

黔北旦坪铝土矿床胶体包粒成因 及其形成时间估算*

成 龙^{1,2} 余文超^{1,2} 杜远生^{1,2} 周锦涛^{1,2}
熊国林³ 翁申富^{2,4} 郭尚宇⁵

1 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 湖北武汉 430074

2 自然资源部基岩区矿产资源勘查工程技术创新中心, 贵州贵阳 550081

3 南京大学地球科学与工程学院, 江苏南京 210023

4 贵州省地质矿产勘查开发局 106 地质大队, 贵州遵义 563003

5 广西壮族自治区矿产资源储量评审中心, 广西南宁 530028

摘 要 世界大多数铝土矿床中均发育有同心层状的颗粒结构, 其生长过程记录了铝土矿成矿相关信息, 具备重建铝土矿成矿环境的潜力。区别于碳酸盐岩鲕粒, 对铝土矿床中这种类似鲕粒的多圈层包粒结构的研究还不够深入, 其基本的定义、成因与生长时限均不明确, 亟待进一步研究。针对这一问题, 结合现代热带氧化土剖面中淀积黏化层产出包粒结构这一特点, 对黔北务川—正安—道真(务正道)地区旦坪矿区下二叠统铝土矿开展了相关研究, 提出将铝土矿同心层状结构命名为“胶体包粒结构”。本研究在对旦坪铝土矿床典型含矿岩系剖面地质特征研究基础上, 重点对其中的胶体包粒开展了研究。旦坪铝土矿中的胶体包粒由不同类型的核心及周围交替出现的铝赤铁矿、勃姆石圈层组成。采用二分值法对包粒圆度进行了统计, 分析结果显示其圆度以圆形、近圆形为主。归一化处理包粒圈层范围为 11.2~319.5 μm 。对胶体包粒圈层数目的统计发现, 其层数以 1~3 层为主。基于以上统计数据, 研究使用 Fick 第一定律及其拓展式对铝土矿胶体包粒生长时间进行估算, 并尝试构建其扩散生长模型。胶体包粒生长时间计算结果表明: 胶体包粒内铝赤铁矿圈层的形成时间为 0.1~96.9 年, 勃姆石圈层的形成时间为 0.2~143.6 年。微观尺度胶体包粒(粒径 0.1~0.4 mm)的形成时间约为 0.6~481.2 年; 手标本尺度胶体包粒(粒径 2.0~5.0 mm)的形成时间为 1178~7364 年。预估铝土矿中各尺度胶体包粒(粒径 0.1~5.0 mm)的形成时间为 0.6~7364 年。以上研究结果表明, 胶体包粒结构与铝土矿形成过程中淋滤作用之间存在较为复杂的联系: 互层状圈层的形成指示了旦坪地区含铝土矿地层中胶体包粒的周期性凝聚作用, 从微观上刻画了周期性的成矿节律。胶体包粒形成过程中铝的地球化学行为可能是主导因素, 其行为特征主要受到风化剖面中有机酸浓度、氧化还原条件、圈层矿物表面电荷属性等关键控制条件对羟基铝和交换铝的吸附富集过程的影响。

关键词 淋滤作用 Fick 第一定律 扩散系数 风化剖面

第一作者简介 成龙, 男, 2000 年生, 硕士研究生, 主要从事铝土矿沉积地质学研究。E-mail: longcheng@cug.edu.cn。

通讯作者简介 余文超, 男, 1988 年生, 教授、博士生导师, 主要从事沉积矿产研究。E-mail: yuwenchao@cug@163.com。

中图分类号: P611.2⁺1 **文献标志码:** A

* 国家重点研发计划项目“植物登陆的环境资源效应”(编号: 2022YFF0800200)和国家自然科学基金项目“中国西南(贵州)喀斯特地区特色矿产成矿理论及综合利用”(编号: U1812402)联合资助。[Co-funded by the National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFF0800200) and the National Natural Science Foundation of China (No. U1812402)]

收稿日期: 2023-09-11 改回日期: 2023-11-08

Genesis of colloidal pellets of Danping bauxite deposit in northern Guizhou Province and estimation of their mineralization duration

CHENG Long^{1,2} YU Wenchao^{1,2} DU Yuansheng^{1,2} ZHOU Jintao^{1,2}
XIONG Guolin³ WENG Shenfu^{2,4} GUO Shangyu⁵

1 School of Earth Sciences, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China

2 Innovation Center of Ore Resources Exploration Technology in the Region of Bedrock, Ministry of Natural Resources of People's Republic of China, Guiyang 550081, China

3 School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China

4 Geological Brigade 106, Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Guizhou Province, Guizhou Zunyi 563003, China

