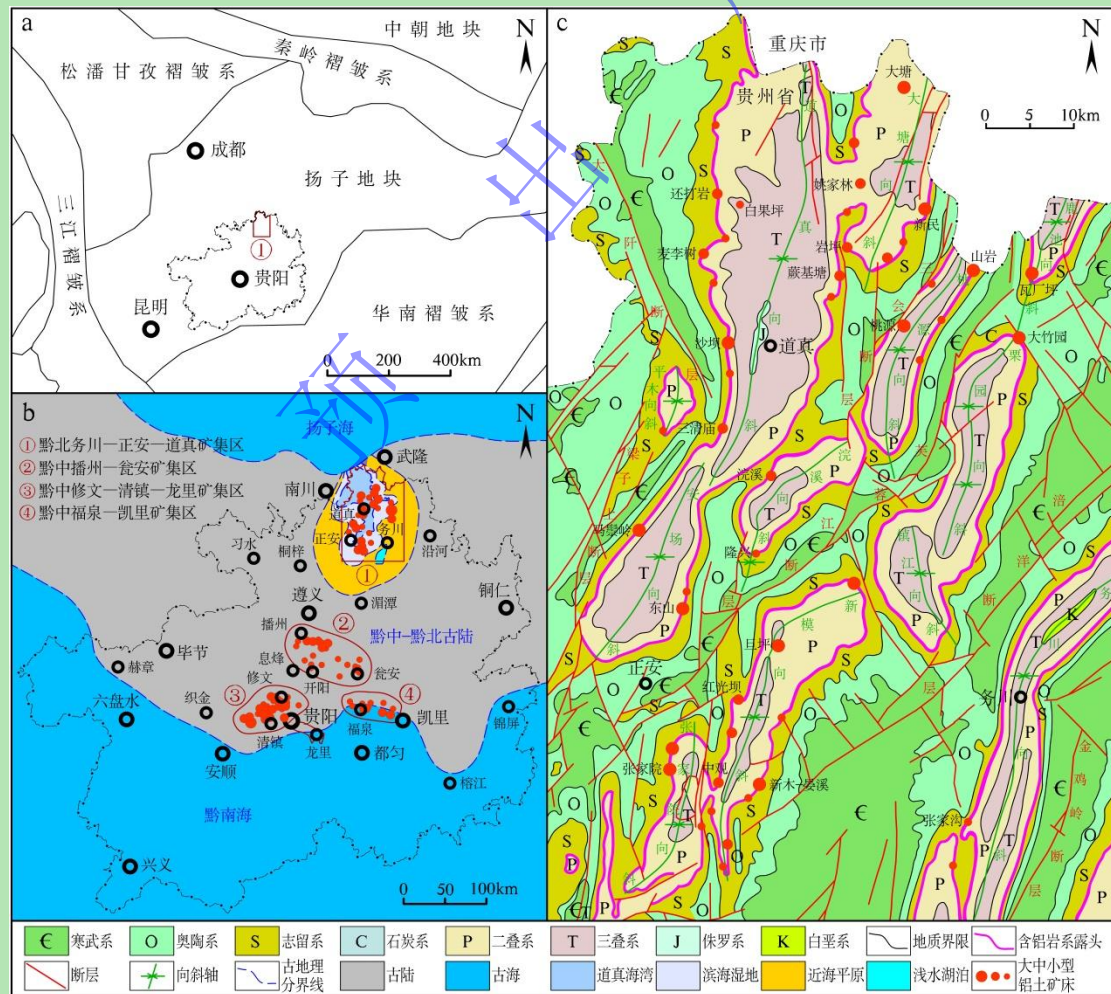


图 1 (a) 大地构造位置图（据金中国等，2023 修改）；(b) 早二叠世古地理分布图（据杜远生等，2026

修改)；(c) 务正道地区地质图

Fig.1 (a) Geotectonic location (modified from Jin *et al.*, 2023); (b) paleogeography of the Early Permian (modified from Du *et al.*, 2026); (c) geological diagram of the Wuchuan–Zheng’an–Daozhen area

扬子克拉通盆地是中国南方重要的地质构造单元(潘桂棠等, 2016; 胡瑞忠等, 2020), 形成于 Rodinia 超大陆时期(距今约 1 000 Ma), 裂解后成为独立陆块(吴福元等, 2020; 何登发, 2022)。中元古代末—晚古生代中, 扬子地块经历晋宁、武陵、雪峰、加里东、海西等地质运动(王剑等, 2024), 约束了陆块基底、褶皱构造、岩浆作用及海陆交替, 主导了矿产成因、空间分布、产出规模及其与地质事件的关系(宋小军等, 2025c)。

冈瓦纳冰期(起止时限为 350~270 Ma)是晚石炭世—早二叠世期间全球历史上一次重要的冰室气候事件(Weng *et al.*, 2019), 属于晚古生代大冰期(又称石炭纪—二叠纪大冰期)的核心阶段(杜远生等, 2020a, 2020b), 特点是冰川分布以冈瓦纳大陆(Gondwana)为中心, 冰碛岩广泛分布于南半球(王洪浩等, 2014; 张克信等, 2015)。冈瓦纳冰期开启前, 早石炭世全球气候温暖, 陆地植被繁盛, 扬子古陆台地相沉积稳定, 碳酸盐岩相对发育, C 同位素记录连续。冈瓦纳冰期开启后, 晚石炭世—早二叠世期间全球受泛大陆(Pangaea)形成、海西造山运动的影响, 导致有机 C 埋藏, 大气中 CO<sub>2</sub> 浓度骤降, O<sub>2</sub> 含量剧增, 形成冰室气候(何登发, 2022; 申博恒等, 2022); 冰川扩张(冰期)与收缩(间冰期)引起处于赤道附近扬子古陆周缘古海平面周期性的变化, 导致台地相沉积间断, 大陆硅酸盐风化作用增强, 为早二叠世扬子古陆含铝岩系成岩成矿提供了充足的准备(王洪浩等, 2014; 张克信等, 2015)。

早古生代中期—晚古生代中期, 扬子克拉通盆地沉积多套铝硅酸盐岩、碎屑岩及碳酸盐岩(耿元生等, 2016; 吴福元等, 2020; 何登发, 2022)。贵州受都匀、广西、紫云等运动以及晚古生代大冰期的影响, 黔北含铝岩系为 P<sub>1d</sub>, 黔中为下石炭统九架炉组(C<sub>1ij</sub>), 另外黔中花溪高坡—龙里草原一带为 FYC(宋小军等, 2025b)。依据贵州含铝岩系沉积时代、空间展布、形态规模存在显著的差异性(张七道等, 2024), 圈定了黔北务川—正安—道真, 黔中播州—瓮安, 黔中修文—清镇—龙里, 黔中福泉—凯里等四个矿集区(金中国等, 2019; 宋小军等, 2025c)(图 1b)。

务正道地区构造样式为燕山期华夏系, 表现出“侏罗山式”特征; 褶皱呈 NNE 向展布, 背斜舒展宽缓, 向斜狭长收敛; 背斜轴部或向斜两翼常发育 NNE 向逆冲断层, NW 向断裂次之(王亮等, 2019)。地层由老至新为  $\epsilon$ 、O、S、C、P、T、J、K 及少量 Q, 无火成岩与变质岩; 其中,  $\epsilon$  出露于背斜核部, T、J 及 K 分布于向斜核部, 缺失地层有 S<sub>2-3</sub>、D、C<sub>1</sub> 及部分 C<sub>2</sub>; P<sub>1d</sub> 保存于务正道地区 12 个向斜之内(宋小军等, 2025c)(图 1c)。

## 2 含铝岩系地质特征

### 2.1 层序地质特征

务正道地区含铝岩系由下至上依次划分为基底—主体—盖层（刘平等，2022；宋小军等，2025c），受全球性冈瓦纳冰期的影响存在沉积旋回I与沉积旋回II（图2）。

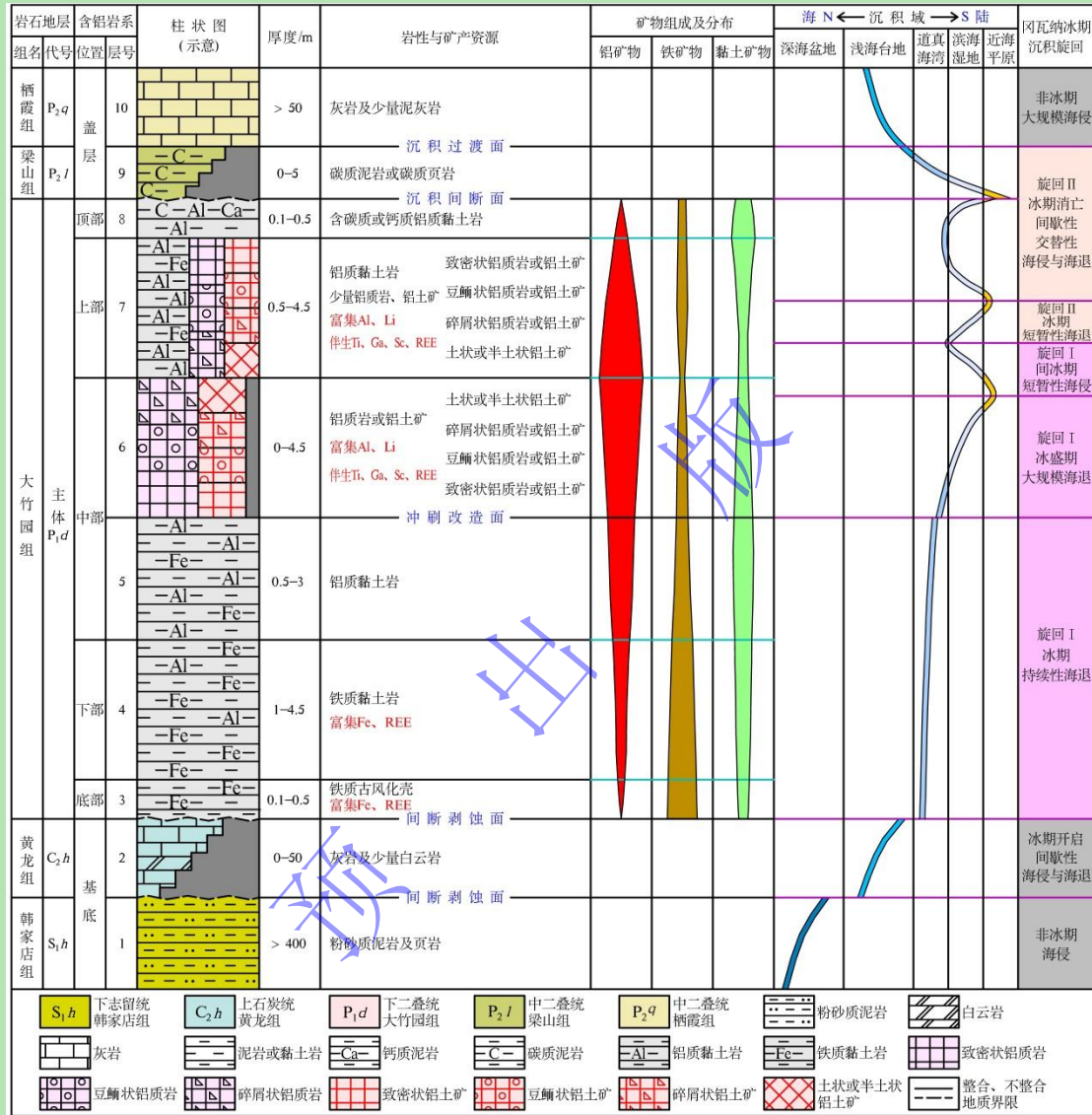


图2 含铝岩系层序特征及沉积旋回图

Fig.2 Sequence characteristics and sedimentary cycles of the aluminum bearing rock series

含铝岩系基底：第1~2层，下志留统韩家店组（S<sub>1</sub>h）或上石炭统黄龙组（C<sub>2</sub>h）。

第1层为S<sub>1</sub>h粉砂质泥岩及页岩，层厚超400m；属于非冰期温室气候深海盆地相沉积，陆源碎屑浊流建造以及韵律层理特征明显（余文超等，2023）；黔中—黔北古陆或隆起近海地带内S<sub>1</sub>h铝硅酸盐岩，系列沉积作用下发生准平原化（杜远生和余文超，2020；Li et al., 2020），为P<sub>1</sub>d沉积提供初始物源（罗培麒等，2023）。

第2层为  $C_2h$  灰岩及少量白云岩, 层厚 0~50 m, 属于冈瓦纳冰期开启前由非冰期温室气候逐渐向冰期冰室气候转变的浅海台地相沉积 (王洪浩等, 2014; 耿元生等, 2016);  $C_2h$  与下伏  $S_1h$  为沉积间断, 假整合或微角度不整合接触, 两者之间存在间断剥蚀面; 黔中—黔北古陆或隆起近海地带内  $C_2h$  碳酸盐岩, 易侵蚀形成岩溶洼地负地貌, 为  $P_{1d}$  提供沉积盆地。

含铝岩系主体: 第3~8层,  $P_{1d}$  黏土岩—铝质岩—铝土矿, 层厚 0~16 m, 属于冈瓦纳冰期道真海湾、滨海湿地及近海平原内海相—过渡相—陆相沉积;  $P_{1d}$  与下伏  $C_2h$  或  $S_1h$  为沉积间断, 假整合或微角度不整合接触, 两者之间同样存在间断剥蚀面 (刘平等, 2022; 宋小军等, 2025c)。受冈瓦纳冰期、古海平面升降、古地貌类型等条件的制约,  $P_{1d}$  在不同区域内的分布规律、岩性组合、矿产特征等具有明显的差异性。

第3层为  $P_{1d}$  底部铁质黏土岩或铁质古风化壳, 层厚 0.1~0.5 m; 属于旋回I冈瓦纳冰期海相沉积, 富集 Fe、REE; 以出现大量铁质结核或褐铁矿“铁帽”为标志, 表征  $P_{1d}$  沉积开始 (宋小军等, 2025c; 杜远生等, 2026)。

第4层为  $P_{1d}$  下部铁质黏土岩, 层厚 1.0~4.5 m; 属于旋回I冈瓦纳冰期海相沉积, 富集 Fe、REE; 由下至上一般表现为铝矿物开始增加、铁矿物逐渐减少、黏土矿物相对稳定的特征 (宋小军等, 2021, 2025a, 2025c)。

第5层为  $P_{1d}$  中部偏下铝质黏土岩, 层厚 0.5~3.0 m; 属于旋回I冈瓦纳冰期海相沉积; 由下至上一般表现为铝矿物持续增加、铁矿物减少、黏土矿物从稳定到减少的特征。

第6层为  $P_{1d}$  中部偏上致密状铝质岩或铝土矿、豆鲕状铝质岩或铝土矿、碎屑状铝质岩或铝土矿、土状或半土状铝土矿, 层厚 0~4.5 m; 属于旋回I冈瓦纳冰盛期—间冰期海相—过渡相—陆相—过渡相沉积, 富集 Al、Li, 伴生 Ti、Ga、Sc、REE; 由下至上一般表现为铝矿物持续增加、铁矿物及黏土矿物减少的特征; 因不同的沉积环境决定了不同的成岩成矿条件, 不同的矿物共生组合制约了不同的岩矿石类型, 故区内个别地段发育铝质岩但无铝土矿。第5层与第6层同属于  $P_{1d}$  中部, 上下之间存在冲刷改造面 (宋小军等, 2025c)。

第7层为  $P_{1d}$  上部铝质黏土岩或少量铝质岩或铝土矿, 层厚 0.5~4.5 m; 属于旋回I冈瓦纳冰期过渡相—海相沉积, 或旋回II冈瓦纳冰期—消亡期海相—过渡相—陆相—过渡相—海相或交替性重复沉积, 富集 Al、Li, 伴生 Ti、Ga、Sc、REE; 由下至上一般表现为铝矿物开始减少、铁矿物相对稳定、黏土矿物逐渐增加的特征 (宋小军等, 2025c)。

第8层为  $P_{1d}$  顶部含碳质或钙质铝质黏土岩, 层厚 0.1~0.5 m; 属于旋回II冈瓦纳冰期消亡阶段海相—过渡相—陆相—过渡相或交替性重复沉积; 以出现大量碳质或钙质为标志, 表

征  $P_{1d}$  沉积消失 (余文超等, 2023)。

含铝岩系盖层：第 9~10 层，中二叠统梁山组 ( $P_{2l}$ ) 或栖霞组 ( $P_{2q}$ )。

第 9 层为  $P_{2l}$  碳质泥岩或碳质页岩，层度 0~5 m；属于旋回 II 冈瓦纳冰期消亡后由冰期冰室气候逐渐向非冰期温室气候转变，海陆过渡相沉积，具有韵律层理性 (张七道等, 2024)；区内不完全发育，在个别地段全部缺失， $P_{2l}$  与下伏  $P_{1d}$  为沉积间断，假整合或微角度不整合接触。

第 10 层为  $P_{2q}$  灰岩及少量泥灰岩，层厚超 50 m，属于非冰期温室气候浅海台地相沉积； $P_{2q}$  与下伏  $P_{2l}$  为沉积过渡，整合接触，或与  $P_{1d}$  为沉积间断，假整合或微角度不整合接触 (宋小军等, 2025c)。

可见，务正道地区  $P_{1d}$  为黏土岩—铝质岩—铝土矿，是 Al、Li、Fe、Ti、Ga、Sc、REE 等金属元素在沉积环境半封闭海湾内，经系列沉积作用后形成的岩矿石组合 (杜远生等, 2024; 王登红等, 2024)；含铝岩系受晚石炭世—早二叠世全球性冈瓦纳冰期大规模海退及间歇性或交替性海侵的影响，至少存在两次沉积旋回 (杨江海等, 2017; 仲钰天等, 2023)。

## 2.2 矿产资源特征

务正道地区  $P_{1d}$  除产出铝土矿 (Al)、锂矿 (Li) 之外，还富集 Fe、Ti、Ga、Sc、REE 等金属元素 (金中国等, 2023; 宋小军等, 2025c)。矿产资源产出或富集具有明显的选择性和差异性，在  $P_{1d}$  中可以同体伴生，也可以异体共生，反映了  $P_{1d}$  岩层序列、矿物特征含量、岩矿石质量、化学组分与沉积环境之间的内在关系 (钟海仁等, 2019; 王辉等, 2023) (图 3)。

沉积型铝土矿主要富集于  $P_{1d}$  中上部，是产于  $S_{1h}$  铝硅酸盐岩，或  $C_{2h}$  碳酸盐岩之上的硬水铝石沉积型铝土矿床 (金中国等, 2019; 刘平等, 2022)；直接顶板与底板均为  $P_{1d}$  黏土岩或铝质岩。矿石自然类型有致密状、豆鲕状、碎屑状、土状或半土状等四种， $Al_2O_3$  介于 40%~77.50%，铝硅比 Al/Si 介于 1.83~44.41；一般情况下铝土矿  $Al_2O_3$ 、Al/Si 具有土状或半土状 > 碎屑状 ≥ 豆鲕状 > 致密状 (金中国等, 2015; 宋小军等, 2025c)。

黏土型锂矿  $Li_2O \geq 0.2\%$ ，主要富集于  $P_{1d}$  中上部，直接顶板为  $P_{1d}$  黏土岩、铝质岩、铝土矿，或  $P_{2l}$  碳质泥岩、碳质页岩，或  $P_{2q}$  灰岩、泥灰岩；直接底板为  $P_{1d}$  铝质岩、黏土岩、铝土矿。矿石类型以致密状铝质岩为主，致密状铝土矿次之； $Al_2O_3$  介于 39.18%~52.02%，平均 45.60%；Al/Si 介于 1.25~2.14，平均 1.70。碎屑状、豆鲕状铝质岩 (矿) 少有富集 Li，土状或半土状铝土矿一般不富集 Li，部分黏土岩极少富集 Li (宋小军等, 2025c)。

已有的研究表明，在沉积型铝土矿 (Al)、黏土型锂矿 (Li) 中伴生 Ti、Ga、Sc、REE

(金中国等, 2023)。其中, 铝土矿中  $TiO_2$  介于  $0.86\% \sim 3.25\%$ , 平均  $2.51\%$ ; Ga 介于  $0 \sim 131 \times 10^{-6}$ , 平均  $54.61 \times 10^{-6}$ ; Sc 介于  $2.38 \times 10^{-6} \sim 51.23 \times 10^{-6}$ , 平均  $20.59 \times 10^{-6}$ ;  $\Sigma REE$  介于  $13.45 \times 10^{-6} \sim 425.64 \times 10^{-6}$ , 平均  $87.51 \times 10^{-6}$ ;  $TiO_2$  一般为土状或半土状铝土矿  $>$  碎屑状铝土矿  $\geq$  豆鲕状铝土矿  $>$  致密状铝土矿, 与 Sc 相反; Ga、 $\Sigma REE$  一般为豆鲕状铝土矿  $\geq$  碎屑状铝土矿  $>$  土状或半土状铝土矿  $>$  致密状铝土矿 (宋小军等, 2025c)。锂矿中  $TiO_2$  介于  $0.65\% \sim 3.10\%$ , 平均  $1.75\%$ ; Ga 介于  $0 \sim 127 \times 10^{-6}$ , 平均  $44.99 \times 10^{-6}$ ; Sc 介于  $10.40 \times 10^{-6} \sim 51.23 \times 10^{-6}$ , 平均  $28.88 \times 10^{-6}$ ;  $\Sigma REE$  介于  $21.21 \times 10^{-6} \sim 450.84 \times 10^{-6}$ , 平均  $95.52 \times 10^{-6}$ 。

富铁稀土层主要位于  $P_{1d}$  下部及底部铁质黏土岩或铁质古风化壳之中 (Gu et al., 2013a); 其中,  $P_{1d}$  下部  $TFe_2O_3$  介于  $4.63\% \sim 14.01\%$ , 平均  $10.32\%$ ;  $\Sigma REE$  介于  $162.28 \times 10^{-6} \sim 301.70 \times 10^{-6}$ , 平均  $507.07 \times 10^{-6}$ ;  $P_{1d}$  底部  $TFe_2O_3$  介于  $10.36\% \sim 38.29\%$ , 平均  $25.20\%$ ;  $\Sigma REE$  介于  $86.16 \times 10^{-6} \sim 1753.93 \times 10^{-6}$ , 平均  $1082.91 \times 10^{-6}$ ; 一般情况下  $TFe_2O_3$ 、 $\Sigma REE$  总体具有  $P_{1d}$  下部  $<$   $P_{1d}$  底部。