5 Mineral Resources Reserve Evaluation Centre of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530028, China

Abstract In most bauxite deposits around the world, concentric colloidal pellet structures are commonly observed. The growth process of these structures records valuable information about the mineralization of bauxite, offering the potential to reconstruct the bauxite-forming environment. Unlike the more extensively studied oolitic structures in carbonate deposits, the research on similar multilayered pellet structures in bauxite deposits is still limited. The basic definition, formation mechanism, and time constraints of these structures remain unclear, and thus require further investigation. In view of this issue and the character of pelleted structure in the deposition-cementation layers of modern tropical laterite profiles, this research was carried out on the Lower Permian bauxite deposits in the Danping mining area of Wuchuan-Zheng'an-Daozhen region in northern Guizhou, China. The concentric layered structure of bauxite deposits is proposed here to be named as "colloidal pelleted structure". On the basis of the geological characteristics of ore-bearing lithostratigraphic profiles in the Danping bauxite deposit, this study focuses on investigating the colloidal pellet structures. The colloidal pellets in the Danping bauxite deposit consist of alternating layers of different types of core and surrounding alternating Al-hematite and boehmite minerals. The sphericity of the colloidal pellets was statistically analyzed using the dichotomy, which showed that they are predominantly circular or nearly circular. The normalized pellet layers range from 11.2 to 319.5 μm in thickness. According to the statistics of the number of pellet layers, the majority are around 1–3 layers. Based on the above statistical data, Fick's first law and its extended form were used to estimate the growth time of the colloidal pellets, and construction of a diffusion growth model was attempted. The results show that the formation time of the Al-hematite layers within the pellets ranges from 0.1 to 96.9 years, while the formation time of the boehmite layers ranges from 0.2 to 143.6 years. The formation time of the microscopic-scale colloidal pellets (0.1~0.4 mm) and hand-sized colloidal pellets (2.0~5.0 mm) is estimated to be around 0.6 to 481.2 years and 1178 to 7364 years, respectively. Furthermore, the estimated formation time of colloidal pellets of various sizes (0.1~5.0 mm) in bauxite deposits is 0.6 to 7364 years. These findings indicate that there is a complex relationship between colloidal pellet structures and leaching processes during bauxite formation. The formation of interlayered concentric structures indicates the periodic agglomeration of colloidal pellets within the aluminum-bearing strata in the Danping area, providing a microscopic depiction of the periodic ore-forming rhythm. The geochemical behavior of aluminum

during the formation of colloidal pellets may be the dominant factor, and it is influenced by key control conditions such as the concentration of organic acids in weathering profiles, Redox Conditions and the surface charge properties of layered minerals affecting the adsorption and enrichment processes of hydroxyaluminum and exchangeable aluminum.

Key words leaching process, Fick's first law, diffusion coefficient, weathering profile

About the first author CHENG Long, born in 2000, a master degree candidate at the School of Earth Sciences, China University of Geosciences (Wuhan), is mainly engaged in bauxite sedimentary geology research. E-mail: longcheng@cug.edu.cn.

About the corresponding author YU Wenchao, born in 1988, a professor and Ph.D. supervisor of China University of Geosciences (Wuhan), is mainly engaged in research on sedimentary ore deposits. E-mail: yuwenchao@cug@163.com.

1 概述

铝土矿形成于地表,物源复杂(Xiong *et al.*, 2021),是强烈化学风化作用的产物,也是工业上可供利用的铝矿石总称。铝土矿以铝矿物(三水铝石、一水硬铝石、一水软铝石)、黏土矿物(高岭石、伊利石、蒙脱石等)、铁矿物(褐铁矿、赤铁矿、针铁矿等)、钛矿物(金红石、锐钛矿为主)及其他副矿物(如锆石、电气石、独居石等)为主要矿物成分(王庆飞等, 2022; 余文超等, 2023)。当铝土矿中的黏土矿物含量低于 50%, 铝和钛矿物含量大于铁矿物时,可以将其归类为广义的铝土矿(Bárdossy, 1982)。目前应用较为广泛的铝土矿床分类模式包括:(1) Bárdossy (1982) 提出的分类模式主要划分为喀斯特型、红土型、齐赫文型铝土矿;(2) 廖士范和梁同荣(1991) 提出的分类模式主要划分为古风化壳型(I型)和红土型(II型)铝土矿;(3) 近期杜远生和余文超(2020) 根据铝土矿的物源、沉积相、含矿岩系基底、形成时代 4 个主要依据划分出了红土型(I型)、喀斯特型(II型)、沉积型(III型)铝土矿。在对铝土矿开展科学研究或生产实践时,通常使用矿石自然分类方法,其中使用最多的矿石类型包括碎屑状铝土矿、多孔状铝土矿、致密状铝土矿,其中还包括一种用以描述同心圆状颗粒的结构类型,此前的文献中通常以“豆鲕粒”来命名。但是铝土矿系中的这类“豆鲕粒”无论从结构、成分或是成岩来说,均与通常意义沉积岩中的豆鲕粒差异较大。

目前针对铝土矿中这类同心圆状颗粒的成因和形成过程研究较为薄弱。前人对不同岩性的同心圆

状颗粒进行研究,发现其结构和成分复杂,依据其形态划分出正常鲕状结构、表皮鲕状结构、偏心鲕状结构、复鲕状结构等结构类型(廖士范和梁同荣, 1991; 胡旭等, 2013; 崔滔等, 2022)。除常见结构外,还有学者划分出变形鲕状结构(范二川, 2011)和干裂鲕状结构(金瞰昆, 1998)。碳酸盐岩中同心圆状颗粒的主要成分为泥晶、亮晶方解石,白云石等(李飞等, 2015; 邢延路和冯李强, 2015); 铁质同心圆状颗粒的主要成分为赤铁矿、针铁矿、鲕绿泥石等(Sefton-Nash and Catling, 2008; Parry, 2011); 铝土矿中同心圆状颗粒的主要成分为勃姆石、一水硬铝石、高岭石、绿泥石等(杨延伟等, 2018; 崔滔等, 2022)。沉积物中矿物的成分再分配和再结晶过程是古流体流动路径、时间和流体成分的记录(Beitler *et al.*, 2005)。以铝土矿床为代表的风化剖面中多层同心圆状颗粒的形成是微观元素活动、土壤孔隙流体运移、矿物交替沉淀的结果(Wilkinson and Dampier, 1990; Mongelli, 2002),与碳酸盐岩代表同沉积过程的鲕粒存在成因上的差异。同心状颗粒的生长时间的理论计算可用于估计流体流动事件的持续时间,并且剖析物理化学条件波动对颗粒形成的影响程度(Parry, 2011)。同心状颗粒圈层的矿物组成会因古气候的变化尤其是孔隙水活度的改变而产生差异,通常在孔隙水活度较低条件下形成勃姆石而在孔隙水活度较高的条件下形成铝赤铁矿(Mongelli *et al.*, 2015),对重建铝矿物的成岩作用,进而构建铝土矿床形成环境以及形成过程具有重要意义。

作者在前人研究的基础上,结合中国黔北正安旦坪下二叠统铝土矿成矿过程,对铝土矿中同心状

颗粒的圆度、圈层数目、形成时间开展研究,以进一步揭示影响这类颗粒形成及其所含交替圈层形成的成因机制。

2 沉积岩中鲕粒与包粒概念的辨析

沉积岩中鲕粒的定义最早来源于 Sorby (1879) 在显微镜下对碳酸盐岩圆球状结构所进行的细致研究,他发现部分碳酸盐颗粒具有同心状结构而形似鱼卵,这种沉积岩中具有核心和同心状包壳的球状体由此得名鲕粒 (Newell *et al.*, 1960; Simone, 1980)。后世有学者认为,具有厚层状包壳的鲕粒倾向于形成椭球形或亚球形,而层数少的鲕粒可以是任何形状 (Newell *et al.*, 1960)。豆粒与鲕粒结构较为相似,早期学者通常以颗粒大小来区分鲕粒和豆粒,如鲕粒以其小于 2.0 mm 的粒径与豆粒相区别,一般鲕粒的粒径为 0.1~2.0 mm,豆粒的粒径为 2.0~10.0 mm (刘巽锋, 1988; 王洁和宋玉萍, 2010)。也有学者从结构成因出发,不考虑其成分或粒径,将具有核心和包壳的球状体统归为鲕粒,不具有核心和包壳的球状体则统称为豆粒 (梅冥相, 2012; 李飞等, 2015)。鲕粒的类型多样,常见的鲕粒主要有碳酸盐岩鲕粒、铁质鲕粒等。不同类型鲕粒的成因不尽相同,具有的指示意义也不同。在以往的研究中,碳酸盐岩鲕粒通常被认为主要是水中物理化学成因的 (Davies *et al.*, 1978; Duguid *et al.*, 2010), 但近年来的实验模拟研究发现可以通过微生物路径人工培养出鲕粒,为鲕粒的微生物成因提供了佐证 (Brehm *et al.*, 2006; Diaz *et al.*, 2015)。碳酸盐岩鲕粒相关研究被广泛应用在海平面变化 (Wilkinson *et al.*, 1985; Diaz and Eberli, 2019)、重建古海水化学组成 (Li *et al.*, 2013, 2017, 2019)、古环境恢复