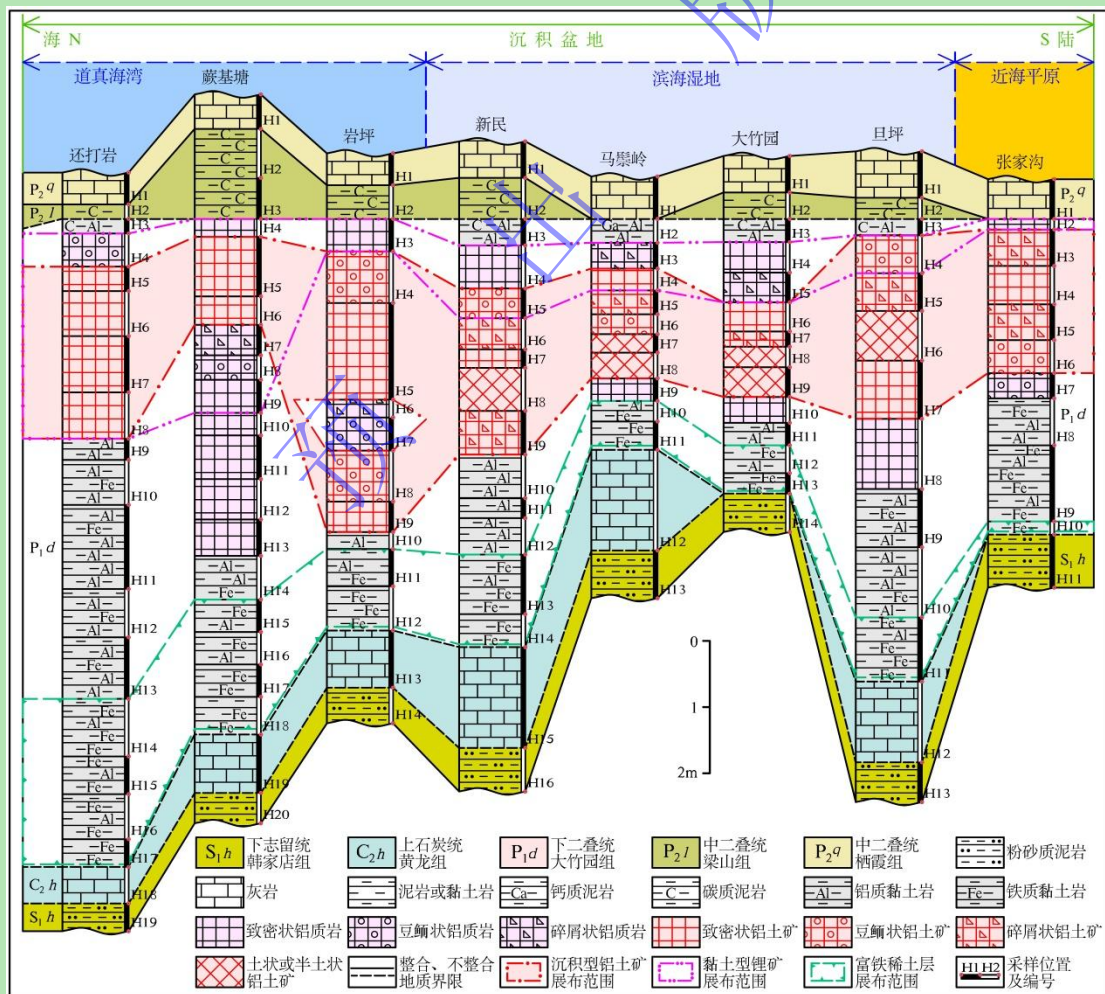


图3 含铝岩系矿产资源连接对比图

Fig.3 Mineral resource connections comparison diagram of the aluminum bearing rock series



为块状、致密状（图 4i, j）。

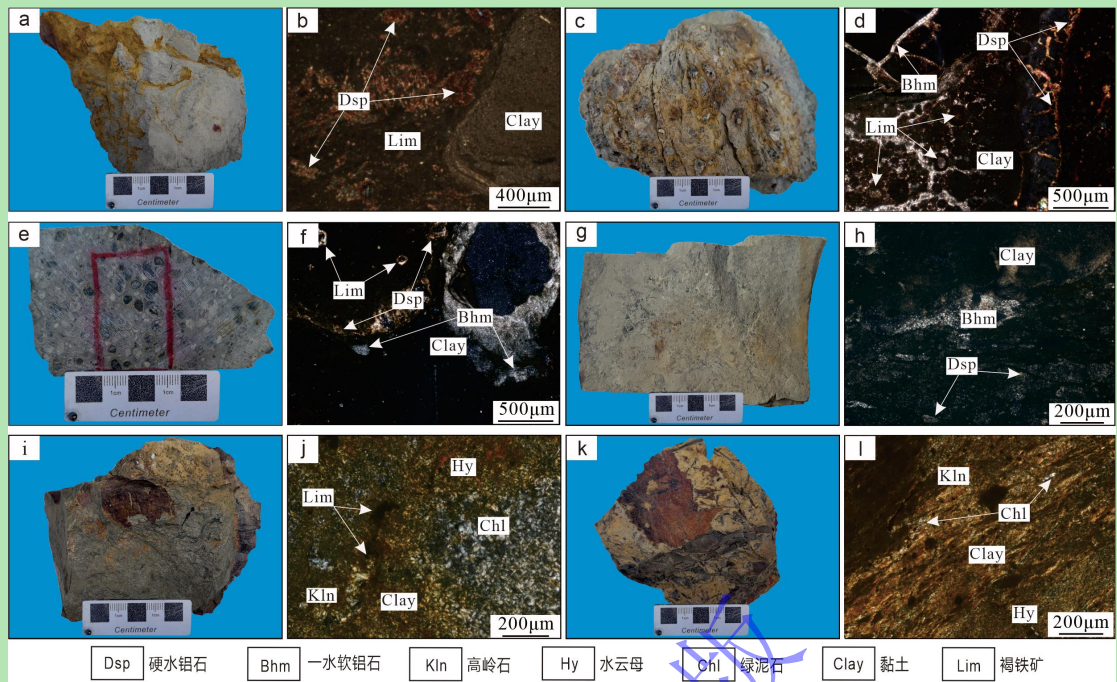


图 4 大竹园组岩矿石特征图

(a) 土状铝土矿标本；(b) 土状铝土矿镜下特征，正交偏光；(c) 碎屑状铝土矿标本；(d) 碎屑状铝土矿镜下特征，单偏光；(e) 豆鲕状铝土矿标本；(f) 豆鲕状铝土矿镜下特征，单偏光；(g) 致密状铝土矿标本；(h) 致密状铝土矿镜下特征，正交偏光；(i) 铁质黏土岩标本；(j) 铁质黏土岩镜下特征，正交偏光；(k) 含碳质铝质黏土岩标本；(l) 含碳质铝质黏土岩镜下特征，单偏光

Fig.4 Rock and ore characteristics of the Dazhuyuan Formation

表 1 大竹园组矿物组成 XRD 测试结果表 (%)

Table 1 Mineral composition by X-ray diffraction of the Dazhuyuan Formation (%)

采样 地层	地质 位置	所属 层号	岩矿石类型	铝矿物		铁矿物			黏土矿物			其他矿物			
				硬水铝石	一水软铝石	褐铁矿	黄铁矿	赤铁矿	高岭石	水云母	绿泥石	石英	白云石	方解石	锐钛矿
	顶部	8层	含碳质钙质铝质黏土岩	—	—	7.21	3.30	—	62.57	12.44	5.56	2.23	2.84	3.85	—
	上部	7层	铝质黏土岩	8.78	1.86	7.84	3.22	—	61.74	11.97	3.13	1.46	—	—	—
土状或半土状铝土矿			96.48	Y	0.57	0.26	—	0.24	Y	Y	Y	—	—	2.45	
碎屑状铝土矿			79.72	5.18	1.24	0.46	—	8.25	1.30	2.62	Y	—	1.23	Y	
豆鲕状铝土矿			72.54	4.17	3.15	1.87	—	13.25	4.27	0.75	Y	—	Y	—	
P <sub>1d</sub>	中部	6层	致密状铝土矿	66.46	2.48	3.34	1.68	1.28	16.18	4.29	0.47	2.82	Y	1.00	—
			碎屑状铝质岩	37.42	2.82	4.65	1.87	Y	39.63	8.93	1.92	1.52	—	Y	1.24
			豆鲕状铝质岩	31.11	3.65	5.58	2.18	0.89	42.94	8.60	1.68	1.82	1.05	Y	0.50
	中部	5层	致密状铝质岩	28.85	2.73	6.29	2.26	Y	46.36	9.28	0.82	2.53	—	Y	0.88
铝质黏土岩			10.21	0.78	9.32	2.25	0.48	56.74	8.76	10.25	1.21	—	—	—	
	下部	4层	铁质黏土岩	2.36	0.82	11.48	3.64	0.75	54.28	9.31	14.93	1.68	—	—	0.75
	底部	3层	铁质古风化壳	1.26	0.85	12.82	4.43	1.18	44.76	11.13	19.52	1.84	—	—	2.21

注：“Y”代表有，但含量极少，未参与计算；“—”代表未检出。

铝质黏土岩分布于 P<sub>1d</sub> 中部偏下第 5 层或上部第 7 层，铝矿物含量介于 10%~37.5%，铁矿物含量介于 0~25%，黏土矿物含量介于 62.5%~90%。通过镜下观察在硅质或泥质基质

中,发现少量铝矿物呈隐晶质或泥晶质、铁矿物呈砂砾屑颗粒胶结。岩石结构为隐晶或泥晶,构造为块状、致密状(杜远生和余文超, 2020; 宋小军等, 2025c)。

铝质岩分布于  $P_{1d}$  中上部第 6 层或第 7 层, 铝矿物含量介于 37.5%~62.5%, 铁矿物含量介于 0~20%, 黏土矿物含量介于 37.5%~62.5%。通过镜下观察在硅质或泥质基质中, 发现较多铝矿物呈隐晶质或泥晶质、少量铁矿物呈砂砾屑或豆鲕状颗粒胶结。岩石结构为砂砾屑、豆鲕状、隐晶或泥晶, 构造为块状、致密状(崔滔等, 2022; 罗靖伟等, 2025)。

铝土矿分布于  $P_{1d}$  中上部第 6 层或第 7 层, 铝矿物含量介于 62.5%~100%, 铁矿物含量介于 0~15%, 黏土矿物含量介于 0~37.5%。通过镜下观察在硅质或泥质基质中, 发现大量铝矿物呈隐晶质或泥晶质、少量铁矿物呈砂砾屑或豆鲕状颗粒胶结。矿石结构为豆鲕状、隐晶或泥晶, 构造为块状、致密状、土状或半土状(崔滔等, 2022)(图 4a~h)。

含碳质或钙质铝质黏土岩分布于  $P_{1d}$  顶部第 8 层, 铝矿物含量介于 0~10%, 铁矿物含量介于 0~10%, 黏土矿物含量介于 90%~100%。通过镜下观察在硅质或泥质基质中, 发现少量碳质或钙质呈碎屑状及鳞片状、铁矿物呈砂砾屑颗粒、铝矿物呈隐晶质或泥晶质胶结。岩石结构为碎屑、隐晶或泥晶, 构造为块状(图 4k~l)。

综上, 务正道地区  $P_{1d}$  岩矿石组合主要由黏土岩、铝质岩、铝土矿组成。岩矿石中常见三类矿物, 第一类是以硬水铝石为主、一水软铝石次之组成的铝矿物, 第二类是以褐铁矿为主、黄铁矿次之、少量赤铁矿组成的铁矿物, 第三类是以高岭石、水云母、绿泥石组成的黏土矿物, 以上三类矿物在  $P_{1d}$  中具有明显的分带性, 此消彼长(宋小军等, 2025c)。岩矿石结构主要有砂砾屑结构、豆鲕状结构、隐晶或泥晶结构三种。岩矿石构造主要块状构造、致密状构造、土状或半土状构造三种(刘平等, 2022)。

## 4.2 常量元素地球化学特征

根据务正道地区含铝岩系常量元素分析测试结果统计, 不同采样地层、地质位置、岩矿石类型样品中常量元素含量各不相同(表 2)。

$P_{2q}$  灰岩  $SiO_2$ 、 $MgO$ 、 $CaO$  等 3 项常量元素含量较高, 单项平均含量均  $>1\%$ ; 3 项含量之和介于 54.18%~60.93%, 平均 56.36%, 为主要化学组分。 $Al_2O_3$ 、 $TFe_2O_3$ 、 $TiO_2$ 、 $TS$ 、 $P_2O_5$ 、 $Li_2O$ 、 $MnO$ 、 $Na_2O$ 、 $K_2O$  等 9 项常量元素含量较低, 单项平均含量均  $<1\%$ ; 9 项含量之和介于 0.85%~4.56%, 平均 2.16%, 为次要化学组分。与地壳丰度值(黎彤, 1976)对比,  $P_{2q}$  中  $MnO$ 、 $CaO$  平均含量  $>$  地壳丰度值, 表现为富集, 富集系数  $K_{Mn}=1.89$ ,  $K_{Ca}=6.56$ ;  $Al_2O_3$ 、 $SiO_2$ 、 $TFe_2O_3$ 、 $TiO_2$ 、 $TS$ 、 $P_2O_5$ 、 $Li_2O$ 、 $MgO$ 、 $Na_2O$ 、 $K_2O$  平均含量  $<$  地壳丰度值, 表现为亏损。

表2 含铝岩系常量元素分析测试结果统计表 (%)

Table 2 Statistical analysis of test results content elements of the aluminum bearing rock series (%)

地层	P <sub>2</sub> q	P <sub>2</sub> l	P <sub>1</sub> d				C <sub>2</sub> h	S <sub>1</sub> h	P <sub>1</sub> d/	P <sub>1</sub> d/	地壳丰
类型	灰岩	碳质泥岩	黏土岩	铝质岩	铝土矿	大竹园组	灰岩	粉砂质泥岩	C <sub>2</sub> h	S <sub>1</sub> h	度值
样品数	8	7	38	21	32	91	6	8	/	/	/
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.15~1.71 (0.45)	1.81~23.67 (11.02)	25.03~45.66 (33.95)	33.68~51.40 (43.83)	40.00~77.50 (63.23)	25.03~77.50 (48.87)	0.10~1.88 (0.63)	14.14~27.52 (19.26)	77.93	2.54	15.69
SiO <sub>2</sub>	1.57~16.55 (4.59)	29.59~60.07 (46.17)	13.42~47.37 (39.10)	23.70~47.30 (33.35)	1.60~27.04 (12.84)	1.60~47.37 (26.36)	0.24~4.87 (1.46)	41.37~67.92 (59.54)	18.00	0.44	57.83
TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.24~2.16 (0.88)	1.50~30.34 (8.60)	1.05~38.29 (9.32)	0.60~14.99 (4.39)	0.71~26.58 (4.51)	0.60~38.29 (6.18)	0.21~5.58 (0.88)	4.17~9.39 (7.26)	6.99	0.85	6.86
TiO <sub>2</sub>	0.02~0.06 (0.03)	0.06~1.10 (0.41)	0.31~2.09 (0.88)	0.65~2.25 (1.38)	0.86~3.25 (2.51)	0.31~3.25 (1.70)	0.02~0.08 (0.05)	0.20~1.19 (0.41)	37.59	4.20	1.07
TS	0.01~0.03 (0.02)	0.03~4.69 (2.01)	0.03~6.55 (0.53)	0.01~8.23 (1.47)	0.03~8.05 (1.29)	0.01~8.23 (1.06)	0.01~0.04 (0.02)	0.01~0.33 (0.04)	43.84	28.82	0.04
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.02~0.31 (0.06)	0.03~0.10 (0.05)	0.04~0.18 (0.08)	0.03~0.15 (0.07)	0.03~0.12 (0.07)	0.03~0.18 (0.07)	0.02~0.11 (0.05)	0.04~0.15 (0.09)	1.40	0.82	0.27
Li <sub>2</sub> O	0~0.004 (0.002)	0.001~0.045 (0.015)	0~0.263 (0.076)	0.008~0.626 (0.291)	0~0.615 (0.123)	0~0.626 (0.141)	0~0.060 (0.009)	0~0.126 (0.019)	15.94	7.59	0.005
MnO	0.01~0.95 (0.32)	0.08~1.10 (0.61)	0~0.58 (0.05)	0~0.19 (0.04)	0~0.56 (0.06)	0~0.58 (0.05)	0.01~2.12 (0.20)	0.02~0.48 (0.08)	0.26	0.63	0.17
MgO	0.83~14.85 (4.05)	1.74~5.12 (3.61)	0.24~4.15 (1.18)	0.22~3.82 (1.28)	0.06~4.23 (1.12)	0.06~4.23 (1.17)	0.12~2.28 (1.70)	0.61~3.18 (1.99)	1.67	0.59	4.64
CaO	36.05~53.43 (47.72)	0.77~24.11 (10.91)	0.15~4.08 (0.79)	0.13~1.53 (0.64)	0.09~1.70 (0.50)	0.09~4.08 (0.63)	48.03~55.74 (53.70)	0.38~2.79 (1.26)	0.01	0.50	7.27
Na <sub>2</sub> O	0.17~0.48 (0.25)	0.15~0.31 (0.21)	0.18~1.45 (0.72)	0.13~1.79 (0.78)	0.07~1.73 (0.54)	0.07~1.79 (0.65)	0.06~0.74 (0.24)	0.09~0.91 (0.55)	2.71	1.19	3.11
K <sub>2</sub> O	0.03~0.43 (0.15)	0.07~7.90 (3.61)	0.17~5.89 (1.82)	0.10~5.89 (0.90)	0.02~1.46 (0.32)	0.02~5.89 (0.97)	0.02~0.35 (0.12)	0.30~4.53 (2.70)	7.90	0.36	2.05
LOI	36.96~43.59 (41.42)	9.42~25.59 (16.40)	5.15~22.25 (12.43)	8.30~16.36 (13.37)	11.04~18.47 (14.01)	5.15~22.25 (13.32)	38.60~43.18 (42.04)	2.69~15.84 (6.41)	0.32	2.08	/
Al/Si	0.03~0.53 (0.14)	0.04~0.80 (0.27)	0.63~2.20 (0.90)	0.85~1.75 (1.37)	1.83~44.41 (10.13)	0.63~44.41 (5.06)	0.07~2.34 (0.55)	0.21~0.64 (0.33)	9.22	15.15	/
CIA	0.32~3.25 (0.92)	6.84~81.94 (40.79)	78.64~97.81 (91.05)	79.26~98.90 (94.76)	93.51~99.55 (97.77)	78.64~99.55 (94.77)	0.18~3.75 (1.16)	67.56~92.42 (80.83)	81.70	1.17	/

注：“~”前为最小值，“~”后为最大值，“( )”内为平均值；铝硅比 Al/Si=w(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/w(SiO<sub>2</sub>)；地壳丰度值为元素黎彤值 (黎彤, 1976)，氧化物地壳丰度值为元素黎彤值按相应系数换算成质量分数；化学蚀变指数(CIA)={w(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/[w(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)+w(CaO)+w(Na<sub>2</sub>O)+w(K<sub>2</sub>O)]}×100，并采用 McLennan et al. (1993) 提出方法进行校正。

P<sub>2</sub>l 碳质泥岩 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiO<sub>2</sub>、TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TS、MgO、CaO、K<sub>2</sub>O 等 7 项常量元素含量较高，单项平均含量均 > 1%；7 项含量之和介于 78.09%~98.32%，平均 85.94%，为主要化学组分。TiO<sub>2</sub>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、Li<sub>2</sub>O、MnO、Na<sub>2</sub>O 等 5 项常量元素含量较低，单项平均含量均 < 1%；5 项含量之和介于 0.47%~2.47%，平均 1.30%，为次要化学组分。与地壳丰度值 (黎彤, 1976) 对比，P<sub>2</sub>l 中 TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TS、Li<sub>2</sub>O、MnO、CaO、K<sub>2</sub>O 平均含量 > 地壳丰度值，表现为富集，富集系数 K<sub>Fe</sub>=1.25, K<sub>S</sub>=50.19, K<sub>Li</sub>=3.23, K<sub>Mn</sub>=3.61, K<sub>Ca</sub>=1.50, K<sub>K</sub>=1.76；Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiO<sub>2</sub>、TiO<sub>2</sub>、

P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、MgO、Na<sub>2</sub>O 平均含量 < 地壳丰度值，表现为亏损。

P<sub>1d</sub> 黏土岩、铝质岩及铝土矿 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiO<sub>2</sub>、TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub>、TS、MgO 等 6 项常量元素含量较高，单项平均含量均 > 1%；6 项含量之和介于 71.02%~93.41%，平均 85.35%，为主要化学组分。P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、Li<sub>2</sub>O、MnO、CaO、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O 等 6 项常量元素含量较低，单项平均含量均 < 1%；6 项含量之和介于 0.38%~9.06%，平均 2.52%，为次要化学组分。与地壳丰度值（黎彤，1976）对比，P<sub>1d</sub> 中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub>、TS、Li<sub>2</sub>O 平均含量 > 地壳丰度值，表现为富集，富集系数  $K_{Al}=3.12$ ， $K_{Ti}=1.60$ ， $K_S=26.43$ ， $K_{Li}=31.23$ ；SiO<sub>2</sub>、TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、MnO、MgO、CaO、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O 平均含量 < 地壳丰度值，表现为亏损；其中，黏土岩中 Al、Fe、Li 富集，Ti 亏损；铝质岩及铝土矿中 Al、Ti、Li 富集，Fe 亏损。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 与 SiO<sub>2</sub> 呈负相关， $R^2=0.7973$ ；与 TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 呈负相关， $R^2=0.2997$ ；与 TiO<sub>2</sub> 呈正相关， $R^2=0.8387$ ；与 Li<sub>2</sub>O 呈弱正相关， $R^2=0.1665$ （图 5）。