(Swirydczuk *et al.*, 1979; Trower, 2020)、水动力条件恢复 (周瑶琪等, 2017; 古强等, 2021) 等方面。

与碳酸盐岩鲕粒相比,铝土矿床中的同心状颗粒的地球化学组成 (Mongelli and Acquafredda, 1999; 张亚男等, 2013)、结构特征 (钱利军等, 2016) 等方面的特征此前虽已引起学者注意,但是并未形成统一的成因解释或形成机制的认识。Bhattacharyya 和 Kakimoto (1982) 提出铝土矿同心状颗粒的形成主要受到气候变化、地下水的 pH 值和 Eh 的化学变化影响,同时,风化过程会引发剧烈的环境化学波动,不同化学成分的流动性差异等因素也会影响矿物成分的溶解和再沉淀。干燥条件会促进细粒土壤的干裂和裂缝的形成,从而导致其渗透性升高,从而阻碍铝土矿中球形聚集体的形成,导致球形聚集体数量减少 (Mongelli *et al.*, 2015)。随着研究的深入,学者认为其成因过程复杂,以同生沉积过程中的胶体化学成因为主,少量在风化壳和成岩后生阶段形成 (刘长龄和覃志安, 1999)。胡旭等 (2013) 认为同心状颗粒由胶体化学沉积和机械作用共同影响,杜远生和余文超 (2020) 结合铝土矿层内岩性变化提出富铝质的胶体在渗流带—潜流带变动区域中环绕碎屑颗粒沉淀的形成模式。很显然,铝土矿床中这类同心状颗粒与碳酸盐岩鲕粒的形成环境和成因有较大差别,铝土矿同心状颗粒被简单命名为“豆鲕粒”的合理性需重新商榷。结合铝土矿同心状结构球体的成因、结构、形成机制 3 方面的特征 (表 1), 本研究提出将铝土矿床中这类同心状结构球体命名为“胶体包粒”。

3 地质背景

贵州省位于中国西南部,大地构造位置在华南

表 1 鲕粒与胶体包粒特征对比表

Table 1 Comparative table of ooids and colloidal pellets inclusion characteristics

项目	鲕粒 (碳酸盐岩、铁质岩)	胶体包粒 (铝土矿)	参考文献
成因	主要在同沉积阶段或成岩作用阶段形成	风化阶段中经胶体化学吸附沉淀而成	Astin and Scotchman, 1988; Wilkinson and Dampier, 1990; Parry, 2011; Ma <i>et al.</i> , 2022
结构	内部常见放射状、同心状结构形态。同心状圈层矿物显微尺度由光滑条纹排列组成	内部常见同心状结构形态,放射状结构形态几乎未见。同心状圈层矿物显微尺度由板片状矿物交错组成	Bhattacharyya and Kakimoto, 1982; Brady and Weil, 2008; Xiao <i>et al.</i> , 2021
形成机制	与水动力密切相关。动荡强水动力的环境形成平均粒径较大、分选差的亮晶鲕粒,具有较规则的同心放射状纹层鲕粒;而低能弱水动力的环境多形成平均粒径较小、分选好的灰泥鲕粒,同心放射状纹层杂乱	流带扩散吸附胶体作用周期性聚集形成,与水动力无关	杜远生等, 2014; Trower <i>et al.</i> , 2017; 郭芪恒等, 2020; Li <i>et al.</i> , 2020; 巩恩普等, 2021

陆块的中部，铝土矿储量丰富，主要集中在黔北、黔中、黔东南地区（刘平，1987；Tang *et al.*, 2022），黔北地区以下二叠统准平原洼地型、下石炭统高喀斯特型漏斗—峡谷型铝土矿为主，黔中地区以下石炭统低喀斯特洼地型铝土矿为主（杜远生和余文超，2020）。务川—正安—道真地区属黔北，研究区旦坪铝土矿床横跨务川、正安、道真三县（图 1-A），该地区铝土矿可采储量约为 6160 万吨（陈强等，2014），矿区出露地层由老至新依次为寒武系、奥陶系、志留系、石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系等。该区构造发育，断层褶皱密布，断层主要为北西、南东向，受新模、张家院、道真、大塘、桃园、栗园、务川向斜控制，其中以新模向斜为主（图 1-B）。