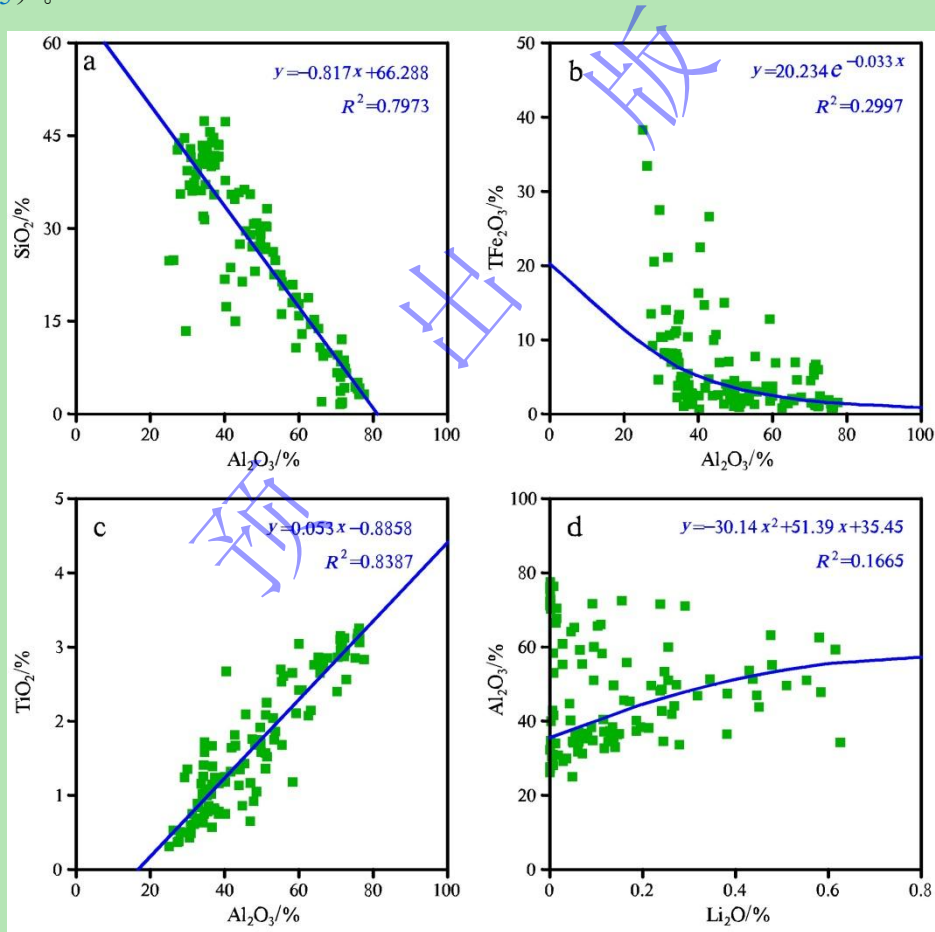


图 5 大竹园组常量元素相关性图

Fig.5 Constant element correlation diagram of the Dazhuyuan Formation

C<sub>2h</sub> 灰岩 SiO<sub>2</sub>、CaO、MgO 等 3 项常量元素含量较高，单项平均含量均 > 1%；3 项含量之和介于 52.93%~57.47%，平均 55.87%，为主要化学组分。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub>、TS、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、Li<sub>2</sub>O、MnO、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O 等 9 项常量元素含量较低，单项平均含量均 < 1%；9 项含

量之和介于 0.79%~8.35%，平均 2.21%，为次要化学组分。与地壳丰度值（黎彤，1976）对比， $C_2h$  中  $Li_2O$ 、 $MnO$ 、 $CaO$  平均含量 > 地壳丰度值，表现为富集，富集系数  $K_{Li}=1.96$ ， $K_{Mn}=1.21$ ， $K_{Ca}=7.39$ ； $Al_2O_3$ 、 $SiO_2$ 、 $TFe_2O_3$ 、 $TiO_2$ 、 $TS$ 、 $P_2O_5$ 、 $MgO$ 、 $Na_2O$ 、 $K_2O$  平均含量 < 地壳丰度值，表现为亏损；与  $P_{1d}$  对比， $C_2h$  中  $Al_2O_3$ 、 $SiO_2$ 、 $TFe_2O_3$ 、 $TiO_2$ 、 $TS$ 、 $P_2O_5$ 、 $Li_2O$ 、 $Na_2O$ 、 $K_2O$  平均含量 <  $P_{1d}$  平均含量， $MnO$ 、 $MgO$ 、 $CaO$  平均含量 >  $P_{1d}$  平均含量。

$S_{1h}$  粉砂质泥岩  $Al_2O_3$ 、 $SiO_2$ 、 $TFe_2O_3$ 、 $MgO$ 、 $CaO$ 、 $K_2O$  等 6 项常量元素含量较高，单项平均含量均 > 1%；6 项含量之和介于 83.03%~96.38%，平均 92.00%，为主要化学组分。 $TiO_2$ 、 $TS$ 、 $P_2O_5$ 、 $Li_2O$ 、 $MnO$ 、 $Na_2O$  等 6 项常量元素含量较低，单项平均含量均 < 1%；6 项含量之和介于 0.74%~2.47%，平均 1.18%，为次要化学组分。与地壳丰度值（黎彤，1976）对比， $S_{1h}$  中  $Al_2O_3$ 、 $SiO_2$ 、 $TFe_2O_3$ 、 $Li_2O$ 、 $K_2O$  平均含量 > 地壳丰度值，表现为富集，富集系数  $K_{Al}=1.23$ ， $K_{Si}=1.03$ ， $K_{Fe}=1.06$ ， $K_{Li}=4.11$ ， $K_K=1.32$ ； $TiO_2$ 、 $TS$ 、 $P_2O_5$ 、 $MnO$ 、 $MgO$ 、 $CaO$ 、 $Na_2O$  平均含量 < 地壳丰度值，表现为亏损；与  $P_{1d}$  对比， $S_{1h}$  中  $Al_2O_3$ 、 $TiO_2$ 、 $TS$ 、 $P_2O_5$ 、 $Li_2O$ 、 $MnO$ 、 $Na_2O$  平均含量 <  $P_{1d}$  平均含量， $SiO_2$ 、 $TFe_2O_3$ 、 $MgO$ 、 $CaO$ 、 $K_2O$  平均含量 >  $P_{1d}$  平均含量。

#### 4.3 微量元素地球化学特征

根据务正道地区含铝岩系微量元素分析测试结果统计，不同采样地层、地质位置、岩矿石类型样品中微量元素含量各不相同（表 3）。

$P_{2q}$  为灰岩，与地壳丰度值（黎彤，1976）对比， $P_{2q}$  中  $Sr$ 、 $U$  平均含量 > 地壳丰度值，表现为富集，富集系数  $K_{Sr}=4.80$ ， $K_U=3.92$ ； $Ga$ 、 $Sc$ 、 $Ba$ 、 $Th$ 、 $Ni$ 、 $Co$ 、 $Cu$ 、 $Cr$ 、 $Zr$ 、 $Rb$ 、 $V$ 、 $Cs$ 、 $Ta$ 、 $Be$ 、 $Nb$  平均含量 < 地壳丰度值，表现为亏损（图 6a）。

$P_{2l}$  为碳质泥岩，与地壳丰度值（黎彤，1976）对比， $P_{2l}$  中  $Th$ 、 $U$ 、 $Cr$ 、 $Zr$ 、 $V$ 、 $Cs$  平均含量 > 地壳丰度值，表现为富集，富集系数  $K_{Th}=3.27$ ， $K_U=2.72$ ， $K_{Cr}=1.96$ ， $K_{Zr}=1.48$ ， $K_V=1.30$ ， $K_{Cs}=1.85$ ； $Ga$ 、 $Sc$ 、 $Sr$ 、 $Ba$ 、 $Ni$ 、 $Co$ 、 $Cu$ 、 $Rb$ 、 $Ta$ 、 $Be$ 、 $Nb$  平均含量 < 地壳丰度值，表现为亏损（图 6a）。

$P_{1d}$  为黏土岩、铝质岩及铝土矿，与地壳丰度值（黎彤，1976）对比， $P_{1d}$  中  $Ga$ 、 $Sc$ 、 $Th$ 、 $U$ 、 $Cr$ 、 $Zr$ 、 $V$ 、 $Cs$ 、 $Ta$ 、 $Be$ 、 $Nb$  平均含量 > 地壳丰度值，表现为富集，富集系数  $K_{Ga}=2.49$ ， $K_{Sc}=1.23$ ， $K_{Th}=8.58$ ， $K_U=7.68$ ， $K_{Cr}=2.54$ ， $K_{Zr}=5.11$ ， $K_V=1.87$ ， $K_{Cs}=2.16$ ， $K_{Ta}=2.52$ ， $K_{Be}=4.43$ ， $K_{Nb}=2.62$ ； $Sr$ 、 $Ba$ 、 $Ni$ 、 $Co$ 、 $Cu$ 、 $Rb$  平均含量 < 地壳丰度值，表现为亏损（图 6a）； $Ga$ 、 $Sc$  在  $P_{1d}$  黏土岩、铝质岩及铝土矿中均具有明显的富集现象， $Ga$  在铝土矿中富集程度最高  $K_{Ga}=3.03$ ， $Sc$  在铝质岩中富集程度最高  $K_{Sc}=1.37$ （图 6b）。

表 3 含铝岩系微量元素分析测试结果统计表 ( $\times 10^{-6}$ )

Table 3 Statistical analysis of test results trace elements of the aluminum bearing rock series ( $\times 10^{-6}$ )

地层 类型	P <sub>2q</sub> 灰岩	P <sub>2l</sub> 碳质泥岩	P <sub>1d</sub>			C <sub>2h</sub> 灰岩	S <sub>1h</sub> 粉砂质泥岩	P <sub>1d'</sub> C <sub>2h</sub>	P <sub>1d'</sub> S <sub>1h</sub>	地壳丰 度值	
样品	8	7	38	21	32	91	6	8	/	/	/
Ga	0.17~5.28 (2.00)	0~25.01 (7.84)	0~55.90 (31.40)	0~127 (46.51)	0~131 (54.61)	0~131 (44.73)	0.08~3.35 (0.78)	0~33.84 (21.41)	57.05	2.09	18
Sc	1.55~4.07 (2.07)	2.08~35.42 (14.10)	0.36~57.68 (22.74)	8.86~39.32 (24.61)	2.38~51.23 (20.59)	0.36~57.68 (22.18)	0.51~36 (11.05)	0.23~38.60 (15.78)	2.01	1.41	18
Sr	859~4204 (2303.10)	120~555 (228.17)	12.80~669 (187.06)	13.20~226 (88.51)	7.40~249 (79.95)	7.40~669 (119.58)	73~826 (368.82)	22.80~226 (110.19)	0.32	1.09	480
Ba	3.59~50.60 (27.58)	19.10~365.73 (140.34)	7.10~536 (193.81)	5.20~613 (126.48)	2.31~297 (55.99)	2.31~613 (119.29)	2.26~124 (22.20)	7.02~613 (386.31)	5.37	0.31	390
Th	0.09~3.17 (1.18)	1.44~86.60 (18.97)	9.87~138 (41.19)	11~150 (59.91)	15.90~148 (51.92)	9.87~150 (49.78)	0.04~2.28 (0.48)	9.96~61.80 (19.14)	104.51	2.60	5.8
U	1.24~14 (6.66)	1.62~11 (4.63)	2.61~22.10 (9.67)	4.12~28.30 (13.25)	5.43~39.60 (15.68)	2.61~39.60 (13.05)	0.10~15.50 (2.42)	1.62~25.20 (4.42)	5.40	2.95	1.7
Ni	8.14~29 (19.18)	14~118 (35.27)	1.91~175 (54.33)	1.58~83.60 (24.67)	1.56~70.40 (19.11)	1.56~175 (32.71)	8.55~44 (16.59)	17.20~73.30 (43.29)	1.97	0.76	89
Co	3.24~19.80 (7.36)	6.18~33.20 (19.70)	0.64~111 (22.01)	0.42~28.80 (8.70)	1.66~76.90 (13.01)	0.42~111 (15.30)	3.58~63.50 (14.30)	11.70~33.20 (21.25)	1.07	0.72	25
Cu	0.08~27.42 (5.63)	2.74~21.75 (11.96)	2.24~109 (26.00)	3.12~48.70 (17.71)	4.95~111 (18.12)	2.24~111 (20.82)	0.22~43.20 (7.98)	4.76~89.10 (25.48)	2.61	0.82	63
Cr	7.66~62.60 (35.13)	34.30~576 (215.97)	33.50~2278 (271.10)	49.20~826 (279.36)	29.10~2278 (286.45)	29.10~2278 (279.56)	4.74~34.50 (9.89)	47~393 (102.97)	28.26	2.72	110
Zr	1.39~22.60 (9.32)	13~911 (192.23)	175~1 300 (510.44)	287~2 103 (753.25)	294~1 290 (746.71)	175~2 103 (664.55)	0.47~20.50 (4.53)	89~1 240 (214.25)	146.57	3.10	130
Rb	0.06~21 (6.82)	2.38~91.30 (41.80)	0.15~286 (73.99)	2.63~209 (33.74)	0.14~77.50 (12.33)	0.14~286 (38.56)	0.03~123 (9.88)	7.52~217 (167.87)	3.90	0.23	78
V	5.13~145 (46.53)	25.10~658 (181.43)	67.50~686 (224.09)	94.80~583 (285.05)	100~658 (282.53)	67.50~686 (262.39)	1~39.40 (8.69)	61~279 (129.47)	30.20	2.03	140
Cs	0.01~1.26 (0.51)	0.37~5.29 (2.60)	0.01~22.80 (5.02)	0.06~9.12 (2.11)	0.01~11.90 (1.84)	0.01~22.80 (3.02)	0.01~20.10 (4.78)	0.01~21.40 (8.23)	0.63	0.37	1.4
Ta	0.01~0.20 (0.09)	0.10~1.58 (0.56)	0.96~8.19 (2.74)	1.58~18.40 (4.33)	0.99~11.80 (4.93)	0.96~18.40 (4.03)	0.01~0.29 (0.08)	0.63~1.70 (1.20)	52.62	3.36	1.6
Be	0.08~0.99 (0.37)	0.47~1.59 (1.04)	0.13~11.50 (4.31)	1.60~9.80 (4.38)	1.65~27.70 (7.58)	0.13~27.70 (5.76)	0.02~10.20 (2.40)	0.04~10.80 (3.51)	2.40	1.64	1.3
Nb	0.15~2.68 (1.03)	1.52~25.60 (7.99)	13.50~67.50 (34.25)	27.96~162 (53.40)	29.50~100 (60.52)	13.50~162 (49.76)	0.06~2.20 (0.48)	7.27~29.89 (16.39)	103.02	3.04	19
Sr/Ba	27.62~268.52 (119.97)	0.39~17.40 (5.58)	0.22~35.07 (2.59)	0.12~40 (2.93)	0.22~40 (4.56)	0.12~40 (3.52)	1.73~144.47 (40.97)	0.14~3.25 (0.42)	0.09	8.38	/
Th/U	0.04~0.31 (0.15)	0.31~7.87 (3.62)	0.75~20.76 (5.28)	1.06~8.49 (4.62)	0.71~16.60 (3.91)	0.71~20.76 (4.54)	0.02~4.78 (0.93)	0.86~7.93 (5.72)	4.88	0.79	/
Ni/C o	0.77~6.17 (3.49)	0.73~4.28 (1.80)	0.16~19.51 (3.89)	0.21~120.88 (8.54)	0.13~13.75 (2.66)	0.13~120.88 (4.31)	0.20~4.26 (2.37)	0.73~6.26 (2.20)	1.82	1.96	/
Sr/Cu	35.16~19513 (2759.07)	5.83~202.55 (48.77)	0.77~70.98 (12.66)	0.49~48.72 (7.13)	0.28~27.40 (6.98)	0.28~70.98 (9.02)	7.11~3660 (336.11)	0.73~32.77 (7.34)	0.03	1.23	/

注：“~”前为最小值，“~”后为最大值，“( )”内为平均值；地壳丰度值据黎彤(1976)。

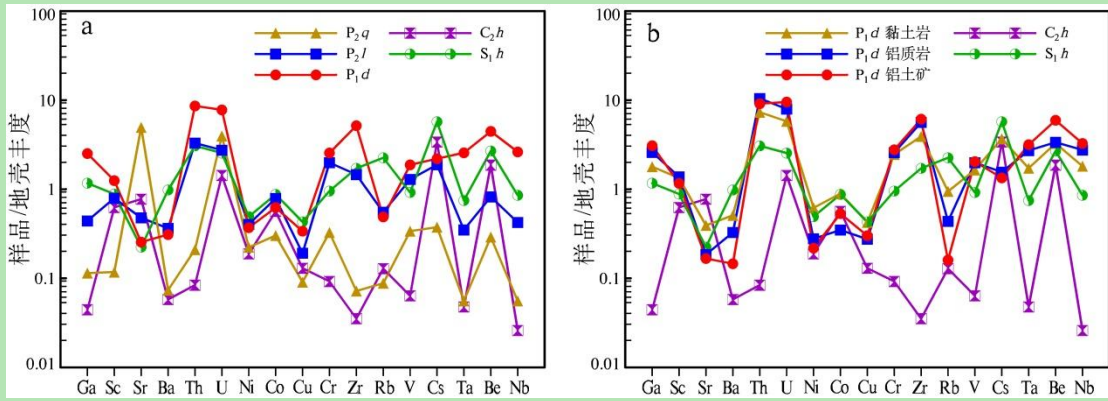


图6 含铝岩系微量元素地壳丰度(黎彤, 1976)标准化蛛网图

Fig.6 Standardized spider chart of trace element crustal abundance (Li, 1976) of aluminum bearing rock series

$C_2h$  为灰岩, 与地壳丰度值(黎彤, 1976)对比,  $C_2h$  中 U、Cs、Be 平均含量 > 地壳丰度值, 表现为富集, 富集系数  $K_U=1.42$ ,  $K_{Cs}=3.41$ ,  $K_{Be}=1.84$ ; Ga、Sc、Sr、Ba、Th、Ni、Co、Cu、Cr、Zr、Rb、V、Ta、Nb 平均含量 < 地壳丰度值, 表现为亏损。与  $P_1d$  对比,  $C_2h$  中 Ga、Sc、Ba、Th、U、Ni、Co、Cu、Cr、Zr、Rb、V、Cs、Ta、Be、Nb 平均含量 <  $P_1d$  平均含量, Sr、Cs 平均含量 >  $P_1d$  平均含量(图 6a)。

$S_1h$  为粉砂质泥岩, 与地壳丰度值(黎彤, 1976)对比,  $S_1h$  中 Ga、Th、U、Zr、Rb、Cs、Be 平均含量 > 地壳丰度值, 表现为富集, 富集系数  $K_{Ga}=1.19$ ,  $K_{Th}=3.30$ ,  $K_U=2.60$ ,  $K_{Zr}=1.65$ ,  $K_{Rb}=2.15$ ,  $K_{Cs}=5.88$ ,  $K_{Be}=2.70$ ; Sc、Sr、Ba、Ni、Co、Cu、Cr、V、Ta、Nb 平均含量 < 地壳丰度值, 表现为亏损。与  $P_1d$  对比,  $S_1h$  中 Ga、Sc、Sr、Th、U、Cr、Zr、V、Ta、Be、Nb 平均含量 <  $P_1d$  平均含量, Ba、Ni、Co、Cu、Rb、Cs 平均含量 >  $P_1d$  平均含量(图 6a)。

#### 4.4 稀土元素地球化学特征

根据务正道地区含铝岩系稀土元素分析测试结果统计, 不同采样地层、地质位置、岩矿石类型样品中稀土元素含量各不相同(表 4)。

$P_2q$  为灰岩,  $\Sigma REE$  介于  $1.16 \times 10^{-6} \sim 97.40 \times 10^{-6}$ , 平均  $31.72 \times 10^{-6}$ ; LREE 介于  $0.92 \times 10^{-6} \sim 87.06 \times 10^{-6}$ , 平均  $28.37 \times 10^{-6}$ ; HREE 介于  $0.24 \times 10^{-6} \sim 10.34 \times 10^{-6}$ , 平均  $3.35 \times 10^{-6}$ ; LREE/HREE 介于 3.87~12.36, 平均 6.99;  $(La/Yb)_N$  介于 3.96~19.24, 平均 9.58;  $(La/Sm)_N$  介于 2.52~5.15, 平均 3.76;  $(Gd/Yb)_N$  介于 0.74~3.57, 平均 2.03;  $\delta Eu$  介于 0.40~0.96, 平均 0.60;  $\delta Ce$  介于 0.62~1.05, 平均 0.90。表明  $P_2q$  中稀土总量较低, 轻重稀土分馏程度高, 轻稀土比重稀土内部分馏程度相对高; 具 Eu 负异常, Ce 负异常; 稀土配分为向右缓倾的“V”字型曲线, 快趋近于直线, 属轻稀土富集型(Taylor and McLennan, 1985; 杨虎城等, 2022)(图 7a)。

$P_2l$  为碳质泥岩,  $\Sigma REE$  介于  $16.60 \times 10^{-6} \sim 788.32 \times 10^{-6}$ , 平均  $234.90 \times 10^{-6}$ ; LREE 介于

15.01×10<sup>-6</sup>~719.87×10<sup>-6</sup>, 平均 210.65×10<sup>-6</sup>; HREE 介于 1.59×10<sup>-6</sup>~68.45×10<sup>-6</sup>, 平均 24.24×10<sup>-6</sup>; LREE/HREE 介于 4.93~13.03, 平均 8.83; (La/Yb)<sub>N</sub> 介于 5.36~15.32, 平均 9.15; (La/Sm)<sub>N</sub> 介于 0.57~3.79, 平均 2.30; (Gd/Yb)<sub>N</sub> 介于 1.91~2.41, 平均 2.12; δEu 介于 0.17~0.81, 平均 0.56; δCe 介于 0.79~1.42, 平均 0.98。表明 P<sub>2</sub>l 中比 P<sub>2</sub>q 稀土总量高, 轻重稀土分馏程度高, 轻稀土与重稀土内部分馏程度一般; 具 Eu 负异常, Ce 负异常; 稀土配分为向右缓倾的“M”字型或“V”字型曲线, 属轻稀土富集型 (汪小妹等, 2013) (图 7a)。