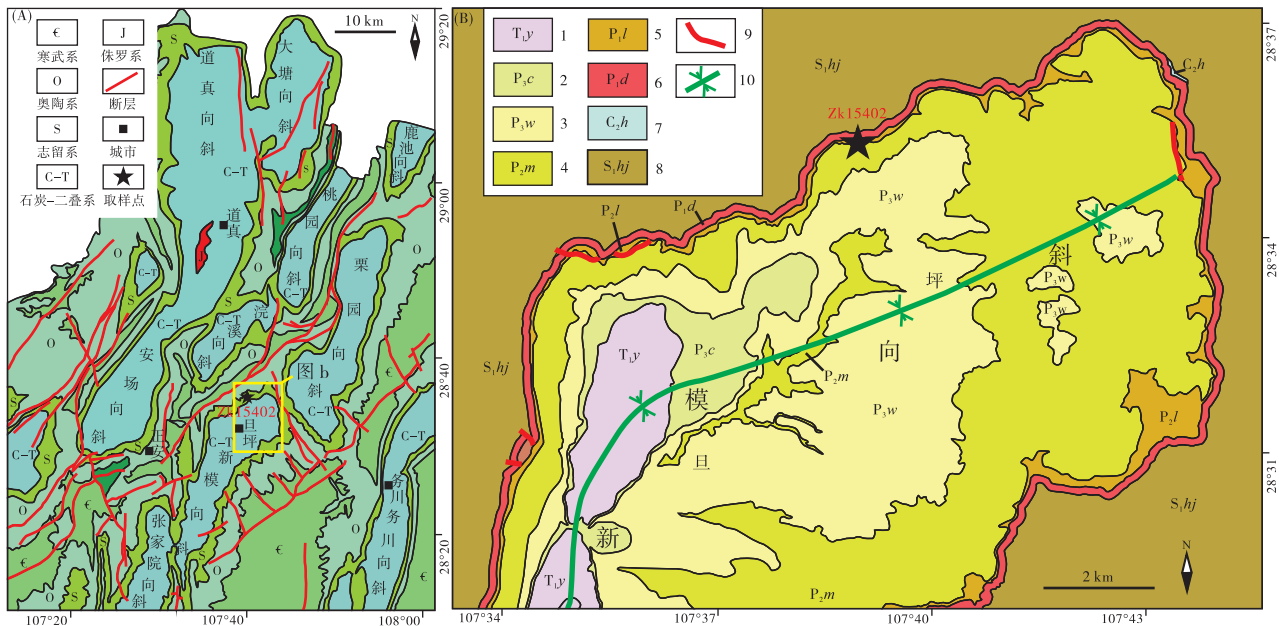
旦坪铝土矿床主要位于新模向斜核部，含矿岩系为下二叠统大竹园组，与下伏上石炭统黄龙组或下志留统韩家店组呈平行不整合接触，黄龙组岩性主要为灰白色白云质灰岩，韩家店组岩性主要为紫红—灰绿色页岩和粉砂岩。大竹园组与上覆下二叠统梁山组夹劣质煤线泥岩呈平行不整合接触。在石炭纪末，华南地区海退事件逐渐达到高潮（黄兴等，2013）。到早二叠世，黔北务正道地区古地理环境以

滨岸湿地为主，成为了在晚古生代冰期背景下频繁波动的海平面背景中的间歇暴露区（杜远生等，2014）。当时华南板块总体处于东特提斯地区低纬度地区，古气候条件适宜，有利于铝土矿化作用发生，得以形成巨量铝土矿沉积（Yu *et al.*, 2019）。

4 研究方法

在黔北旦坪铝土矿床 ZK15402 钻孔样品中，选取不同岩性特征的包粒状铝土矿，磨制岩石薄片，在偏光显微镜下观察确定形态特征。共聚焦拉曼光谱—扫描电镜分析，在中国地质大学（武汉）生物地质与环境地质国家重点实验室完成，仪器为 Alpha 300-R 型拉曼光谱仪，采用 532 nm 激光作为激发光源光谱，移动精度 2 nm，分辨率优于 2 cm^{-1} ，VEGA 3 型扫描电镜，加速电压 0.2 ~ 30 kV，二次电子真空分辨率 3 nm 及内置 100 倍物镜的能谱仪（EDS）。

铝土矿胶体包粒的圆度以及圈层数目在中国地质大学（武汉）地球科学学院沉积物质循环与模拟实验室使用 OLS5000 3D 激光共聚焦显微镜观察和测量。所获得照片使用 ImageJ 软件，采用二分



1—下三叠统夜郎组；2—上二叠统长兴组；3—上二叠统吴家坪组；4—中二叠统茅口组；5—下二叠统梁山组；6—下二叠统大竹园组；7—上石炭统黄龙组；8—下志留统韩家店组；9—断层；10—向斜轴

图 1 黔北务正道地区地质简图（修改自余文超等，2014）(A) 和旦坪矿区地质简图（修改自 Li *et al.*, 2020）(B)
 Fig. 1 Geological schematic map of the Wuzhengdao area, northern Guizhou Province (modified from Yu *et al.*, 2014) (A), and the geological schematic map of Danping mining area (modified from Li *et al.*, 2020) (B)

下伏地层：下志留统韩家店组灰绿色页岩 (S₁hj)