表 4 含铝岩系稀土元素分析测试结果统计表 (×10<sup>-6</sup>)

Table 4 Statistical analysis of rare earth elements of the aluminum bearing rock series (×10<sup>-6</sup>)

地层	P <sub>2</sub> q	P <sub>2</sub> l	P <sub>1</sub> d				C <sub>2</sub> h	S <sub>1</sub> h	P <sub>1</sub> d/	P <sub>1</sub> d/
类型	灰岩	碳质泥岩	黏土岩	铝质岩	铝土矿	大竹园组	灰岩	粉砂质泥岩	C <sub>2</sub> h	S <sub>1</sub> h
样品数	8	7	38	21	32	91	6	8	/	/
La	0.22~17.50 (6.40)	3.59~107.50 (35.26)	2.09~1425 (134.44)	1.63~139.97 (18.57)	0.89~103 (13.40)	0.89~1425 (57.25)	0.16~47.70 (5.55)	32.30~73.70 (46.65)	10.32	1.23
Ce	0.43~40.60 (13.16)	6.14~379.90 (100.82)	6.62~3819 (304.80)	5.73~215.83 (51.13)	2.37~182 (35.68)	2.37~3819 (134)	0.30~47.80 (6.65)	71~176.60 (93.74)	20.15	1.43
Pr	0.04~4.59 (1.44)	0.89~36.60 (10.63)	0.74~179 (22.39)	0.68~17.80 (4.14)	0.23~23.30 (3.24)	0.23~179 (10.19)	0.04~12.60 (1.41)	8.22~18.04 (10.81)	7.25	0.94
Nd	0.19~19.10 (5.84)	3.56~159.40 (44.63)	2.62~649 (83.69)	2.82~58.90 (14.69)	1.03~79.40 (11.61)	1.03~649 (37.32)	0.14~57.70 (6.57)	30~68.78 (40.42)	5.69	0.92
Sm	0.03~4.37 (1.26)	0.68~56.92 (17.69)	0.72~177.14 (21.67)	0.68~31.42 (4.98)	0.53~19.33 (3.70)	0.53~177.14 (10.32)	0.03~11.80 (1.67)	5.21~58.42 (10.14)	6.19	1.02
Eu	0.01~0.90 (0.27)	0.16~3.94 (1.62)	0.14~15.20 (2.42)	0.16~3.83 (0.99)	0.22~2.78 (0.77)	0.14~15.20 (1.40)	0.01~3.15 (0.50)	1.05~4.41 (1.67)	2.80	0.84
Gd	0.03~3.96 (1.19)	0.51~24.36 (8.37)	1.19~69.40 (11.15)	0.83~12.30 (4.02)	1.05~10.60 (3.37)	0.83~69.40 (6.26)	0.03~14.50 (2.20)	4.57~18.80 (7.43)	2.84	0.84
Tb	0.01~0.52 (0.16)	0.08~3.31 (1.18)	0.28~9.18 (1.70)	0.18~2.76 (0.81)	0.24~1.77 (0.75)	0.18~9.18 (1.10)	0.01~2.31 (0.35)	0.71~2.64 (1.12)	3.12	0.98
Dy	0.04~2.63 (0.86)	0.41~17.02 (6.22)	1.96~56.60 (9.24)	1.24~20.10 (5.61)	1.75~12.90 (5.14)	1.24~56.60 (6.69)	0.02~15.50 (2.16)	4~12.20 (5.93)	3.10	1.13
Ho	0.02~0.53 (0.18)	0.09~3 (1.18)	0.43~13.30 (1.97)	0.29~4.86 (1.29)	0.44~3.19 (1.20)	0.29~13.30 (1.49)	0.01~3.96 (0.52)	0.89~2.37 (1.24)	2.87	1.21
Er	0.02~1.37 (0.46)	0.21~8.68 (3.22)	1.17~36.10 (5.77)	0.84~13.90 (3.96)	1.29~9.25 (3.56)	0.84~36.10 (4.42)	0.02~11.20 (1.38)	2.52~5.74 (3.34)	3.20	1.33
Tm	0.01~0.18 (0.07)	0.04~1.40 (0.47)	0.18~5 (0.86)	0.12~2.04 (0.62)	0.20~1.37 (0.55)	0.12~5 (0.67)	0.01~1.55 (0.19)	0.35~0.70 (0.46)	3.58	1.45
Yb	0.03~1 (0.38)	0.22~9.27 (3.14)	1.18~30.30 (5.92)	0.94~13.80 (4.45)	1.46~9.69 (3.95)	0.94~30.30 (4.75)	0.01~9.75 (1.11)	2.47~4.34 (3.09)	4.28	1.54
Lu	0.01~0.15 (0.05)	0.04~1.41 (0.46)	0.16~4.27 (0.88)	0.14~1.94 (0.66)	0.21~1.42 (0.59)	0.14~4.27 (0.70)	0.01~1.36 (0.16)	0.36~0.67 (0.45)	4.41	1.57
ΣREE	1.16~97.40 (31.72)	16.60~788.32 (234.90)	21.33~6339 (604.85)	21.21~468.26 (115.92)	13.45~425.64 (87.51)	13.45~6339 (276.24)	0.94~227.13 (30.41)	172.44~369.63 (226.48)	9.08	1.22
LREE	0.92~87.06 (28.37)	15.01~719.87 (210.65)	14.65~6196 (567.37)	16.31~443.34 (94.50)	5.28~389.38 (68.40)	5.28~6196 (250.16)	0.67~180.63 (22.34)	154.96~344.92 (203.43)	11.20	1.23
HREE	0.24~10.34 (3.35)	1.59~68.45 (24.24)	6.67~209.15 (37.48)	4.58~71.60 (21.42)	6.64~46.94 (19.11)	4.58~209.15 (26.08)	0.26~57.93 (8.08)	15.97~47.30 (23.05)	3.23	1.13

地层	P <sub>2</sub> q	P <sub>2</sub> l	P <sub>1</sub> d			C <sub>2</sub> h	S <sub>1</sub> h	P <sub>1</sub> d/	P <sub>1</sub> d/	
类型	灰岩	碳质泥岩	黏土岩	铝质岩	铝土矿	大竹园组	灰岩	粉砂质泥岩	C <sub>2</sub> h	S <sub>1</sub> h
LREE/	3.87~12.36	4.93~13.03	0.84~43.48	0.46~17.79	0.63~15.43	0.46~43.48	1.04~7.56	4.93~13.96	1.46	0.71
HREE	(6.99)	(8.83)	(11.72)	(4.35)	(3.42)	(6.55)	(4.47)	(9.17)		
(La/Yb) <sub>N</sub>	3.96~19.24	5.36~15.32	0.39~65.51	0.16~18.92	0.20~14.78	0.16~65.51	0.74~10.46	5.36~15.41	0.82	0.54
	(9.58)	(9.15)	(11.18)	(2.86)	(2.29)	(5.55)	(6.76)	(10.34)		
(La/Sm) <sub>N</sub>	2.52~5.15	0.57~3.79	0.51~23.52	0.14~8.31	0.17~14.50	0.14~23.52	0.83~4.04	0.67~5.46	1.13	0.88
	(3.76)	(2.30)	(4.89)	(2.56)	(2.36)	(3.30)	(2.90)	(3.75)		
(Gd/Yb) <sub>N</sub>	0.74~3.57	1.91~2.41	0.43~3.83	0.36~1.13	0.42~1.53	0.36~3.83	1.02~4.99	1.29~3.56	0.41	0.48
	(2.03)	(2.12)	(1.30)	(0.75)	(0.70)	(0.92)	(2.27)	(1.91)		
δEu	0.40~0.96	0.17~0.81	0.13~1.05	0.13~1.70	0.17~1.09	0.13~1.70	0.54~0.96	0.16~0.70	0.90	1.08
	(0.60)	(0.56)	(0.57)	(0.79)	(0.70)	(0.67)	(0.75)	(0.62)		
δCe	0.62~1.05	0.79~1.42	0.67~2.42	0.89~3.85	0.69~5.78	0.67~5.78	0.07~1.37	0.76~3.32	2.01	1.46
	(0.90)	(0.98)	(1.20)	(1.41)	(1.51)	(1.38)	(0.69)	(1.21)		

注：“~”前为最小值，“~”后为最大值，“( )”内为平均值；球粒陨石标准化值据 Taylor and McLennan (1985)。

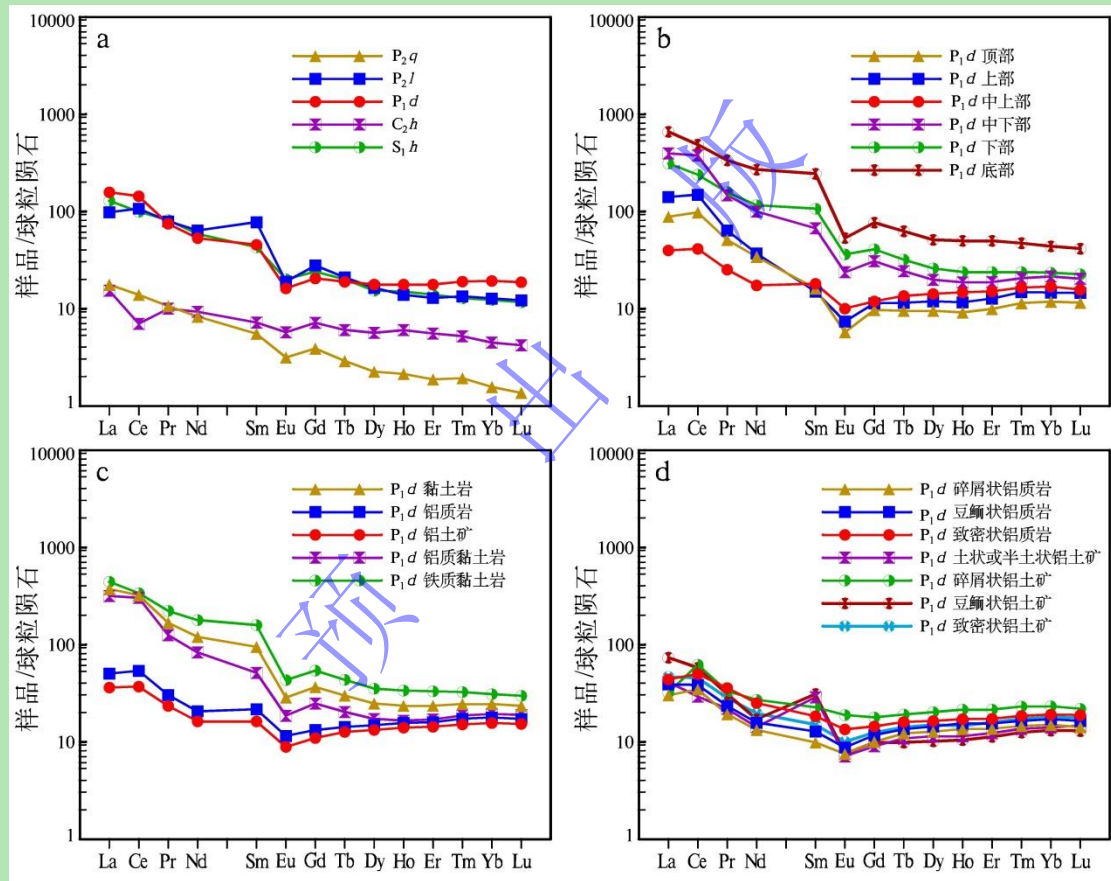


图7 含铝岩系稀土元素球粒陨石 (Taylor and McLennan, 1985) 标准化分布型式图

Fig.7 Rare earth elements tandardized distribution pattern diagram in chondrites (Taylor and McLennan, 1985) of the aluminum bearing rock series

P<sub>1</sub>d 为黏土岩、铝质岩及铝土矿，ΣREE 介于 13.45×10<sup>-6</sup>~6 339×10<sup>-6</sup>，平均 276.24×10<sup>-6</sup>；LREE 介于 5.28×10<sup>-6</sup>~6 196×10<sup>-6</sup>，平均 250.16×10<sup>-6</sup>；HREE 介于 4.58×10<sup>-6</sup>~209.15×10<sup>-6</sup>，平均 26.08×10<sup>-6</sup>；LREE/HREE 介于 0.46~43.48，平均 6.55；(La/Yb)<sub>N</sub> 介于 0.16~65.51，平均 5.55；(La/Sm)<sub>N</sub> 介于 0.14~23.52，平均 3.30；(Gd/Yb)<sub>N</sub> 介于 0.36~3.83，平均 0.92；δEu 介于 0.13~1.70，

平均 0.67;  $\delta\text{Ce}$  介于 0.67~5.78, 平均 1.38。表明  $\text{P}_{1d}$  中比  $\text{P}_{2l}$  稀土总量高, 轻重稀土分馏程度一般, 轻稀土内部分馏程度高, 重稀土内部分馏程度低; 具 Eu 负异常, Ce 正异常; 稀土配分为向右缓倾的“V”字型曲线, 属轻稀土富集型 (金中国等, 2012; 谷静等, 2015) (图 7a)。按地质位置划分,  $\text{P}_{1d}$  底部稀土总量最高, 下部次之, 中部相对较低, 顶部及上部最低 (图 7b); 按岩石类型划分,  $\text{P}_{1d}$  黏土岩稀土总量最高, 铝质岩次之, 铝土矿最低 (图 7c); 按黏土岩类型划分,  $\text{P}_{1d}$  铁质黏土岩稀土总量高, 铝质黏土岩低 (图 7c); 按铝质岩类型划分,  $\text{P}_{1d}$  致密状铝质岩稀土总量较碎屑状、豆鲕状铝质岩高 (图 7d); 按铝土矿类型划分,  $\text{P}_{1d}$  豆鲕状铝土矿稀土总量较碎屑状、土状或半土状、致密状铝土矿高 (Li et al., 2020; 宋小军等, 2025c) (图 7d)。

$\text{C}_{2h}$  为灰岩,  $\Sigma\text{REE}$  介于  $0.94\times 10^{-6}$ ~ $227.13\times 10^{-6}$ , 平均  $30.41\times 10^{-6}$ ; LREE 介于  $0.67\times 10^{-6}$ ~ $180.63\times 10^{-6}$ , 平均  $22.34\times 10^{-6}$ ; HREE 介于  $0.26\times 10^{-6}$ ~ $57.93\times 10^{-6}$ , 平均  $8.08\times 10^{-6}$ ; LREE/HREE 介于 1.04~7.56, 平均 4.47;  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$  介于 0.74~10.46, 平均 6.76;  $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$  介于 0.83~4.04, 平均 2.90;  $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$  介于 1.02~4.99, 平均 2.27;  $\delta\text{Eu}$  介于 0.54~0.96, 平均 0.75;  $\delta\text{Ce}$  介于 0.07~1.37, 平均 0.69。表明  $\text{C}_{2h}$  中远比  $\text{P}_{1d}$  稀土总量低,  $\text{P}_{1d}/\text{C}_{2h}=9.08$ ; 轻重稀土分馏程度高, 轻稀土比重稀土内部分馏程度高; 具 Eu 负异常, Ce 负异常; 稀土配分为向右缓倾的“V”字型曲线, 快趋近于直线, 属轻稀土富集型 (刘平等, 2022; 宋小军等, 2025c) (图 7a)。

$\text{S}_{1h}$  为粉砂质泥岩,  $\Sigma\text{REE}$  介于  $172.44\times 10^{-6}$ ~ $369.63\times 10^{-6}$ , 平均  $226.48\times 10^{-6}$ ; LREE 介于  $154.96\times 10^{-6}$ ~ $344.92\times 10^{-6}$ , 平均  $203.43\times 10^{-6}$ ; HREE 介于  $15.97\times 10^{-6}$ ~ $47.30\times 10^{-6}$ , 平均  $23.05\times 10^{-6}$ ; LREE/HREE 介于 4.93~13.96, 平均 9.17;  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$  介于 5.36~15.41, 平均 10.34;  $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$  介于 0.67~5.46, 平均 3.75;  $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$  介于 1.29~3.56, 平均 1.91;  $\delta\text{Eu}$  介于 0.16~0.70, 平均 0.62;  $\delta\text{Ce}$  介于 0.76~3.32, 平均 1.21。表明  $\text{S}_{1h}$  中比  $\text{P}_{1d}$  稀土总量稍低,  $\text{P}_{1d}/\text{S}_{1h}=1.22$ ; 轻重稀土分馏程度高, 轻稀土内部分馏程度高, 重稀土内部分馏程度一般; 具 Eu 负异常, Ce 正异常; 稀土配分为向右缓倾典型的“V”字型曲线, 属轻稀土富集型 (刘平等, 2022; 宋小军等, 2025c) (图 7a)。

## 5 讨论

### 5.1 沉积盆地

早古生代中期—晚古生代中期, 扬子克拉通盆地沉积了多套铝硅酸盐岩、碎屑岩及碳酸盐岩 (潘桂棠等, 2016; 刘辰生等, 2018)。早古生代中期 (晚奥陶世—早志留世) 的都匀

运动（加里东运动早期），表现为贵州中部及北部地区大面积抬升成陆。黔中地区缺失奥陶纪沉积，奠定了黔中隆起的雏形（邓旭升等，2020）；黔北地区缺失晚奥陶世及早志留世早期沉积，并形成一些极为宽缓的褶皱和断裂（吴福元等，2020）。黔中地区地势总体较高，基底为中上寒武统碳酸盐岩，以接受风化剥蚀及夷平作用为主；黔北地区地势总体较低，加之全球持续海侵，在相对开阔低洼的深海盆地发育  $S_{1h}$  粉砂质泥岩、页岩及少量灰岩（高兰等，2014）。早古生代末期（晚志留世）的广西运动（加里东运动晚期），促使黔中—黔北地区转变成上扬子古陆的组成部分，继承和发展都匀运动时期的构造面貌，黔中隆起上升形成黔中古陆；表现为黔中地区缺失志留纪沉积，黔北地区缺失志留纪中晚期沉积（邓新等，2010；邓旭升等，2020）。晚古生代早期（泥盆纪—早石炭世）的紫云运动（海西运动），进一步继承广西运动古构造面貌，并伴有间歇性上升活动的断块运动以及海侵扩展的特点，黔中古陆持续上升并向北进一步扩展形成黔中—黔北古陆；表现为黔中地区缺失泥盆纪沉积，黔北地区缺失泥盆纪及早石炭世沉积（高兰等，2014；宋小军等，2025c）。

晚石炭世—早二叠世黔北地区属于扬子克拉通陆内裂陷盆地，为向北开口的半封闭海湾，南靠黔中—黔北古陆，北临扬子海（刘幼平等，2016；宋小军等，2025c）；期间，受全球性冈瓦纳冰期的影响，发生大规模海退及间歇性或交替性海侵；当间冰期海侵时，半封闭海湾与扬子海相连；当冰期、冰盛期海退时，半封闭海湾与扬子海相隔，形成泛海湖（杜远生等，2020b；仲钰天等，2023）。务正道地区沉积盆地类型由南向北可以进一步划分为黔中—黔北古陆—近海平原—滨海湿地—道真海湾—扬子海（图 1b、图 2, 3）。

黔中—黔北古陆是早古生代中期—晚古生代早期贵州中北部地区沉积了大量的铝硅酸盐岩、碎屑岩及少量的碳酸盐岩，以巨厚的  $S_{1h}$  粉砂质泥岩及页岩最为典型，因受多期次构造旋回运动的影响持续隆起抬升，长期遭受剥蚀和夷平作用（邓新等，2010；刘辰生等，2018）。扬子海是早古生代中期—晚古生代早期由东侧鄂西海槽与西侧甘孜海槽相连演化而来（雷志远等，2013；邓旭升等，2020），严格受海侵与海退的影响沉积了一定厚度的碳酸盐岩，以渝南—黔北地区  $C_{2h}$  灰岩及白云岩最为典型，极易发育成溶蚀洼地古地貌。

近海平原是冈瓦纳间冰期海侵时被淹没，冰期、冰盛期海退时暴露的区域，南面与黔中—黔北古陆相连（邓新等，2010；邓旭升等，2020）；以风氧化带（强风氧化）为主，主要特征  $C_{2h}$  碳酸盐岩因剥蚀和夷平作用强烈而保存极差或零星分布， $P_{1d}$  变薄甚至缺失（杜远生和余文超，2020；宋小军等，2025c）。滨海湿地是冈瓦纳间冰期海侵时古海平面上升，冰期、冰盛期海退时古海平面下降或暴露的海陆过渡区域，靠陆一侧与近海平原相连，近海一侧与道真海湾相接（Zhou *et al.*, 2022）；水体环境较浅、水动力条件强，以原始沉积与

风氧化混合带为主。道真海湾是冈瓦纳冰期内一直处于水面之下，受海侵海退影响较小，主要接受沉积的区域，北面与扬子海相接，其余被滨海湿地所包围；水体环境较深、水动力条件弱，以原始沉积带（弱风氧化）为主。

## 5.2 沉积物源

母岩或原岩在特定的成岩成矿条件下经一系列地质作用演化为黏土岩、铝质岩及铝土矿，稳定化学组分需逐步富集，选择新老地层中大于地壳丰度值的元素，相互比较含量差值、富集难易程度初步判定新地层的沉积物质来源；当两者的含量差值越小、富集难度越易，老地层可能是新地层的母岩或原岩（崔银亮等，2017；宋小军等，2025c）。P<sub>1d</sub>中Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>介于25.03%~77.50%，平均48.87%；TiO<sub>2</sub>介于0.31%~3.25%，平均1.70%。C<sub>2h</sub>中Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>介于0.10%~1.88%，平均0.63%；TiO<sub>2</sub>介于0.02%~0.08%，平均0.05%。S<sub>1h</sub>中Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>介于14.14%~27.52%，平均19.26%；TiO<sub>2</sub>介于0.20%~1.19%，平均0.41%（表2）。P<sub>1d</sub>与S<sub>1h</sub>组分含量差值比P<sub>1d</sub>与C<sub>2h</sub>小，Al从C<sub>2h</sub>到P<sub>1d</sub>富集77.57倍，而从S<sub>1h</sub>到P<sub>1d</sub>富集2.54倍；Ti从C<sub>2h</sub>到P<sub>1d</sub>富集34倍，而从S<sub>1h</sub>到P<sub>1d</sub>富集4.15倍。加之，务正道地区S<sub>1h</sub>厚度>400m远超C<sub>2h</sub>厚度0~50m，S<sub>1h</sub>具有提供P<sub>1d</sub>成岩成矿所需大量物质的基础（刘国栋等，2021）。

通过常量元素Al-Si-Fe在不同地层、不同岩矿石类型中含量三角图分析（Schellmann, 1982），S<sub>1h</sub>粉砂质泥岩及页岩经原始沉积作用后可以形成P<sub>1d</sub>黏土岩，经沉积至低等风化作用后形成铝质岩，再经中等至强烈风化作用后形成铝土矿，铝质岩与低品位铝土矿经强烈风化作用后形成高品位铝土矿（杨瑞东等，2025；杜远生等，2026），上下阶段之间均有交接；而C<sub>2h</sub>灰岩及白云岩与P<sub>1d</sub>黏土岩、铝质岩及铝土矿无交接，不能体现Al的逐步富集趋势，相关性不强（图8a）。

微量元素地壳丰度（黎彤，1976）标准化，P<sub>1d</sub>与S<sub>1h</sub>配分模式较为相近，而P<sub>1d</sub>与C<sub>2h</sub>相差较大（图6a）。将S<sub>1h</sub>、P<sub>1d</sub>分别与地壳丰度对比，大离子亲石元素、高场强元素均呈现随元素的活动性减弱则富集程度逐渐降低（汪小妹等，2013；金中国等，2019）；Ga、Th、U、Zr、Cs、Be均为正异常，Sr、Ba、Ni、Co、Cu均为负异常。将S<sub>1h</sub>粉砂质泥岩与P<sub>1d</sub>黏土岩、铝质岩、铝土矿在纵向上对比，Ga、Th、U、Cr、Zr、V、Ta、Be、Nb等高场强元素呈规律性递增，与常量元素Al、Ti一样具有逐步富集的趋势；而Ba、Rb、Cs等大离子亲石元素逐渐降低（图6b）。通过Ni-Cr二元图分析（Schroll and Sauer, 1968），S<sub>1h</sub>分布范围紧凑，落点均在页岩及板岩附近；C<sub>2h</sub>分布范围也相对较小，落点在碳酸盐岩附近；P<sub>1d</sub>分布范围较宽，以靠近玄武岩、页岩及板岩为主，部分靠近花岗岩、砂岩，全部远离超基性岩、正长岩；P<sub>1d</sub>铝质岩、铝土矿大部分落点位于沉积型铝土矿内，黏土岩较为分散（图

8b)。

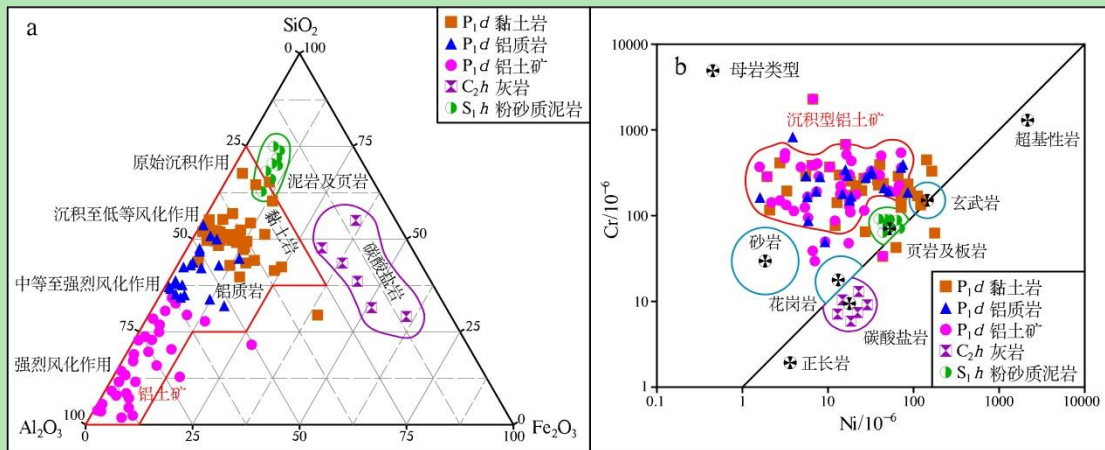


图 8 (a) Al-Si-Fe 含铝岩系沉积物源判别图 (据 Schellmann, 1982 修改); (b) Ni-Cr 含铝岩系沉积物源判别图 (据 Schroll and Sauer, 1968 修改)

Fig.8 (a) Al-Si-Fe sediment source discrimination of the aluminum bearing rock series (modified from Schellmann, 1982); (b) Ni-Cr sediment source discrimination of the aluminum bearing rock series (modified from Schroll and Sauer, 1968)

微量元素 Zr、V、Nb、Ta 在化学风化、成岩成矿过程中相对稳定 (MacLean and Barrett, 1993; Kurtz *et al.*, 2000), 可以通过元素比值 Zr/V、Nb/Ta 追索物源 (MacLean, 1990; Calagari and Abedini, 2007)。P<sub>1d</sub> 中 Zr/V 介于 0.58~12.29, 平均 3.02; Nb/Ta 介于 8.10~29.80, 平均 13.17。C<sub>2h</sub> 中 Zr/V 介于 0.05~4.71, 平均 0.80; Nb/Ta 介于 1.79~12.87, 平均 6.42。S<sub>1h</sub> 中 Zr/V 介于 0.67~7.52, 平均 2.59; Nb/Ta 介于 10.99~18.52, 平均 13.53。以上元素比值 Zr/V、Nb/Ta 显示, S<sub>1h</sub> 与 P<sub>1d</sub> 比 C<sub>2h</sub> 与 P<sub>1d</sub> 交叉重叠更多, 平均值更为接近, 更具有亲缘关系, 表明 S<sub>1h</sub> 铝硅酸盐岩是 P<sub>1d</sub> 含铝岩系沉积物源的主要提供者。

稀土元素球粒陨石 (Taylor and McLennan, 1985) 标准化, P<sub>1d</sub> 与 C<sub>2h</sub>、S<sub>1h</sub> 均为 LREE 富集型; P<sub>1d</sub> 与 S<sub>1h</sub> 配分模式最为接近, 而 P<sub>1d</sub> 与 C<sub>2h</sub> 在总量上、形态上差异明显 (图 7a)。对比 δCe, P<sub>1d</sub> 平均 1.38, 为正异常; C<sub>2h</sub> 平均 0.69, 为负异常; S<sub>1h</sub> 平均 1.21, 为正异常 (表 4)。表明 P<sub>1d</sub> 与 S<sub>1h</sub> 在物质来源上具有一定的亲缘关系 (Gu *et al.*, 2013b; 谷静等, 2015; 张海坤等, 2021)。

综上所述, 务正道地区 P<sub>1d</sub> 沉积物源以基底 S<sub>1h</sub> 铝硅酸盐岩为主 (金中国等, 2013), 这与近年来国内学者通过碎屑锆石 U-Pb 年龄反映出务正道地区铝土矿成矿的近源物质主要来自 S<sub>1h</sub> 是一致的 (余文超等, 2014a, 2020; 向贤礼等, 2015)。

### 5.3 沉积环境

沉积地球化学指标是判别古环境的重要手段, 依据元素在不同环境下表征不同的地球化学行为及性质, 其含量、相互比值及组合计算值能揭示特殊的地质地球化学意义, 以此判别

沉积环境的古气候条件、化学风化强度、古盐度、沉积风化带、氧化还原条件等指标（韩英等，2016；金中国等，2018a；Lei et al., 2023）。

通过化学蚀变指数（Chemical Index of Alteration, CIA）判别  $P_{1d}$  沉积环境的古气候条件及化学风化强度（McLennan et al., 1993），CIA < 70，指示寒冷干燥、化学风化低等；CIA 介于 70~90，指示温暖湿润、化学风化中等；CIA > 90，指示炎热潮湿、化学风化强烈（余文超等，2014b；Lei et al., 2023）。 $P_{1d}$  中 CIA 介于 78.64~99.55，平均 94.77（表 2）；70~90 占比 16%，>90 占比 84%。其中，黏土岩 CIA 介于 78.64~97.81，平均 91.05；70~90 占比 39%，>90 占比 61%。铝质岩 CIA 介于 79.26~98.90，平均 94.76；70~90 占比 8%，>90 占比 92%。铝土矿 CIA 介于 93.51~99.55，平均 97.77；>90 占比 100%。同时，根据新民剖面分析， $P_{1d}$  顶部 H3 为黏土岩，CIA=96.09；上部 H4 为铝质岩，CIA=97.18；中上部 H5~H9 为铝土矿，CIA 介于 93.51~98.06，平均 96.20；中下部 H10~H14 为黏土岩，CIA 介于 82.07~88.22，平均 86.39。反映  $P_{1d}$  沉积环境古气候条件温暖湿润至炎热潮湿，化学风化强度中等至强烈（韩英等，2016；金中国等，2018a）；在纵向上，由底至顶古气候条件总体具有从温暖湿润到炎热潮湿、化学风化强度从中等到强烈的变化趋势，炎热潮湿的古气候、强烈的化学风化更利于形成铝土矿（图 9）。

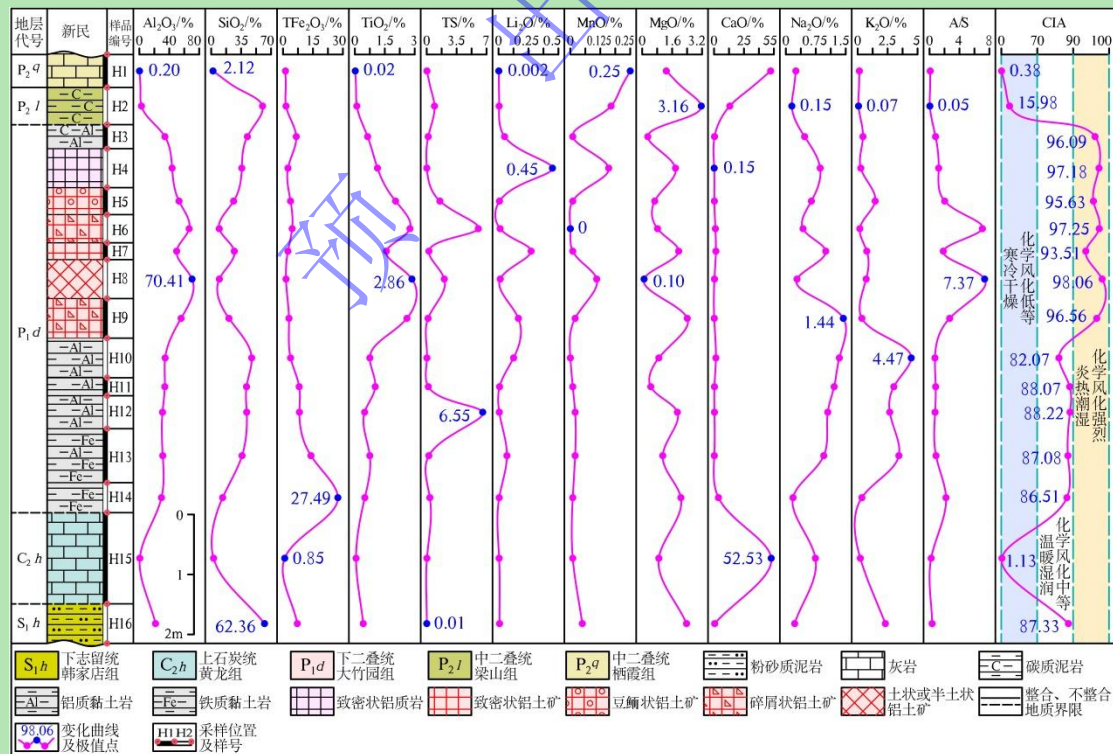


图 9 新民剖面含铝岩系沉积环境判别图

Fig.9 Sedimentary environment discrimination of aluminum bearing rock series in the Xinmin Profile

通过元素比值 Sr/Ba 判别  $P_{1d}$  沉积环境的古盐度，Sr/Ba < 0.6，指示淡水（陆相）；Sr/Ba

介于 0.6~1, 指示半咸水 (过渡相);  $Sr/Ba > 1$ , 指示海水 (海相) (金中国等, 2018a; 杜远生等, 2026)。P<sub>1d</sub> 中  $Sr/Ba$  介于 0.12~40, 平均 3.52;  $< 0.6$  占比 22%, 0.6~1 占比 42%,  $> 1$  占比 36% (表 3)。其中, 黏土岩  $Sr/Ba$  介于 0.22~35.07, 平均 2.59;  $< 0.6$  占比 16%, 0.6~1 占比 39%,  $> 1$  占比 45%。铝质岩  $Sr/Ba$  介于 0.12~40, 平均 2.93;  $< 0.6$  占比 24%, 0.6~1 占比 33%,  $> 1$  占比 43%。铝土矿  $Sr/Ba$  介于 0.22~40, 平均 4.56;  $< 0.6$  占比 28%, 0.6~1 占比 50%,  $> 1$  占比 22%。反映 P<sub>1d</sub> 沉积环境古盐度以半咸水 (过渡相) 为主, 海水 (海相) 次之, 淡水 (陆相) 最少, 水动力最强的海陆过渡沉积环境更利于形成铝土矿 (余文超等, 2014b) (图 10a)。

通过元素比值  $Th/U$  判别 P<sub>1d</sub> 沉积环境的沉积风化带,  $Th/U < 2$ , 指示原始沉积带 (弱风氧化);  $Th/U$  介于 2~7, 指示混合带 (过渡带);  $Th/U > 7$ , 指示风氧化带 (强风氧化) (余文超等, 2014b; Lei et al., 2023) (图 10a)。P<sub>1d</sub> 中  $Th/U$  介于 0.71~20.76, 平均 4.54;  $< 2$  占比 18%, 2~7 占比 53%,  $> 7$  占比 29% (表 3)。其中, 黏土岩  $Th/U$  介于 0.75~20.76, 平均 5.28;  $< 2$  占比 18%, 2~7 占比 61%,  $> 7$  占比 21%。铝质岩  $Th/U$  介于 1.06~8.49, 平均 4.62;  $< 2$  占比 28%, 2~7 占比 48%,  $> 7$  占比 24%。铝土矿  $Th/U$  介于 0.71~16.60, 平均 3.91;  $< 2$  占比 12%, 2~7 占比 47%,  $> 7$  占比 41%。反映 P<sub>1d</sub> 沉积环境以原始沉积与风氧化混合带为主, 风氧化带 (强风氧化) 更利于形成铝土矿 (余文超等, 2014b; 金中国等, 2018a; Lei et al., 2023) (图 10b)。

通过元素比值  $Ni/Co$  判别 P<sub>1d</sub> 沉积环境的氧化还原条件,  $Ni/Co < 5$ , 指示富氧 (氧化);  $Ni/Co$  介于 5~7, 指示贫氧 (过渡);  $Ni/Co > 7$ , 指示厌氧 (还原) (余文超等, 2014b)。P<sub>1d</sub> 中  $Ni/Co$  介于 0.13~120.88, 平均 4.31;  $< 5$  占比 73%, 5~7 占比 14%,  $> 7$  占比 13% (表 3)。其中, 黏土岩  $Ni/Co$  介于 0.16~19.51, 平均 3.89;  $< 5$  占比 68%, 5~7 占比 18%,  $> 7$  占比 14%。铝质岩  $Ni/Co$  介于 0.21~120.88, 平均 8.54;  $< 5$  占比 67%, 5~7 占比 14%,  $> 7$  占比 19%。铝土矿  $Ni/Co$  介于 0.13~13.75, 平均 2.66;  $< 5$  占比 82%, 5~7 占比 9%,  $> 7$  占比 9%。反映 P<sub>1d</sub> 沉积环境氧化还原条件以富氧 (氧化) 为主, 贫氧 (过渡) 与厌氧 (还原) 环境相对较少, 开放氧化的沉积环境更利于形成铝土矿 (金中国等, 2018a; 刘平等, 2022; Lei et al., 2023) (图 10c)。

通过元素比值  $Sr/Cu$  判别 P<sub>1d</sub> 沉积环境的古气候条件,  $Sr/Cu < 1$ , 指示寒冷干燥;  $Sr/Cu$  介于 1~10, 指示温暖湿润;  $Sr/Cu > 10$ , 指示炎热潮湿 (余文超等, 2014b; 金中国等, 2018a)。P<sub>1d</sub> 中  $Sr/Cu$  介于 0.28~70.98, 平均 9.02;  $< 1$  占比 7%, 1~10 占比 56%,  $> 10$  占比 37% (表 3)。其中, 黏土岩  $Sr/Cu$  介于 0.77~70.98, 平均 12.66;  $< 1$  占比 5%, 1~10 占比 58%,  $>$

10 占比 37%。铝质岩 Sr/Cu 介于 0.49~48.72，平均 7.13；<1 占比 10%，1~10 占比 76%，>10 占比 14%。铝土矿 Sr/Cu 介于 0.28~27.40，平均 6.98；<1 占比 6%，1~10 占比 41%，>10 占比 53%。反映 P<sub>1d</sub> 沉积环境的古气候条件温暖湿润至炎热潮湿，炎热潮湿的古气候更利于形成铝土矿（余文超等，2014b；金中国等，2018a）（图 10d）。

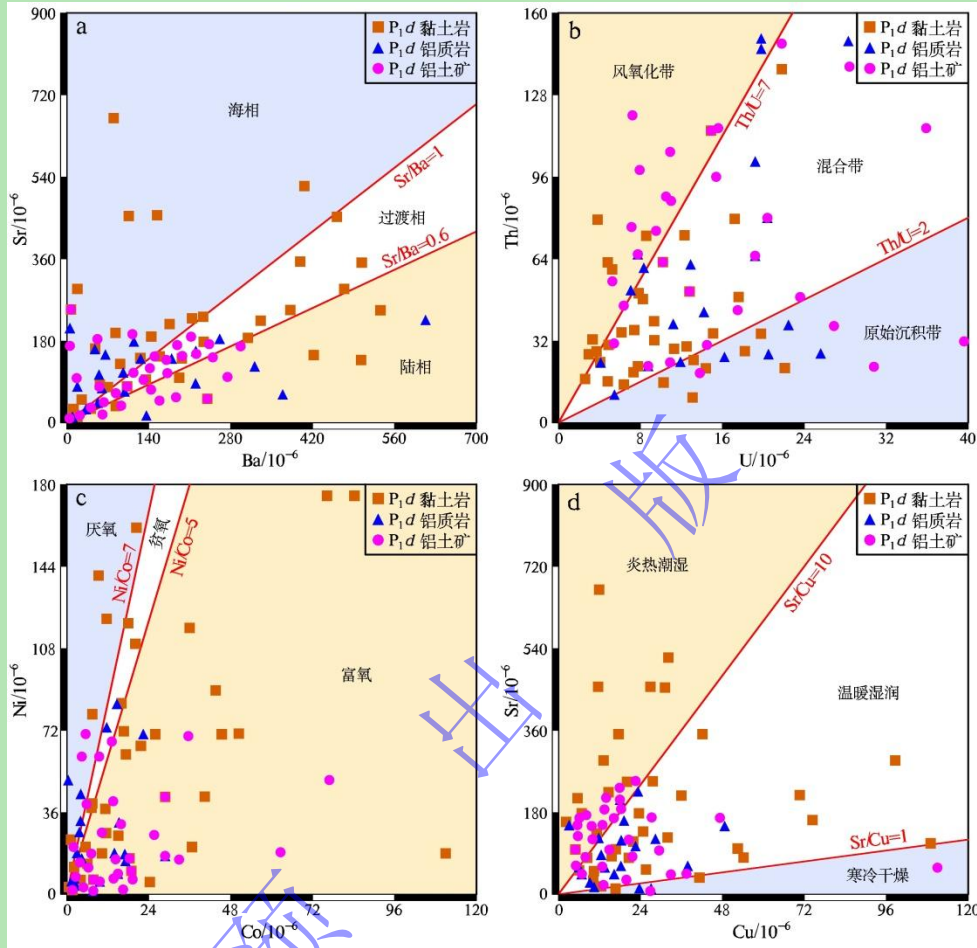


图 10 大竹园组沉积环境判别图

Fig.10 Sedimentary environment discrimination of the Dazhuyuan Formation

可见，上述地球化学参数表明务正道地区 P<sub>1d</sub> 沉积环境古气候条件温暖湿润至炎热潮湿，化学风化强度中等至强烈，古盐度以半咸水（过渡相）为主，沉积风化带以原始沉积与风氧化混合带为主，氧化还原条件以富氧（氧化）为主；开放氧化、炎热潮湿、化学风化强烈、水动力最强的海陆过渡沉积环境中更利于形成铝土矿。

#### 5.4 沉积规律

务正道地区 S<sub>1h</sub> 属于深海盆地相沉积，母岩或原岩矿物常见三类；第一类由 O、Si、Al、Fe、K、Na、Mg、Li、Cr、Ni、Mn、V、Cu、H、REE 等化学元素组成的高岭石、水云母、绿泥石、长石、角闪石等富铝硅酸盐矿物（Xiong *et al.*, 2021），第二类由 O、C、Ca、Mg、Mn 等化学元素组成的方解石、白云石、菱锰矿等碳酸盐矿物（崔滔等，2013），第三类由

O、Si、Ti 等化学元素组成的石英、锐钛矿等氧化物矿物。化学元素赋存于矿物之中，Al、Fe、Li、REE 等关键金属元素在  $S_{1h}$  中具有一定的富集现象，Ti 表现为亏损（表 2）；因  $S_{1h}$  沉积过程中未进行强烈的准平原化，富铝硅酸盐矿物未能进行脱 Si、沉 Fe、除 S、富 Al 等沉积改造作用，难以形成大量的铝矿物、铁矿物及黏土矿物；同时制约着与铝矿物呈正相关锐钛矿及稀土矿物的富集，但部分硅酸盐矿物对 Li 具有一定的吸附或富集作用（温汉捷等，2020）。