6 结果

6.1 镜下特征描述

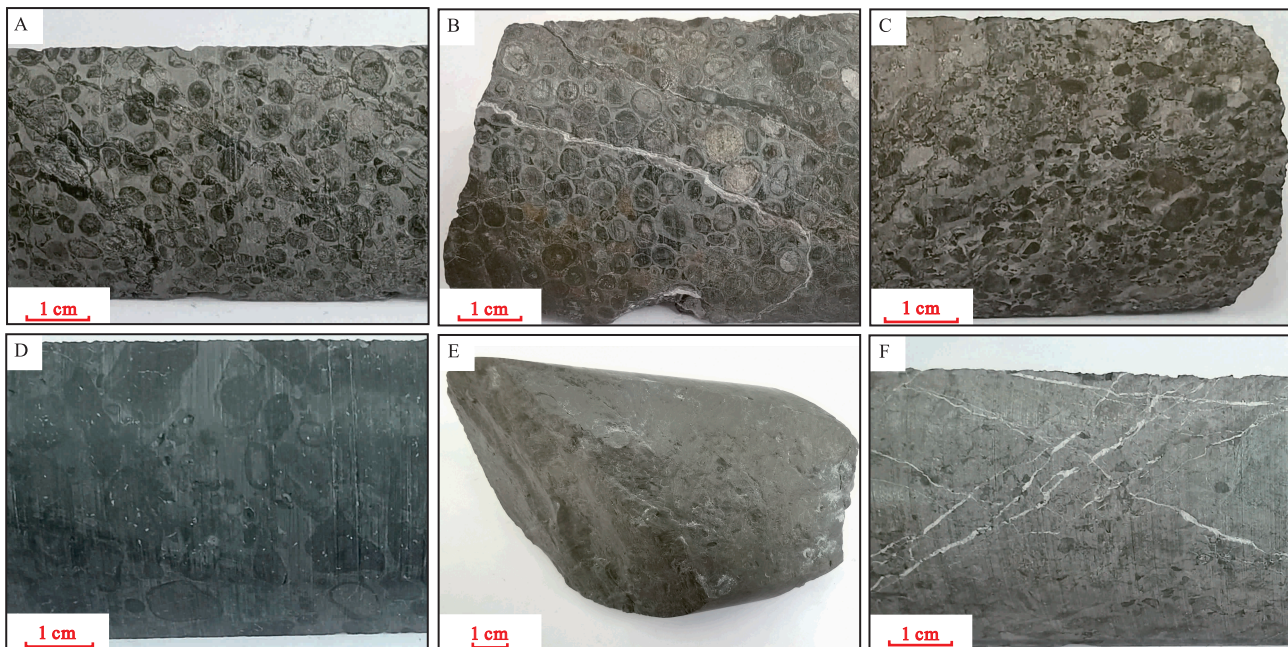
旦坪铝土矿中胶体包粒状铝土矿中胶体包粒出现的数量较多，密度较大，且粒径普遍较小，圈层较少。胶体包粒以基质接触(图 3-A)或颗粒接触(图 3-B)的方式分布于铝土矿中。碎屑状铝土矿中偶见胶体包粒，不同标本的碎屑含量差异较大且以细小碎屑为主(图 3-C)。铝土质黏土岩中偶见胶体包粒，不同标本的碎屑含量差异较大且大小不规则，含碎屑较多的铝土质黏土岩中碎屑以黑色不定形颗粒为主(图 3-D)，除此之外也有致密状铝土质黏土岩中不含碎屑(图 3-E)。铝土矿含矿岩系中常见后期充填石英脉或方解石脉(图 3-F)。

在研究区含矿岩系中，胶体包粒形态各异(图 4-A)，主要可依据其形态分为以下几种类型：(1) 正常包粒：因其具有典型的胶体包粒形态，胶体包粒核心大小适中，核心大致位于其整体的正中心位置，外部圈层均匀分布，且每个圈层与其内外

相邻圈层的距离大致相同(图 4-B)，圈层数量由多到少数量不等。(2) 表包粒：胶体包粒核心巨大，通常占整个胶体包粒体积的绝大部分(图 4-C)，绝大部分表包粒圈层数量较少，仅少量表包粒含较多圈层数。(3) 偏心包粒：胶体包粒核心不位于其整体的正中心位置(图 4-D)。(4) 复包粒：大量小的胶体包粒被包裹在大包粒内部，同时有基质充填其中，通常大胶体包粒的圈层数量较少(图 4-E)。各种类型胶体包粒的数量由多到少依次为正常包粒、表包粒、偏心包粒、复包粒。胶体包粒大小不一，且差别较大，因其形态不规则，圆度有差异，故使用其面积为衡量尺度较为合适，较小者面积为 1920 μm²，较大者面积可达 2160 000 μm²。大多数胶体包粒核心为一水硬铝石，圈层以高岭石、绿泥石为主，且与一水硬铝石呈互层分布，胶体包粒成分与前人研究结果大致相同(Mongelli, 2002)。也可见少量胶体包粒核心为棱角分明的碎屑(可能为胶体包粒破碎物)，胶体包粒的形态会受到碎屑几何形态的影响(图 4-F)。