$P_{1d}$  以富氧（氧化）原始沉积与风氧化混合的半咸水沉积为主，Al、Ti、Li、REE 等关键金属元素在  $P_{1d}$  中具有明显的富集现象，Fe 为亏损（表 2）。表明晚石炭世—早二叠世务正道地区处于古赤道附近， $P_{1d}$  沉积环境古气候条件温暖湿润至炎热潮湿，化学风化强度中等至强烈（余文超等，2014b；金中国等，2018a），利于母岩或原岩进行强烈的准平原化形成含铝初始物源，通过脱 Si、沉 Fe、除 S、富 Al 等沉积改造作用形成大量的铝矿物、铁矿物及黏土矿物（图 11a），经一系列沉积阶段（沉积作用）后形成不同岩矿石（图 11b）；同时与铝矿物呈正相关的锐钛矿及稀土矿物相对富集，少量的绿泥石以及部分铝矿物对 Li 具有一定的吸附或富集作用。

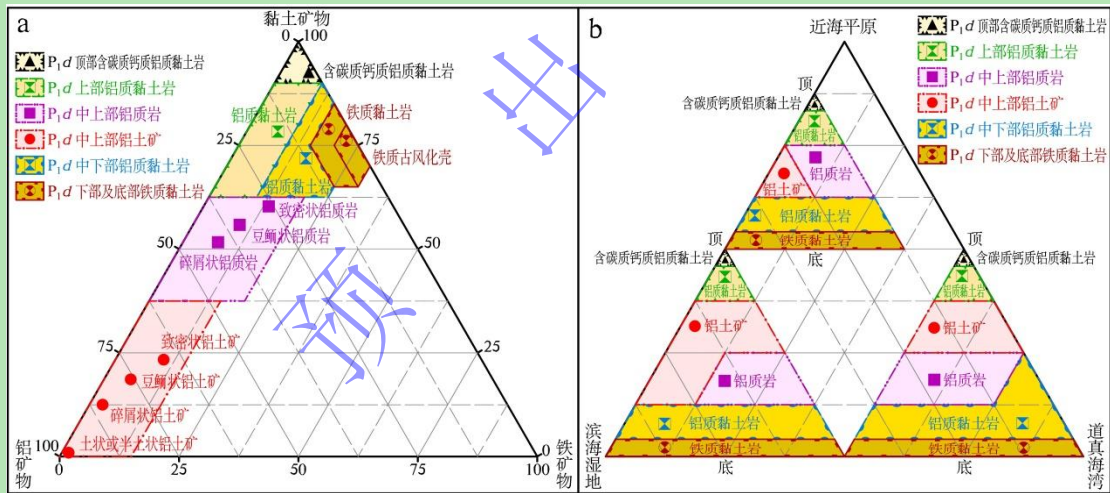


图 11 (a) 大竹园组矿物组成特征图；(b) 大竹园组沉积环境特征图

Fig. 11 (a) Mineral composition characteristics of the Dazhuyuan Formation; (b) sedimentary environment characteristics of the Dazhuyuan Formation

其中， $P_{1d}$  底部铁质黏土岩或铁质古风化壳，一般铁矿物含量介于 20%~30%，位于  $C_2h$  碳酸盐岩风氧化带之上，表征  $P_{1d}$  沉积阶段的开始，是反演务正道地区晚石炭世晚期—早二叠世早期岩相古地理特征的重要标志（余文超等，2023；宋小军等，2025c）。中上部致密状铝质岩或铝土矿，主要为光性隐晶质、泥晶质胶状集合体，指示成岩成矿水体环境相对较深，水动力条件较弱，多分布于道真海湾内；中上部豆鲕状或碎屑状铝质岩或铝土矿，豆鲕粒或碎屑颗粒具有一定的分选性、滚圆度，指示成岩成矿水体环境相对较浅，水动力条件较

强，多分布于海陆过渡带内 (Xiong *et al.*, 2021)。中上部土状或半土状铝土矿，表现为质地疏松，断口参差不齐，吸水性强，反映成矿后期经历了强烈的风化淋滤、沉积改造、暖热交替作用，对反演务正道地区古气候、古纬度具有一定的指示意义 (余文超等, 2014b; 金中国等, 2018a)，多分布于滨海湿地内。顶部含碳质或钙质铝质黏土岩，一般白云石、方解石等碳酸盐矿物含量 5% 左右，伴随碳质或钙质的大量出现，表征  $P_{1d}$  沉积阶段的消失，是反演务正道地区早二叠世晚期—中二叠世早期岩相古地理特征的重要标志 (余文超等, 2023; 宋小军等, 2025c) (图 11)。

综上，母岩或原岩矿物在适宜的沉积环境中，可以分解重组成新矿物；经一系列沉积阶段后，矿物分解重组制约着岩矿石中化学组分含量。务正道地区  $P_{1d}$  主要由黏土岩、铝质岩、铝土矿组成，反映了矿物组成、化学组分与沉积环境内在本质的变化特征 (李文昌等, 2022; 王学求等, 2025)。

### 5.5 沉积旋回

根据新民剖面分析，H16 为  $S_{1h}$  粉砂质泥岩， $Th/U=6.30$ ， $Ni/Co=2.58$ ， $Sr/Cu=4.80$ ， $CIA=87.33$ ， $Sr/Ba=1.83$ ；反映  $S_{1h}$  为冈瓦纳冰期开启前非冰期海侵阶段，开放富氧的海相中沉积，古气候条件温暖湿润，化学风化强度中等 (金中国等, 2018a; 刘辰生等, 2018)，为原始沉积与风氧化混合带。H15 为  $C_{2h}$  灰岩， $Th/U=0.29$ ， $Ni/Co=3.74$ ， $Sr/Cu=27.85$ ， $Sr/Ba=8.05$ ；反映  $C_{2h}$  为冈瓦纳冰期开启间歇性海侵与海退阶段，开放富氧的海相中沉积，古气候条件炎热潮湿，化学风化强度低等 (崔滔等, 2014; 余文超等, 2023)，为原始沉积带 (图 12)。

$P_{1d}$  中下部 H14~H10 为黏土岩、H9~H7 为铝土矿， $Th/U$  介于 1.34~11.85， $Ni/Co$  介于 3.13~9.73， $Sr/Cu$  介于 3.97~19.42， $CIA$  介于 82.07~98.06， $Sr/Ba$  介于 0.44~3.10；反映  $P_{1d}$  中下部为冈瓦纳冰期—冰盛期—间冰期，持续性海退—大规模海退—短暂性海侵阶段，在贫氧—富氧局部厌氧的海相—过渡相—陆相—过渡相—海相中沉积，古气候条件温暖湿润至炎热潮湿，化学风化强度中等至强烈 (余文超等, 2023)，为原始沉积带—混合带—风氧化带，属于沉积旋回 I。 $P_{1d}$  中上部 H7~H5 为铝土矿、H4 为铝质岩、H3 为黏土岩， $Th/U$  介于 1.97~8.45， $Ni/Co$  介于 4.24~8.23， $Sr/Cu$  介于 5.52~13.78， $CIA$  介于 93.51~97.25， $Sr/Ba$  介于 0.54~2.93；反映  $P_{1d}$  中上部为冈瓦纳间冰期—冰期—消亡期，短暂性海侵—短暂性海退—间歇性或交替性海侵与海退阶段，在贫氧—富氧局部厌氧的海相—过渡相—陆相—过渡相—海相中或交替性重复沉积，古气候条件温暖湿润至炎热潮湿，化学风化强烈 (余文超等, 2014b; 金中国等, 2018a)，为风氧化带—混合带—原始沉积带，属于沉积旋回 II (图 12)。

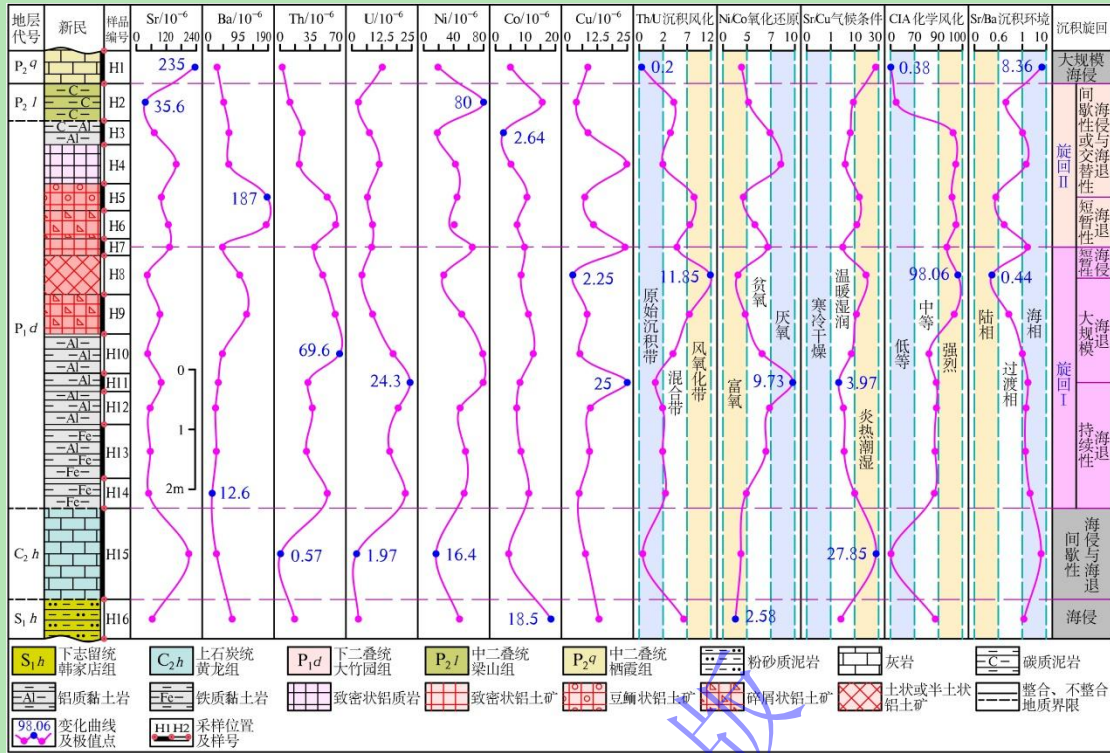


图 12 新民剖面含铝岩系沉积旋回图

Fig.12 Sedimentary cycle of aluminum bearing rock series in the Xinmin profile

H2 为 P<sub>2l</sub> 碳质泥岩, Th/U=4.21, Ni/Co=5.13, Sr/Cu=9.49, CIA=15.98, Sr/Ba=0.73; 反映 P<sub>2l</sub> 为冈瓦纳冰期消亡间歇性或交替性海侵与海退阶段, 在贫氧的过渡相中沉积, 古气候条件温暖湿润, 化学风化强度低等 (张七道等, 2024; 张启连等, 2024), 为原始沉积与风氧化混合带, 也属于沉积旋回II的一部分。H1 为 P<sub>2q</sub> 灰岩, Th/U=0.20, Ni/Co=3.86, Sr/Cu=27.49, Sr/Ba=8.36; 反映 P<sub>2q</sub> 为冈瓦纳冰期结束后非冰期海侵阶段, 开放富氧的海相中沉积, 古气候条件炎热潮湿, 化学风化强度低等 (韩忠华等, 2016; 杨虎城等, 2022), 为原始沉积带 (图 12)。

大竹园组受晚石炭世一早二叠世全球性冈瓦纳冰期大规模海退及间歇性或交替性海侵的影响, 至少存在两次沉积旋回 (图 12)。其中, 沉积旋回I以晚石炭世晚期冈瓦纳冰期开启为起, 以早二叠世中期间冰期结束为止; 期间经历冰期—冰盛期—间冰期, 古海平面升降为持续性海退—大规模海退—短暂性海侵, 沉积相演化为海相—过渡相—陆相—过渡相—海相, 沉积序列特征为黏土岩—铝质岩—铝土矿—铝质岩—黏土岩。沉积旋回II以早二叠世中期间冰期结束为起, 以早二叠世晚期冈瓦纳冰期消亡为止; 期间经历间冰期—冰期—消亡期, 古海平面升降为短暂性海侵—短暂性海退—间歇性或交替性海侵与海退, 沉积相演化为海相—过渡相—陆相—过渡相—海相或交替性重复 (殷科华, 2009; 黄兴等, 2013), 沉积序列特征为黏土岩—铝质岩—铝土矿—铝质岩—黏土岩 (刘平等, 2016), 体现了务正道地区大

竹园组沉积具有旋回性。

综合务正道地区含铝岩系层序地质（图 2）与新民剖面旋回特征（图 12）分析，在纵向上由  $S_{1h}$ 、 $C_{2h}$ 、 $P_{1d}$ 、 $P_{2l}$  至  $P_{2q}$ ，期间经历非冰期—冈瓦纳冰期—非冰期，古气候转变为温室—冰室—温室，古海平面升降为海侵—海退—海侵，沉积相演化为海相—过渡相—陆相—过渡相—海相（殷科华，2009；黄兴等，2013），沉积序列特征为硅酸盐岩—碳酸盐岩—含铝岩系—硅酸盐岩—碳酸盐岩（刘平等，2016），体现了务正道地区早志留世—中二叠世期间沉积也具有旋回性。

### 5.6 沉积模式

根据沉积盆地、沉积物源、沉积环境、沉积旋回等特征规律综合研究，建立贵州务正道地区下二叠统大竹园组沉积模式（图 13）。晚奥陶世—早二叠世，务正道地区先后在都匀、广西、紫云等多期次构造旋回运动的制约下（邓旭升等，2020；宋小军等，2025c），以及受全球性冈瓦纳冰期海侵海退的影响下，沉积盆地逐步演化为向北开口的半封闭海湾（邓新等，2010；刘幼平等，2016），由南向北划分为黔中—黔北古陆—近海平原—滨海湿地—道真海湾—扬子海。

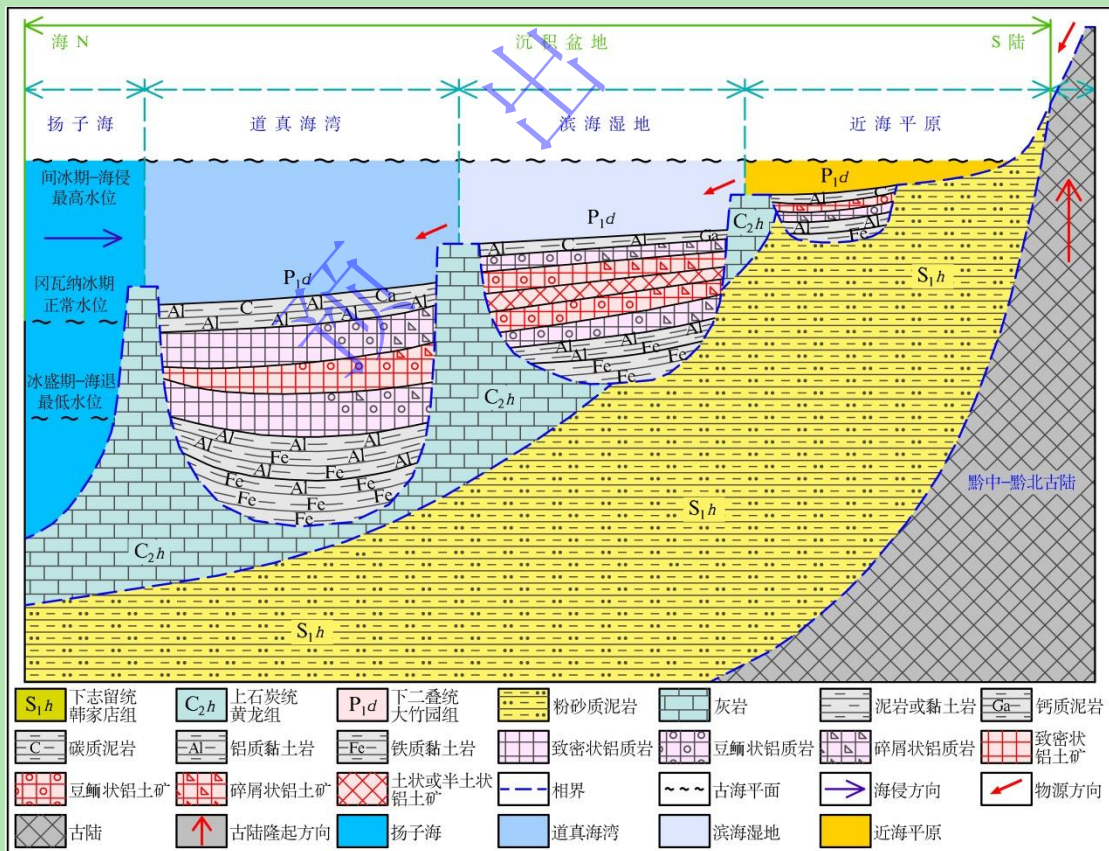


图 13 务正道地区下二叠统大竹园组沉积模式图

Fig.13 Sedimentary models of the Lower Permian Dazhuyuan Formation in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen

area

晚石炭世一早二叠世, 务正道地区处于低纬度古赤道附近, 古气候条件温暖湿润至炎热潮湿, 化学风化强度中等至强烈 (余文超等, 2014b; 金中国等, 2018a)。伴随冈瓦纳冰期开启发生间歇性海侵与海退, 基底  $C_2h$  碳酸盐岩被风化剥蚀殆尽或发育成溶蚀洼地古地貌, 为  $P_{1d}$  提供沉积盆地 (刘辰生等, 2015; 周文龙和刘幼平, 2016),  $P_{1d}$  与  $C_2h$  为沉积间断。与此同时, 黔中—黔北古陆、近海平原内的基底  $S_{1h}$  铝硅酸盐岩进行准平原化 (孙莉等, 2018); 风化产物中含 O、Al、Si、Fe、Ti、S、P、Mn、Mg、Ca、Na、K、Cr、Ni、V、Cu、H 等化学元素, 以及 Li、Ga、Sc、REE 等关键金属元素, 为  $P_{1d}$  沉积提供充足的含铝初始物源,  $P_{1d}$  与  $S_{1h}$  同样也为沉积间断。

晚石炭世一早二叠世, 务正道地区开放富氧的沉积环境利于含铝初始物源在微生物作用下分解有机质形成  $CO_2$ 、有机酸, 同时黄铁矿的氧化产生大量  $H_2S$ , 形成酸性环境 (莫光员等, 2013), 利于风化产物中各类元素的分异 (同化)—析出 (溶解)—沉淀 (迁移)—富集 (贫化)。受全球性冈瓦纳冰期的影响, 冰川扩张 (冰期) 与收缩 (间冰期) 引起古海平面周期性升降, 发生大规模海退及间歇性或交替性海侵 (王洪浩等, 2014; 杜远生等, 2020b),  $P_{1d}$  经历了风化分解与搬运重组、渗流淋滤与潜流胶结、同生叠加与后期改造等三个沉积阶段 (沉积作用)。

风化分解与搬运重组沉积阶段, 是指  $S_{1h}$  母岩或原岩中富铝硅酸盐矿物经风化作用后转化形成高岭石、水云母、绿泥石等黏土矿物, Si、P、Mn、Mg、Ca、Na、K、Cr、Ni、V、Cu 等化学元素流失, 促使 Al、Fe、Ti、H 等化学元素以及 Li、Ga、Sc、REE 等关键金属元素富集。过量的 Al 重组形成硬水铝石、一水软铝石及三水铝石等铝矿物, 过量的 Fe 重组形成褐铁矿、黄铁矿及赤铁矿等铁矿物 (汪小妹等, 2013; 张海坤等, 2021), 受地表径流或海水影响在黔中—黔北古陆周缘形成含铝岩系所需的初始胶体溶液 (Xiong *et al.*, 2021)。受全球性冈瓦纳冰期的影响, 早二叠世发生大规模海退及间歇性或交替性海侵, 大量含铝初始胶体被搬运至近海平原、滨海湿地及道真海湾内沉积, 重组形成黏土岩或铝质岩。因近海平原内化学风化强度中等至强烈、滨海湿地内水动力条件强沉积物极易被风化分解后再次搬运迁移至道真海湾内重组沉积 (宋小军等, 2025c), 或原地残留当铝矿物高度富集时改造形成铝土矿 (杜远生等, 2024)。

渗流淋滤与潜流胶结沉积阶段, 是指含铝初始胶体或初始沉积的黏土岩、铝质岩及铝土矿在陆表风氧化带、渗流带内经历的暴露淋滤, 是在海陆过渡带、渗流带内高能水体的破碎簸选, 也是在海相、潜流带内的凝聚胶结 (杜远生等, 2024)。受全球性冈瓦纳冰期的影响,

早二叠世发生大规模海退时近海平原长期暴露淋滤,以及间歇性或交替性海侵时滨海湿地发生破碎簸选(邓新等, 2010; 邓旭升等, 2020),将导致含铝初始胶体或初始沉积物 Si、P、Mn、Mg、Ca、Na、K、Cr、Ni、V、Cu 等化学元素不断流失亏损,促使 Al、Fe、Ti、H 等化学元素进一步富集,而部分 Li、Ga、Sc、REE 等关键金属元素流失后随水动力迁移至相对安静低能的道真海湾、潜流带内凝聚胶结。例如:  $P_{1d}$  中上部土状或半土状铝土矿是成矿期内经历了强烈的同生、准同生渗流淋滤、暴露改造、暖热交替作用下的产物,多分布于滨海湿地、成矿后期近地表风氧化带或渗流带内(余文超等, 2013; 宋小军等, 2025c)。  $P_{1d}$  中上部豆鲕状、碎屑状铝质岩或铝土矿是最为典型的大规模海退时由海向陆转变,经历了陆表风化暴露淋滤,间歇性或交替性海侵时海陆过渡带、渗流带内高能水体破碎簸选改造后的产物(金中国等, 2018b)。  $P_{1d}$  中上部致密状铝质岩或铝土矿经历了同生叠加的凝聚胶结作用,多在相对安静低能的道真海湾、潜流带内沉积,铝质岩保留了原有初始结构为胶状集合体,当铝矿物高度富集时形成致密状铝土矿。  $P_{1d}$  底部铁质古风化壳是  $C_2h$  顶部碳酸盐岩在强烈的化学风化过程中形成的残余富铁层,为沉积间断期内大规模海退时陆表风氧化带之上暴露淋滤的产物,当海侵时开放富氧的环境中高能水体改造形成铁质结核或褐铁矿“铁帽”(杜远生等, 2013, 2024, 2026; 余文超等, 2013)。