6.2 胶体包粒粒径与圆度

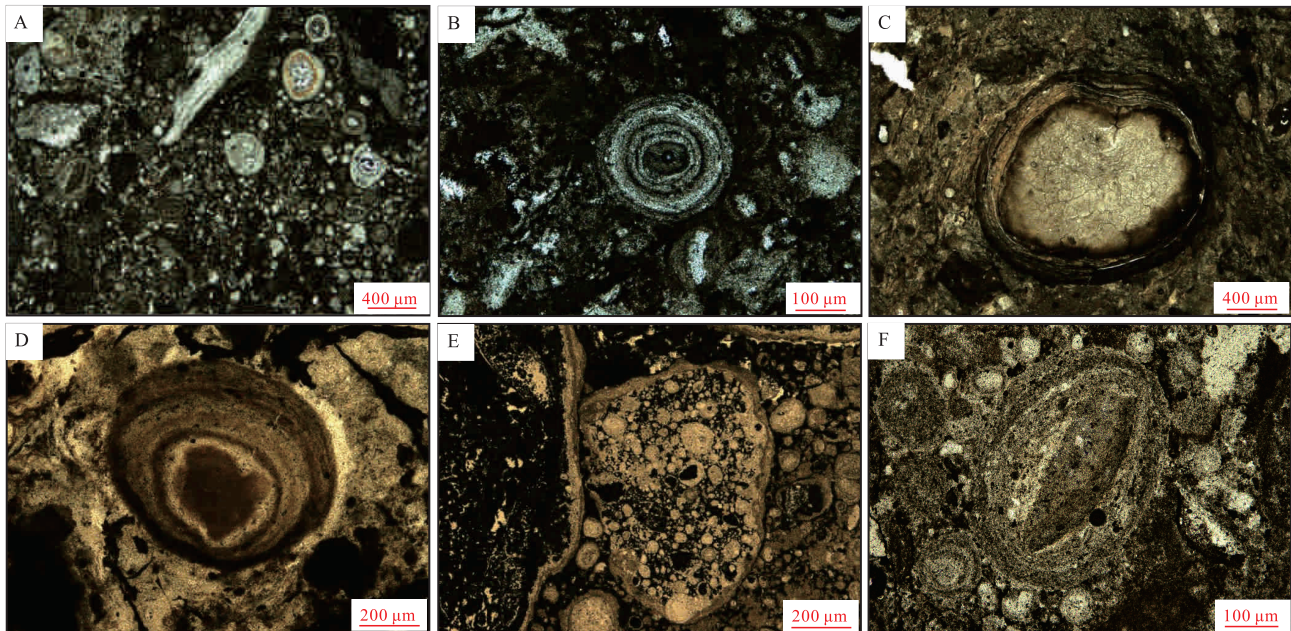
使用 3D 测量激光共聚焦显微镜，对图像进行



A—灰白色胶体包粒状铝土矿；B—灰色胶体包粒状铝土矿；C—灰色碎屑状铝土矿；D—灰黑色含大量黑色碎屑铝土质黏土岩；E—灰色不含碎屑致密状铝土质黏土岩；F—灰白色含大量石英脉碎屑状铝土矿

图 3 黔北旦坪矿区大竹园组铝土矿含矿岩系典型手标本照片

Fig. 3 Photos of typical hand specimen of bauxite ore-bearing rock system of the Dazhuyuan Formation in Danping miming area, northern Guizhou Province



A—胶体包粒群；B—正常包粒结构；C—表包粒结构；D—偏心包粒结构；E—复包粒结构；F—包裹碎屑的包粒

图 4 黔北旦坪矿区大竹园组铝土矿床典型铝土矿及胶体包粒结构照片

Fig. 4 Photos of typical bauxite and oolites structure of the Dazhuyuan Formation bauxite deposit in Danping mining area, northern Guizhou Province

二值化，获得黑白双色图像。因胶体包粒粒径数量级不同，分别从微观尺度和手标本尺度各对 440 个胶体包粒进行测量，微观尺度胶体包粒粒径多为 0.10~0.40 mm (图 5-A)，手标本尺度粒径胶体包粒粒径多为 2.00~5.00 mm (图 5-B)。对微观尺度胶体包粒进行归一化处理，取胶体包粒粒径平均值 189.00 μm ，将胶体包粒的圆度进行箱线图 (图 5-C)、柱状图 (图 5-D) 分析。