同生叠加与后期改造沉积阶段,包括近海平原内因受全球性冈瓦纳冰期的影响,早二叠世发生大规模海退时,风化分解与搬运重组作用导致绝大部分含铝岩系变薄甚至缺失,仅在相对低洼的浅水湖泊、溶蚀洼地、河道沟谷内剩余残留,反映了近海平原是滨海湿地、道真海湾含铝岩系最为直接的物源区(刘辰生等, 2015; Xiong *et al.*, 2021);包括近海平原、滨海湿地内、渗流带内豆鲕状、碎屑状铝质岩或铝土矿经历暴露淋滤作用后改造成为高品位的土状或半土状铝土矿(余文超等, 2013);包括道真海湾、潜流带内黏土岩或铝质岩经历凝聚胶结作用后形成致密状铝质岩或铝土矿;也包括含铝岩系盖层的成岩作用、压实作用,二叠纪晚期峨眉山玄武岩的热动力作用,以及区域构造作用将含铝岩系或铝土矿中三水铝石与一水软铝石脱水转化成一水硬铝石。后期改造作用还包括因构造抬升、断裂破坏暴露于地表或浅表的含铝岩系或矿体,发生脱 Si、沉 Fe、除 S、富 Al 等沉积改造,最终形成不同品级、不同类型的岩矿石(宋小军等, 2021, 2025c; 杜远生等, 2024, 2026)。

特别强调,贵州务正道地区下二叠统大竹园组沉积模式经历的三个沉积阶段(沉积作用)不是单一孤立的,而是协同关联的;除地层层序及后期改造之外各沉积阶段不分先后,除有利于矿产资源富集之外各沉积阶段不分主次;具有典型的同生、准同生、互叠加、再改造、差异成矿的沉积特征。

勘查过程中发现道真海湾内铝土矿一般厚 0.50~2.88 m,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  介于 40%~65.32%,  $\text{Al/Si}$  介于 1.83~10.31; 锂矿一般厚 0.45~5.81 m,  $\text{Li}_2\text{O}$  介于 0.20%~1.40%。滨海湿地内铝土矿一般厚 0.60~4.50 m,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  介于 45%~77.50%,  $\text{Al/Si}$  介于 2.02~44.41; 锂矿一般厚 0.20~2.16 m,  $\text{Li}_2\text{O}$  介于 0.20%~0.80%。近海平原内铝土矿一般厚 0~1.26 m,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  介于 42.38%~68.75%,  $\text{Al/Si}$  介于 1.93~7.57; 锂矿一般厚 0~1.15 m,  $\text{Li}_2\text{O}$  介于 0.20%~0.55%。进一步证实道真海湾是锂矿 (Li) 最为理想的沉积环境, 次为铝土矿 (Al); 滨海湿地是铝土矿 (Al) 最为理想的沉积环境, 次为锂矿 (Li); 近海平原一定程度不利于矿产资源富集或保存, 但在近海平原内浅水湖泊、溶蚀洼地、河道沟谷是铝土矿 (Al) 相对重要的沉积环境 (宋小军等, 2025c)。

综上, 受多期次构造旋回运动及全球性冈瓦纳冰期的影响, 务正道地区  $\text{P}_1d$  沉积盆地为半封闭海湾, 由道真海湾、滨海湿地及近海平原组成 (宋小军等, 2025c); 沉积物源以基底  $\text{S}_1h$  铝硅酸盐岩为主 (金中国等, 2013; 余文超等, 2014a; 向贤礼等, 2015)。岩相类型有铁质古风化壳、铁质黏土岩、铝质黏土岩、铝质岩、铝土矿、含碳质或钙质铝质黏土岩, 在不同的沉积条件中发育程度各不相同, 具有层序性; 在纵向上沉积序列特征总体为黏土岩—铝质岩—铝土矿—铝质岩—黏土岩, 具有旋回性 (杜远生等, 2020a)。矿产类型有沉积型铝土矿 (Al)、黏土型锂矿 (Li), 并富集 Fe、Ti、Ga、Sc、REE 等关键金属资源, 不同的沉积环境中富集程度各不相同 (李文昌等, 2022; 王学求等, 2025)。

## 6 结论

(1) 务正道地区大竹园组主要由黏土岩、铝质岩、铝土矿组成, 严格受基底黄龙组碳酸盐岩溶蚀洼地与韩家店组铝硅酸盐岩准平原化的控制, 具有层序性、旋回性等基本沉积特征, 是经时空演化的一套与沉积型铝土矿 (Al)、黏土型锂矿 (Li)、Fe、Ti、Ga、Sc、REE 等关键金属资源有成因联系的岩矿石组合。

(2) 务正道地区大竹园组沉积盆地为半封闭海湾, 由道真海湾、滨海湿地及近海平原组成; 沉积物源以基底韩家店组铝硅酸盐岩为主。沉积环境古气候条件温暖湿润至炎热潮湿, 化学风化强度中等至强烈, 以富氧原始沉积与风氧化混合的半咸水为主; 开放氧化、炎热潮湿、化学风化强烈、水动力最强的海陆过渡沉积环境中更利于形成铝土矿。

(3) 务正道地区大竹园组受晚石炭世—早二叠世全球性冈瓦纳冰期大规模海退及间歇性或交替性海侵的影响, 至少存在两次沉积旋回, 体现在古气候转变、古海平面升降、沉积相演化、沉积序列特征等方面具有旋回性。

(4) 根据沉积盆地、沉积物源、沉积环境、沉积旋回等特征规律综合研究, 建立了贵

州务正道地区下二叠统大竹园组沉积模式，经历的三个沉积阶段（沉积作用）具有同生、准同生、互叠加、再改造、差异成矿等典型沉积特征，产出的铝土矿、锂矿、稀土等矿产资源属于沉积型。

致谢 真诚感谢自 2009 年以来在务正道地区工作中同事同行、专家学者、父老乡亲的热心帮助！衷心感谢自然资源部高层次科技创新人才工程（地质找矿方向）含铝岩系锂资源成矿规律与找矿勘查研究创新团队的辛勤付出！也非常感谢三位评审专家、编辑部老师为本文提出宝贵的修改意见！

#### 参考文献（References）

- 崔滔, 焦养泉, 杜远生, 等. 2013. 黔北地区铝土矿矿物学与地球化学特征[J]. 中国有色金属学报, 23(10): 2905-2920. [Cui Tao, Jiao Yangquan, Du Yuansheng, et al. 2013. Mineralogical and geochemical characteristic of bauxite in northern Guizhou[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 23(10): 2905-2920.]
- 崔滔, 焦养泉, 杜远生, 等. 2014. 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, 16(1): 9-18. [Cui Tao, Jiao Yangquan, Du Yuansheng, et al. 2014. Sedimentary palaeogeography and its mineralization significance of the Early Permian bauxite in Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou province[J]. Journal of Palaeogeography, 16(1): 9-18.]
- 崔滔, 闫俊, 张敏. 2022. 黔北沉积型铝土矿鲕粒成因[J]. 中国有色金属学报, 32(2): 586-602. [Cui Tao, Yan Jun, Zhang Min. 2022. Origin of oolites of sedimentary bauxite in northern Guizhou, China[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 32(2): 586-602.]
- 崔银亮, 徐恒, 王根厚, 等. 2017. 云南丘北飞尺角矿区铝土矿(岩)地球化学及成因[J]. 地球学报, 38(3): 372-384. [Cui Yinliang, Xu Heng, Wang Genhou, et al. 2017. Geochemistry and genesis of the bauxite ore (rock) in the Feichijiao ore district, Qiubei city, Yunnan province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 38(3): 372-384.]
- 邓新, 杨坤光, 刘彦良, 等. 2010. 黔中隆起性质及其构造演化[J]. 地学前缘, 17(3): 79-89. [Deng Xin, Yang Kunguang, Liu Yanliang, et al. 2010. Characteristics and tectonic evolution of Qianzhong uplift[J]. Earth Science Frontiers, 17(3): 79-89.]
- 邓旭升, 杜远生, 余文超, 等. 2020. “黔中隆起”和贵州晚古生代古地理演化及其对铝土矿的控矿作用[J]. 古地理学报, 22(5): 872-892. [Deng Xusheng, Du Yuansheng, Yu Wenchao, et al. 2020. ‘Qianzhong uplift’ and evolution of the Late Paleozoic palaeogeography and its control on formation of bauxite in Guizhou province[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 22(5): 872-892.]
- 杜远生, 余文超. 2020. 沉积型铝土矿的陆表淋滤成矿作用: 兼论铝土矿床的成因分类[J]. 古地理学报, 22(5): 812-826. [Du Yuansheng, Yu Wenchao. 2020. Subaerial leaching process of sedimentary bauxite and the discussion on classifications of bauxite deposits[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 22(5): 812-826.]
- 杜远生, 余文超, 张亚冠. 2020a. 矿产沉积学: 一个新的交叉学科方向[J]. 古地理学报, 22(4): 601-619. [Du Yuansheng, Yu Wenchao, Zhang Yaguan. 2020a. Ore sedimentology: A developing interdisciplinary research direction of sedimentology[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 22(4): 601-619.]
- 杜远生, 周琦, 张连昌, 等. 2020b. 重大地质事件与大规模沉积成矿作用(代序言)[J]. 古地理学报, 22(5): 807-811. [Du Yuansheng, Zhou Qi, Zhang Lianchang, et al. 2020b. Major geological events and large-scale sedimentary mineralization (Generation of the preface)[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 22(5): 807-811.]
- 杜远生, 余文超, 翁申富, 等. 2024. 铝土矿及伴生关键金属矿床的岩石(矿石)组成、成矿序列及成矿机理[J]. 古地理学报, 26(5): 1152-1166. [Du Yuansheng, Yu Wenchao, Weng Shenfu, et al. 2024. Lithologic (ore) types, formation sequence and metallogenic mechanism of bauxite and associated critical metal deposits[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 26(5): 1152-1166.]
- 杜远生, 庞大卫, 余文超, 等. 2026. 基于定量古地理重建的黔中下石炭统九架炉组铝土矿矿产沉积学研究[J]. 古地理学报, 28(1): 1-24. [Du Yuansheng, Pang Dawei, Yu Wenchao, et al. 2026. Quantitative palaeogeographic reconstruction of the Early

- Carboniferous Jiujialu Formation bauxite in central Guizhou province: A sedimentary metallogenic perspective[J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 28(1): 1-24.]
- 杜远生, 周琦, 金中国, 等. 2013. 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*, 32(1): 1-6. [Du Yuansheng, Zhou Qi, Jin Zhongguo, et al. 2013. 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*, 32(1): 1-6.]
- 范宏鹏, 叶霖, 黄智龙. 2021. 铝土矿(岩)中伴生的锂资源[J]. *矿物学报*, 41(4/5): 382-390. [Fan Hongpeng, Ye Lin, Huang Zhilong. 2021. The associated lithium resource in bauxite (bauxite-bearing rock)[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 41(4/5): 382-390.]
- 高兰, 王登红, 熊晓云, 等. 2014. 中国铝矿成矿规律概要[J]. *地质学报*, 88(12): 2284-2295. [Gao Lan, Wang Denghong, Xiong Xiaoyun, et al. 2014. Summary on aluminum ore deposits minerogenetic regulation in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(12): 2284-2295.]
- 耿元生, 沈其韩, 杜利林, 等. 2016. 区域变质作用与中国大陆地壳的形成与演化[J]. *岩石学报*, 32(9): 2579-2608. [Geng Yuansheng, Shen Qihan, Du Lilin, et al. 2016. Regional metamorphism and continental growth and assembly in China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(9): 2579-2608.]
- 谷静, 黄智龙, 金中国, 等. 2015. 贵州务川瓦厂坪铝土矿床稀土元素地球化学特征及其对成矿过程的指示[J]. *矿物学报*, 35(2): 229-238. [Gu Jing, Huang Zhilong, Jin Zhongguo, et al. 2015. Rare-earth element (REE) geochemistry and ore-forming process of the Wachangping bauxite deposit, Wuchuan - Zheng'an - Daozhen area, northern Guizhou province, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 35(2): 229-238.]
- 韩英, 邹林, 王京彬, 等. 2016. 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*, 35(4): 653-662, 691. [Han Ying, Zou Lin, Wang Jingbin, et al. 2016. Geochemical characteristics of bauxite in the Wuzhengdao area, Guizhou province[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 35(4): 653-662, 691.]
- 韩忠华, 吴波, 翁中富, 等. 2016. 黔北务正道地区含铝岩系地球化学特征及地质意义[J]. *地质与勘探*, 52(4): 678-687. [Han Zhonghua, Wu Bo, Weng Shenfu, et al. 2016. Geochemical characteristics of bauxite deposits in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area of Guizhou province and their geological implications[J]. *Geology and Exploration*, 52(4): 678-687.]
- 何登发. 2022. 中国多旋回叠合沉积盆地的形成演化、地质结构与油气分布规律[J]. *地学前缘*, 29(6): 24-59. [He Dengfa. 2022. Multi-cycle superimposed sedimentary basins in China: Formation, evolution, geologic framework and hydrocarbon occurrence[J]. *Earth Science Frontiers*, 29(6): 24-59.]
- 胡瑞忠, 温汉捷, 叶霖, 等. 2020. 扬子地块西南部关键金属元素成矿作用[J]. *科学通报*, 65(33): 3700-3714. [Hu Ruizhong, Wen Hanjie, Ye Lin, et al. 2020. Metallogeny of critical metals in the southwestern Yangtze Block[J]. *Chinese Science Bulletin*, 65(33): 3700-3714.]
- 黄兴, 张雄华, 杜远生, 等. 2013. 黔北务正道地区及邻区石炭纪—二叠纪之交海平面变化对铝土矿的控制[J]. *地质科技情报*, 32(1): 80-86. [Huang Xing, Zhang Xionghua, Du Yuansheng, et al. 2013. Control of sea-level changes over the forming of bauxite between Carboniferous and Permian in northern Guizhou and adjacent regions[J]. *Geological Science and Technology Information*, 32(1): 80-86.]
- 金中国, 刘辰生, 邹林, 等. 2018a. 贵州务一正一道地区二叠纪铝土矿沉积环境地球化学证据[J]. *地质学报*, 92(4): 817-827. [Jin Zhongguo, Liu Chensheng, Zou Lin, et al. 2018a. Geochemical evidence of sedimentary environment of Permian bauxite in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, Guizhou province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 92(4): 817-827.]
- 金中国, 刘玲, 黄智龙, 等. 2012. 贵州务正道地区铝土矿床稀土元素组成及地质意义[J]. *地质与勘探*, 48(6): 1067-1076. [Jin Zhongguo, Liu Ling, Huang Zhilong, et al. 2012. REE composition of the bauxite deposits in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, Guizhou province and its geological significance[J]. *Geology and Exploration*, 48(6): 1067-1076.]
- 金中国, 刘玲, 黄智龙, 等. 2019. 贵州务一正一道地区铝土矿含矿岩系中三稀元素赋存状态、富集机理及资源潜力[J]. *地质学报*, 93(11): 2847-2861. [Jin Zhongguo, Liu Ling, Huang Zhilong, et al. 2019. Occurrence state, enrichment mechanism and resource potential of rare earth, rare metal and rare-scattered elements in ore-bearing rocks in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen bauxite deposit, Guizhou province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(11): 2847-2861.]
- 金中国, 向贤礼, 黄智龙, 等. 2011. 黔北务川瓦厂坪铝土矿床元素迁移规律研究[J]. *地质与勘探*, 47(6): 957-966. [Jin Zhongguo,

- Xiang Xianli, Huang Zhilong, et al. 2011. Regularities of elements migration in the Wachangping bauxite deposit in Wuchuan county, northern Guizhou province[J]. *Geology and Exploration*, 47(6): 957-966.]
- 金中国, 郑明泓, 刘玲, 等. 2018b. 贵州福泉高洞铝土矿床成矿地质地球化学特征[J]. *地质与勘探*, 54(3): 522-534. [Jin Zhongguo, Zheng Minghong, Liu Ling, et al. 2018b. Geological and geochemical characteristics of mineralization in the Gaodong bauxite deposit, Fuquan, Guizhou province[J]. *Geology and Exploration*, 54(3): 522-534.]
- 金中国, 郑明泓, 刘玲, 等. 2023. 贵州铝土矿含矿岩系中锂的分布特征及富集机理[J]. *地质学报*, 97(1): 69-81. [Jin Zhongguo, Zheng Minghong, Liu Ling, et al. 2023. Distribution characteristics and enrichment mechanism of lithium in bauxite series in Guizhou province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 97(1): 69-81.]
- 金中国, 周家喜, 黄智龙, 等. 2013. 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*, 20(6): 226-239. [Jin Zhongguo, Zhou Jiayi, Huang Zhilong, et al. 2013. 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*, 20(6): 226-239.]
- 金中国, 周家喜, 黄智龙, 等. 2015. 黔北务—正—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*, 42(6): 1910-1918. [Jin Zhongguo, Zhou Jiayi, Huang Zhilong, et al. 2015. 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*, 42(6): 1910-1918.]
- 金中国, 邹林, 张力, 等. 2018c. 贵州务—正—道地区铝土矿成矿模式与找矿模型[J]. *沉积学报*, 36(5): 914-926. [Jin Zhongguo, Zou Lin, Zhang Li, et al. 2018c. Metallogenic and prospecting models of bauxite in Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, Guizhou province[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 36(5): 914-926.]
- 雷志远, 翁申富, 陈强, 等. 2013. 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*, 32(1): 8-12. [Lei Zhiyuan, Weng Shenfu, Chen Qiang, et al. 2013. 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*, 32(1): 8-12.]
- 黎彤. 1976. 化学元素的地球丰度[J]. *地球化学*, (3): 167-174. [Li Tong. 1976. Chemical element abundances in the Earth and its major shells[J]. *Geochimica*, (3): 167-174.]
- 李维波, 李江海, 王洪浩, 等. 2015. 二叠纪古板块再造与岩相古地理特征分析[J]. *中国地质*, 42(2): 685-694. [Li Weibo, Li Jianghai, Wang Honghao, et al. 2015. Characteristics of the reconstruction of Permian paleoplate and lithofacies paleogeography[J]. *Geology in China*, 42(2): 685-694.]
- 李文昌, 李建威, 谢桂青, 等. 2022. 中国关键矿产现状、研究内容与资源战略分析[J]. *地学前缘*, 29(1): 1-13. [Li Wenchang, Li Jianwei, Xie Guiqing, et al. 2022. Critical minerals in China: Current status, research focus and resource strategic analysis[J]. *Earth Science Frontiers*, 29(1): 1-13.]
- 刘辰生, 金中国, 郭建华. 2015. 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*, 25(1): 179-189. [Liu Chensheng, Jin Zhongguo, Guo Jianhua. 2015. Sequence stratigraphy of bauxite deposition in Wuzhengdao area in Qianbei, north Guizhou[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 25(1): 179-189.]
- 刘辰生, 肖明国, 苏娟, 等. 2018. 黔北务正道地区沉积型铝土矿富集成矿主控因素分析[J]. *沉积学报*, 36(2): 302-309. [Liu Chensheng, Xiao Mingguo, Su Juan, et al. 2018. Effect of sea level change on enrichment and mineralization of bauxite: Taking Qianbei bauxite for example[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 36(2): 302-309.]
- 刘国栋, 付勇, 何伟, 等. 2021. 中国铝土岩系中伴生钪资源富集规律及富集机制初探[J]. *地质论评*, 67(4): 952-972. [Liu Guodong, Fu Yong, He Wei, et al. 2021. Enrichment mechanism and regularity of associated scandium resources in bauxite series of China[J]. *Geological Review*, 67(4): 952-972.]
- 刘平, 韩忠华, 聂坤. 2022. 黔中—渝南岩溶型铝土矿含矿岩系特征、控制条件及生成发展模式[J]. *地质论评*, 68(6): 2147-2174. [Liu Ping, Han Zhonghua, Nie Kun. 2022. Characteristics of ore-bearing rock series, control conditions and generative development model of karst bauxite deposit in central Guizhou—southern Chongqing[J]. *Geological Review*, 68(6): 2147-2174.]
- 刘平, 廖友常, 张雅静. 2016. 黔北大竹园地区铝土矿含矿岩系沉积环境及形成机制[J]. *中国地质*, 43(6): 2173-2191. [Liu Ping, Liao Youchang, Zhang Yajing. 2016. The sedimentary environment and formation mechanism of bauxite-bearing rock series in

- Dazhuyuan area, northern Guizhou province[J]. *Geology in China*, 43(6): 2173-2191.]
- 刘幼平, 程国繁, 周文龙, 等. 2016. 贵州铝土矿成矿区(带)划分[J]. *地质科技情报*, 35(3): 128-132. [Liu Youping, Cheng Guofan, Zhou Wenlong, et al. 2016. Division of bauxite mineralization area (belt) in Guizhou province[J]. *Geological Science and Technology Information*, 35(3): 128-132.]
- 罗靖伟, 徐海棚, 庞保成, 等. 2025. 桂西地区沉积型铝土矿豆(鲕)粒成因及其对成矿作用的指示[J]. *地质论评*, 71(5): 1629-1652. [Luo Jingwei, Xu Haipeng, Pang Baocheng, et al. 2025. Genesis and indication of mineralization of pisolites (ooids) in sedimentary bauxite deposits from western Guangxi[J]. *Geological Review*, 71(5): 1629-1652.]
- 罗培麒, 付勇, 唐波, 等. 2023. 中国镓矿分布规律、成矿机制及找矿方向[J]. *地球学报*, 44(4): 599-624. [Luo Peiqi, Fu Yong, Tang Bo, et al. 2023. Distribution, metallogenic mechanism and prospecting direction of gallium deposits in China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 44(4): 599-624.]
- 毛景文, 袁顺达, 谢桂青, 等. 2019. 21世纪以来中国关键金属矿产找矿勘查与研究新进展[J]. *矿床地质*, 38(5): 935-969. [Mao Jingwen, Yuan Shunda, Xie Guiqing, et al. 2019. New advances on metallogenic studies and exploration on critical minerals of China in 21st century[J]. *Mineral Deposits*, 38(5): 935-969.]
- 莫光员, 金中国, 龚和强, 等. 2013. 黔北道真新民铝土矿床地质特征及控矿因素探讨[J]. *地质科技情报*, 32(1): 40-45. [Mo Guangyuan, Jin Zhongguo, Gong Heqiang, et al. 2013. Geological characteristics and ore-controlling factors of the Xinmin bauxite deposit in Daozhen county, northern Guizhou province[J]. *Geological Science and Technology Information*, 32(1): 40-45.]
- 潘桂棠, 陆松年, 肖庆辉, 等. 2016. 中国大地构造阶段划分和演化[J]. *地学前缘*, 23(6): 1-23. [Pan Guitang, Lu Songnian, Xiao Qinghui, et al. 2016. Division of tectonic stages and tectonic evolution in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 23(6): 1-23.]
- 申博恒, 沈树忠, 吴琼, 等. 2022. 华北板块石炭纪—二叠纪地层时间框架[J]. *中国科学: 地球科学*, 52(7): 1181-1212. [Shen Boheng, Shen Shuzhong, Wu Qiong, et al. 2022. Carboniferous and Permian integrative stratigraphy and timescale of North China Block[J]. *Science China Earth Sciences*, 52(7): 1181-1212.]
- 宋小军, 袁睿, 巩鑫, 等. 2021. 黔北还打岩铝土矿地质特征及找矿潜力[J]. *四川地质学报*, 41(2): 215-220. [Song Xiaojun, Yuan Rui, Gong Xin, et al. 2021. Geological features and prospecting potential of the huandayan bauxite deposit in north Guizhou[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 41(2): 215-220.]
- 宋小军, 付桥林, 姜伟, 等. 2023. 贵州务正道地区含铝岩系中锂资源勘查技术体系及深部找矿突破[C]/第二届全国矿产勘查大会论文集(二). 威海: 中国地球物理学会金属矿勘查专业委员会, 27-32. [Song Xiaojun, Fu Qiaolin, Jiang Wei, et al. 2023. Technical system for lithium resource exploration in aluminum-bearing rock series in Wuzhengdao area, Guizhou province and breakthrough in deep prospecting[C]/Proceedings of the second national mineral exploration conference. Weihai, 27-32.]
- 宋小军, 金中国, 曾道国, 等. 2025a. 贵州务正道地区含铝岩系层序地质特征及关键金属资源富集机制[C]/第十一届全国成矿理论与找矿方法学术讨论会论文摘要集. 福州: 中国矿物岩石地球化学学会矿床地球化学专业委员会, 181-182. [Song Xiaojun, Jin Zhongguo, Zeng Daoguo, et al. 2025a. Geological characteristics of the aluminum-bearing rock sequence and enrichment mechanism of key metal resources in the Wuzhengdao area, Guizhou province[C]/Abstracts of the 11th national symposium on metallogenic theory and prospecting methods. Fuzhou: 181-182.]
- 宋小军, 曾道国, 巩鑫. 2025b. 贵州含铝岩系黏土型锂矿勘查进展及找矿认识[C]/第三届全国矿产勘查大会论文集. 南昌: 中国地球物理学会金属矿勘查专业委员会, 467-472. [Song Xiaojun, Zeng Daoguo, Gong Xin. 2025b. Progress in exploration and prospecting understanding of clay-type lithium deposits in the aluminum-bearing rock series in Guizhou[C]/Proceedings of the third national mineral exploration conference. Nanchang, 467-472.]
- 宋小军, 曾道国, 金中国, 等. 2025c. 贵州务正道地区含铝岩系地质特征与矿产资源成因及深部找矿预测[J]. *矿物学报*, 45(4): 786-806. [Song Xiaojun, Zeng Daoguo, Jin Zhongguo, et al. 2025c. Geological characteristics and metallogenesis of aluminum-bearing rock series as well as the exploration prediction of aluminium resource in depth in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, Guizhou province[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 45(4): 786-806.]
- 孙莉, 肖克炎, 娄德波. 2018. 中国铝土矿资源潜力预测评价[J]. *地学前缘*, 25(3): 82-94. [Sun Li, Xiao Keyan, Lou Debo. 2018. Mineral prospectivity of bauxite resources in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 25(3): 82-94.]
- 唐波, 付勇, 龙克树, 等. 2021. 中国铝土矿含铝岩系伴生稀土资源分布特征及富集机制[J]. *地质学报*, 95(8): 2284-2305. [Tang

- Bo, Fu Yong, Long Keshu, et al. 2021. Distribution characteristics and enrichment mechanism of associated rare earth elements resource in aluminum-bearing rock series in bauxite deposits of China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(8): 2284-2305.]
- 汪小妹, 焦养泉, 杜远生, 等. 2013. 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*, 32(1): 27-33. [Wang Xiaomei, Jiao Yangquan, Du Yuansheng, et al. 2013. Rare earth element geochemistry of bauxite in Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou province[J]. *Geological Science and Technology Information*, 32(1): 27-33.]
- 王登红, 代鸿章, 刘晋宝, 等. 2024. 中国锂矿的多旋回深循环内外生一体化成矿理论及其找矿应用[J]. *地质学报*, 98(3): 889-897. [Wang Denghong, Dai Hongzhang, Liu Shanbao, et al. 2024. The "multi-cycle, deep circulation, integration of internal and external" theory of lithium deposits and its prospecting applications in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 98(3): 889-897.]
- 王洪浩, 李江海, 李维波, 等. 2014. 冈瓦纳大陆古生代冰盖分布研究[J]. *中国地质*, 41(6): 2132-2143. [Wang Honghao, Li Jianghai, Li Weibo, et al. 2014. A study of the distribution of ice sheets on Gondwana Supercontinent in Paleozoic[J]. *Geology in China*, 41(6): 2132-2143.]
- 王辉, 张福强, 张德高, 等. 2023. 黏土型锂矿床勘查开发过程中的瓶颈问题和若干思考[J]. *地质论评*, 69(4): 1298-1312. [Wang Hui, Zhang Fuqiang, Zhang Degao, et al. 2023. The bottleneck problem and some thoughts on the process of exploration and development of clay-type lithium deposit[J]. *Geological Review*, 69(4): 1298-1312.]
- 王剑, 崔晓庄, 王伟, 等. 2024. 华南古大陆演化及其资源环境效应: 从哥伦比亚到冈瓦纳[J]. *沉积学报*, 42(6): 1849-1875. [Wang Jian, Cui Xiaozhuang, Wang Wei, et al. 2024. Evolution of the South China paleocontinent and related resource-environmental developments: From Columbia to Gondwana[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 42(6): 1849-1875.]
- 王亮, 胡从亮, 张嘉玮, 等. 2019. 贵州深部四级断裂构造特征及与重要矿产的关系[J]. *地质力学学报*, 25(1): 36-51. [Wang Liang, Hu Congliang, Zhang Jiawei, et al. 2019. Correlation between the structural characteristics of the deep four-level fault and the important mineral deposits in Guizhou province[J]. *Journal of Geomechanics*, 25(1): 36-51.]
- 王学求, 李龙雪, 吴慧, 等. 2025. 关键元素超常富集与战略资源效应[J]. *地学前缘*, 32(1): 11-22. [Wang Xueqiu, Li Longxue, Wu Hui, et al. 2025. Super enrichment of critical elements: Implications for strategic mineral resources[J]. *Earth Science Frontiers*, 32(1): 11-22.]
- 温汉捷, 罗重光, 杜胜江, 等. 2020. 碳酸盐黏土型锂资源的发现及意义[J]. *科学通报*, 65(1): 53-59. [Wen Hanjie, Luo Chongguang, Du Shengjiang, et al. 2020. Carbonate-hosted clay-type lithium deposit and its prospecting significance[J]. *Chinese Science Bulletin*, 65(1): 53-59.]
- 吴福元, 万博, 赵亮, 等. 2020. 特提斯地球动力学[J]. *岩石学报*, 36(6): 1627-1674. [Wu Fuyuan, Wan Bo, Zhao Liang, et al. 2020. Tethyan geodynamics[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 36(6): 1627-1674.]
- 武国辉, 刘幼平, 张应文. 2006. 黔北务—正道地区铝土矿地质特征及资源潜力分析[J]. *地质与勘探*, 42(2): 39-43. [Wu Guohui, Liu Youping, Zhang Yingwen. 2006. Geological characters and aluminum ore resources potential in the Wuchuan—Zhengan—Daozhen area, Guizhou[J]. *Geology and Prospecting*, 42(2): 39-43.]
- 向贤礼, 金中国, 黄智龙, 等. 2015. 黔北北部铝土矿床成矿物质源碎屑锆石 U-Pb 年代学证据[J]. *矿物学报*, 35(4): 463-472. [Xiang Xianli, Jin Zhongguo, Huang Zhilong, et al. 2015. Origin of ore-forming materials for bauxite deposits in northern Guizhou province, China: Evidence from detrital zircon U-Pb dating[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 35(4): 463-472.]
- 徐林刚, 孙莉, 孙凯. 2023. 中国铝土矿的成矿规律、关键科学问题与研究方法[J]. *矿床地质*, 42(1): 22-40. [Xu Lingang, Sun Li, Sun Kai. 2023. Metallogenic regularity, key scientific problems and research methods of bauxite in China[J]. *Mineral Deposits*, 42(1): 22-40.]
- 杨虎城, 林良彪, 余瑜, 等. 2022. 川西南天全地区中二叠统碳酸盐岩地球化学特征及其古环境意义[J]. *矿物岩石*, 42(2): 47-59. [Yang Hucheng, Lin Liangbiao, Yu Yu, et al. 2022. Geochemical characteristics and paleo-environmental significance of Middle Permian carbonate rocks in Tianquan area, southwestern Sichuan province, China[J]. *Mineralogy and Petrology*, 42(2): 47-59.]
- 杨江海, 颜佳新, 黄燕. 2017. 从晚古生代冰室到早中生代温室的气候转变: 兼论东特提斯低纬区的沉积记录与响应[J]. *沉积学报*, 35(5): 981-993. [Yang Jianghai, Yan Jiaxin, Huang Yan. 2017. The Earth's penultimate icehouse-to-greenhouse climate transition and related sedimentary records in low-latitude regions of eastern Tethys[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 35(5): 981-993.]
- 杨瑞东, 莫洪成, 罗朝坤, 等. 2025. 铝土矿成矿铁铝分异过程研究: 以黔中石炭系九架炉组铝铁岩系为例[J]. *地质学报*, 99(8):

- 2711-2723. [Yang Ruidong, Mo Hongcheng, Luo Chaokun, et al. 2025. Study on the process of iron-aluminum differentiation in bauxite formation: A case study of the iron-aluminum rock series in the Jiujialu Formation of the carboniferous system in central Guizhou[J]. *Acta Geologica Sinica*, 99(8): 2711-2723.]
- 殷科华. 2009. 黔北务正道铝土矿的成矿作用及成矿模式[J]. *沉积学报*, 27(3): 452-457. [Yin Kehua. 2009. Mineralization and metallogenic model for bauxite in the Wuchuan-Zheng'an Daozhen area, northern Guizhou[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 27(3): 452-457.]
- 余文超, 杜远生, 顾松竹, 等. 2013. 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*, 32(1): 34-39. [Yu Wenchao, Du Yuansheng, Gu Songzhu, et al. 2013. Multiperiod 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*, 32(1): 34-39.]
- 余文超, 杜远生, 熊国林, 等. 2020. 中国铝土矿沉积中的碎屑锆石记录: 对铝土矿物源模式与矿床分类的启示[J]. *古地理学报*, 22(5): 947-964. [Yu Wenchao, Du Yuansheng, Xiong Guolin, et al. 2020. Detrital zircon records in bauxite deposits of China: Implication for the provenance model and ore deposits classification of bauxite[J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 22(5): 947-964.]
- 余文超, 杜远生, 周锦涛, 等. 2023. 中国铝土矿成矿作用的物质来源与深时环境因素: 进展与讨论[J]. *地质学报*, 97(9): 3056-3074. [Yu Wenchao, Du Yuansheng, Zhou Jintao, et al. 2023. Provenance and deep-time environmental factors for bauxitization in China: Progress and discussion[J]. *Acta Geologica Sinica*, 97(9): 3056-3074.]
- 余文超, 杜远生, 周琦, 等. 2014a. 黔北务正道地区下二叠统铝土矿层物源研究: 来自碎屑锆石年代学的证据[J]. *古地理学报*, 16(1): 19-29. [Yu Wenchao, Du Yuansheng, Zhou Qi, et al. 2014a. Provenance of bauxite beds of the Lower Permian in Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou province: Evidence from detrital zircon chronology[J]. *Journal of Palaeogeography*, 16(1): 19-29.]
- 余文超, 杜远生, 周琦, 等. 2014b. 黔北务正道地区铝土矿层特征及其反映的早二叠世古气候[J]. *古地理学报*, 16(1): 30-40. [Yu Wenchao, Du Yuansheng, Zhou Qi, et al. 2014b. Palaeoclimate of the Early Permian: Evidence from characteristics of bauxite beds in Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou province[J]. *Journal of Palaeogeography*, 16(1): 30-40.]
- 张海坤, 胡鹏, 姜军胜, 等. 2021. 铝土矿分布特点、主要类型与勘查开发现状[J]. *中国地质*, 48(1): 68-81. [Zhang Haikun, Hu Peng, Jiang Junsheng, et al. 2021. Distribution, genetic types and current situation of exploration and development of bauxite resources[J]. *Geology in China*, 48(1): 68-81.]
- 张克信, 潘桂荣, 何卫红, 等. 2015. 中国构造—地层大区划分新方案[J]. *地球科学*, 40(2): 206-233. [Zhang Kexin, Pan Guitang, He Weihong, et al. 2015. New division of tectonic-strata superregion in China[J]. *Earth Science*, 40(2): 206-233.]
- 张七道, 蒋少涌, 王微, 等. 2024. 铝土岩系和煤系地层中沉积黏土型锂矿床: 研究现状与展望[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 43(1): 90-101. [Zhang Qidao, Jiang Shaoyong, Wang Wei, et al. 2024. Current status and prospect of researches on sediment-hosted Li deposits in bauxite formations and coal-bearing strata in China[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 43(1): 90-101.]
- 张启连, 黄光琼, 韦访, 等. 2024. 桂西二叠系铝土矿含矿岩系沉积相特征及其演化[J]. *地质通报*, 43(10): 1734-1755. [Zhang Qilian, Huang Guangqiong, Wei Fang, et al. 2024. Characteristics and evolution of sedimentary facies of bauxite-bearing rocks series of Permian bauxite deposits in western Guangxi[J]. *Geological Bulletin of China*, 43(10): 1734-1755.]
- 钟海仁, 孙艳, 杨岳清, 等. 2019. 铝土矿(岩)型锂资源及其开发利用潜力[J]. *矿床地质*, 38(4): 898-916. [Zhong Hairen, Sun Yan, Yang Yueqing, et al. 2019. Bauxite (aluminum)-type lithium resources and analysis of its development and utilization potential[J]. *Mineral Deposits*, 38(4): 898-916.]
- 仲钰天, 陈吉涛, 高彪, 等. 2023. 晚古生代大冰期碳—水循环回顾与展望[J]. *科学通报*, 68(12): 1544-1556. [Zhong Yutian, Chen Jitao, Gao Biao, et al. 2023. Carbon-water cycles during the Late Paleozoic Ice Age: Reviews and prospects[J]. *Chinese Science Bulletin*, 68(12): 1544-1556.]
- 周文龙, 刘幼平. 2016. 贵州铝土矿基底地层特征及与成矿的关系[J]. *地质与勘探*, 52(3): 462-471. [Zhou Wenlong, Liu Youping. 2016. Characteristics of basement strata in bauxite deposits of Guizhou province and their relationships to regional mineralization[J].

- Geology and Exploitation, 52(3): 462-471.]
- Calagari A A, Abedini A. 2007. Geochemical investigations on Permo - Triassic bauxite horizon at Kanisheeteh, east of Bukan, West-Azarbaidjan, Iran[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 94(1/2/3): 1-18.
- Gu J, Huang Z L, Fan H P, et al. 2013a. Mineralogy, geochemistry, and genesis of lateritic bauxite deposits in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou province, China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 130: 44-59.
- Gu J, Huang Z L, Fan H P, et al. 2013b. 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*, 70-71: 265-282.
- Kurtz A C, Derry L A, Chadwick O A, et al. 2000. Refractory element mobility in volcanic soils[J]. *Geology*, 28(8): 683 -686.
- Lei Z Y, Ling W L, Wu H, et al. 2023. Geochemistry and mineralization of the Permian bauxites with contrast bedrocks in northern Guizhou, South China[J]. *Journal of Earth Science*, 34(2): 487-503.
- Li P G, Yu W C, Du Y S, et al. 2020. Influence of geomorphology and leaching on the formation of Permian bauxite in northern Guizhou province, South China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 210: 106446.
- MacLean W H. 1990. Mass change calculations in altered rock series[J]. *Mineralium Deposita*, 25(1): 44-49.
- MacLean W H, Barrett T J. 1993. Litho-geochemical techniques using immobile elements[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 48(2): 109-133.
- McLennan S M, Hemming S, McDaniel D K, et al. 1993. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics[M]//Johnsson M J, Basu A. Processes controlling the composition of clastic sediments. The Geological Society of America, Boulder, USA, 284: 21-40.
- Schellmann W. 1982. Eine neue Lateritdefinition[J]. *Geologisches Jahrbuch. Reihe D. Mineralogie, Petrographie, Geochemie, Lagerstaettkunde*, (58): 31-47.
- Schroll E, Sauer D. 1968. Beitrag zur Geochemie von Titan, Chrom, Nickel, Cobalt, Vanadium und Molibdan in bauxitischen Gesteinen und problem der stofflichen herkunft des Aluminiums[J]. *Travaux du ICSOBA*, 5: 83-96.
- Taylor S R, McLennan S M. 1985. The continental crust: Its composition and evolution: An examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications.
- Weng S F, Yu W C, Algeo T J, et al. 2019. Giant bauxite deposits of South China: Multistage formation linked to Late Paleozoic Ice Age (LPIA) eustatic fluctuations[J]. *Ore Geology Reviews*, 104: 1-13.
- Xiong G L, Yu W C, Du Y S, et al. 2021. Provenance of Lower Carboniferous bauxite deposits in northern Guizhou, China: Constraints from geochemistry and detrital zircon U-Pb ages[J]. *Journal of Earth Science*, 32(1): 235-252.
- Yu W C, Algeo T J, Yan J X, et al. 2019. Climatic and hydrologic controls on Upper Paleozoic bauxite deposits in South China[J]. *Earth-Science Reviews*, 189: 159-176.
- Zhou J T, Yu W C, Du Y S, et al. 2022. Provenance change and continental weathering of Late Permian bauxitic claystone in Guizhou province, Southwest China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 236: 106962.

## Sedimentary Cycles and Models of the Lower Permian Dazhuyuan Formation in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen Area, Guizhou Province

SONG XiaoJun<sup>1,2</sup>, LI ZhanKe<sup>2</sup>, JIN ZhongGuo<sup>1,3</sup>, YE Lin<sup>4</sup>, ZENG DaoGuo<sup>1</sup>, FAN HongPeng<sup>4</sup>, GONG Xin<sup>1</sup>, SU YongHu<sup>1</sup>, ZHOU WenLong<sup>1,5</sup>, REN YongLin<sup>1</sup>

**Foundation:** Guizhou Province "Light of Jiaxiu" Visiting Scholar Research and Training Program, No. [2025]2; Guizhou Province Bauxite Exploration Top Expert Team, No. CXTD[2025]006; Guizhou Province New Round of Ore Prospecting Breakthrough Strategic Action Project, No. [2023]119, [2025]71; Chinese Academy of Sciences Strategic Leading Science and Technology Special Project, No. XDA0430103; Guizhou Provincial Science and Technology Support Project, No. [2025]070

**Corresponding author:** LI ZhanKe, E-mail: lizk@cug.edu.cn; ZENG DaoGuo, E-mail: 826845843@qq.com

1. Geological and Mineral Exploration Institute, Nonferrous Metals and Nuclear Industry Geological Exploration Bureau of Guizhou, Guiyang 550005, China
2. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China
3. Guizhou Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Guiyang 550004, China
4. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China
5. Guizhou Geological and Mineral Resources Development Institute, Guiyang 550081, China

**Abstract:** **[Objective]** The aluminum bearing rock series in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area of northern Guizhou province belongs to the Lower Permian Dazhuyuan Formation ( $P_1d$ ), which is a significant bauxite-bearing stratum in South China. Significant controversies persist regarding the evolution of its sedimentary basin, sediment provenance, the relationship between diagenesis, mineralization, and geological events, as well as the types of mineral resources. **[Methods]** This study employs methods from stratigraphy, petrology, mineralogy, geochemistry, and paleogeography to investigate the characteristics of the Dazhuyuan Formation, including rock and ore types, mineral paragenesis, sediment provenance, sedimentary environment, and sedimentary cycles. **[Results]** The Dazhuyuan Formation, predominantly comprising claystone, aluminous rock, and bauxite, was deposited within a semi-enclosed bay system. From north to south this paleogeographic setting encompassed the Daozhen bay, coastal wetlands, and offshore plains. The sediment provenance is attributed primarily to the aluminosilicate rocks of the underlying the Hanjiadian Formation. The paleoclimate ranged from warm and humid to hot and humid, fostering moderate to strong chemical weathering. Deposition occurred in a predominantly brackish environment, characterized by the mixing of oxygen-rich primary sediments with weathering-derived oxides. The stratigraphic record reveals at least two distinct sedimentary cycles. **[Conclusions]** The Dazhuyuan Formation is controlled by the karst depressions in the underlying carbonate Huanglong Formation and the peneplainization of the aluminosilicate Hanjiadian Formation. Characterized by distinct sequence and cyclicity, it hosts sedimentary-type bauxite and lithium deposits. The aluminum-bearing rock series evolved through three evolutionary stages: weathering decomposition and transport reorganization, seepage leaching and subsurface flow cementation, and syngenetic superimposition with subsequent modification. These processes resulted in key characteristics such as syngenesi, penecontemporaneity, mutual superimposition, remodification, and differential mineralization. Based on this findings, a sedimentary model for the Lower Permian Dazhuyuan Formation in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area of Guizhou Province has been established.

**Key words:** aluminum bearing rock series; sedimentary bauxite deposits; clay type lithium ore; rare earth resources; key metal resources; sedimentary cycles; sedimentary models