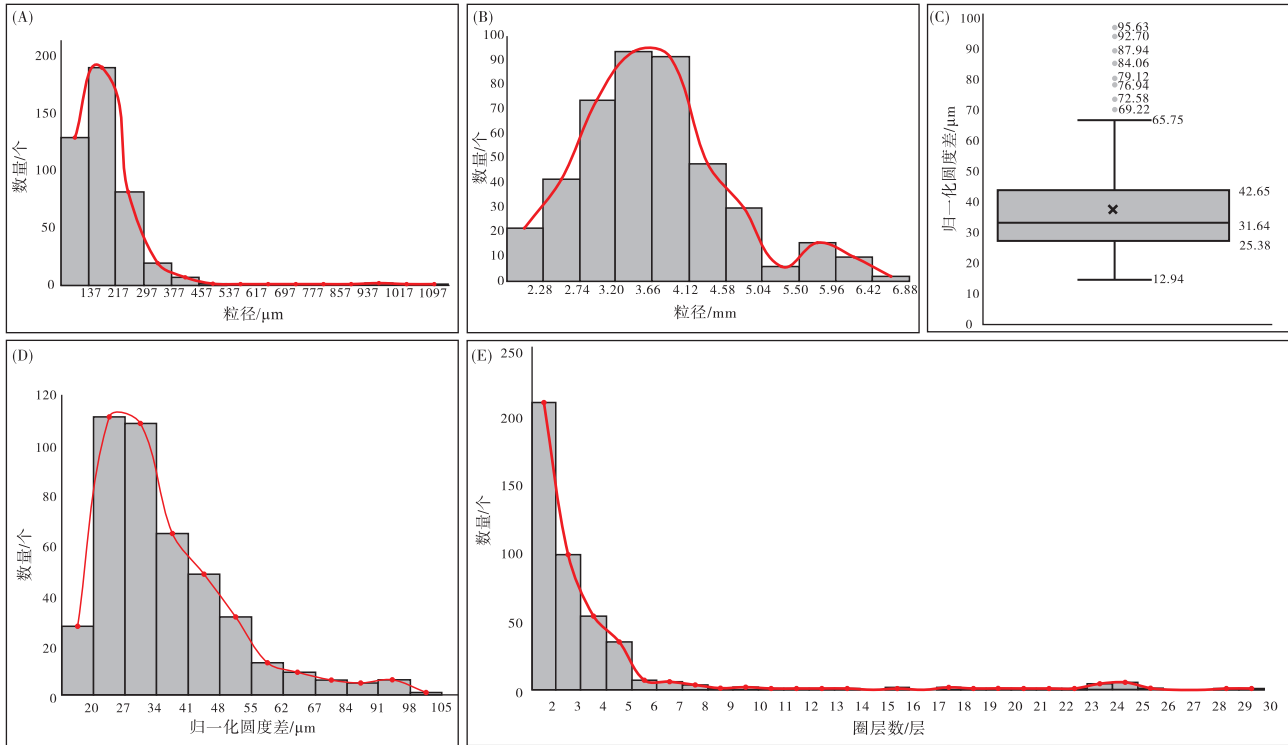
将胶体包粒归一化圆度分布柱状图划分为 12 个数值区间，可以看出，其圆度最小值小于 20 μm ，圆度最大值 98 μm ，圆度在 19.00~33.00 μm 区间内居多，占总量的 50%，呈现两端少中间多的似纺锤状分布模式。胶体包粒归一化圆度分布箱线图中上边缘约为 65.75 μm ，上四分位数约为 42.65 μm ，中位数约为 31.64 μm ，下四分位数约为 25.38 μm ，下边缘约为 12.94 μm 。基于此拟以 25.38 μm 、31.64 μm 、42.65 μm 作为划分节点，将该图分为 4 部分，将胶体包粒圆度划定为圆形、近圆形、近椭球形、椭球形。通过所获数据可见，旦坪地区胶体包粒以圆形、近圆形为主，近椭球形次之，椭球形最少。

6.3 胶体包粒圈层数目

对黔北旦坪矿床豆鲷状铝土矿中 458 个胶体包粒的圈层数量分别进行观察统计 (少数胶体包粒样品无法进行圆度统计，故样品数量多于胶体包粒统计样品数量)，胶体包粒圈层数量越大，其出现的频率越低；胶体包粒圈层数量越小，其出现的频率越高，呈现金字塔型分布模式。旦坪地区胶体包粒圈层以 1~2 层为主，占总量的近 50% (图 5-E)。黔北铝土矿床的胶体包粒一般由 1~6 个圈层组成，其中又以 1~3 个圈层居多 (刘巽峰, 1988)。

6.4 胶体包粒的矿物和地球化学组成

在黔北铝土矿包粒状矿石中，一水硬铝石微晶从勃姆石集合体中结晶析出，表明成岩或后生阶段勃姆石可以转化形成一水硬铝石 (廖士范和梁同荣, 1991)。戴塔根和李洁兰 (2016) 对广西喀斯特型铝土矿研究发现，沉积矿石中普遍存在勃姆石，但在堆积矿石中未见，反映勃姆石在后期堆积改造过程中已完全转变为一水硬铝石。胶体包粒进行扫描电镜元素面扫 (图 6-A 至 6-F) 和元素线扫 (图 7-A 至 7-C) 表明，从胶体包粒圈层核心到边



A—胶体包粒镜下尺度粒径统计图；B—胶体包粒手标本尺度粒径统计图；C—胶体包粒归一化圆度差箱线图；
D—胶体包粒归一化圆度差柱状图；E—胶体包粒圈层数量统计图

图 5 黔北旦坪矿区大竹园组铝土矿床胶体包粒圆度、粒径及圈层数统计

Fig. 5 Statistical diagram of roundness, particle size and number of circles of colloidal pellets of the Dazhuyuan Formation bauxite deposit in Danping mining area, northern Guizhou Province

部，Al 元素含量最多，Fe、Ti 元素含量次之且显著低于 Al 元素含量，同时，Fe、Al 元素含量大致呈现负相关关系。Mongelli (2002) 指出，铝赤铁矿可以被认为是赤铁矿和刚玉之间的固溶体，其化学式为 $(Al_xFe_{1-x})_2O_3$ ，其中 x 为固溶体中 Al_2O_3 的摩尔分数 (Tardy and Nahon, 1985)。本研究观察到的现象与 Mongelli 等 (2016) 对胶体包粒的镜下观察一致，表明旦坪地区胶体包粒圈层为一水硬铝石与铝赤铁矿交替出现。

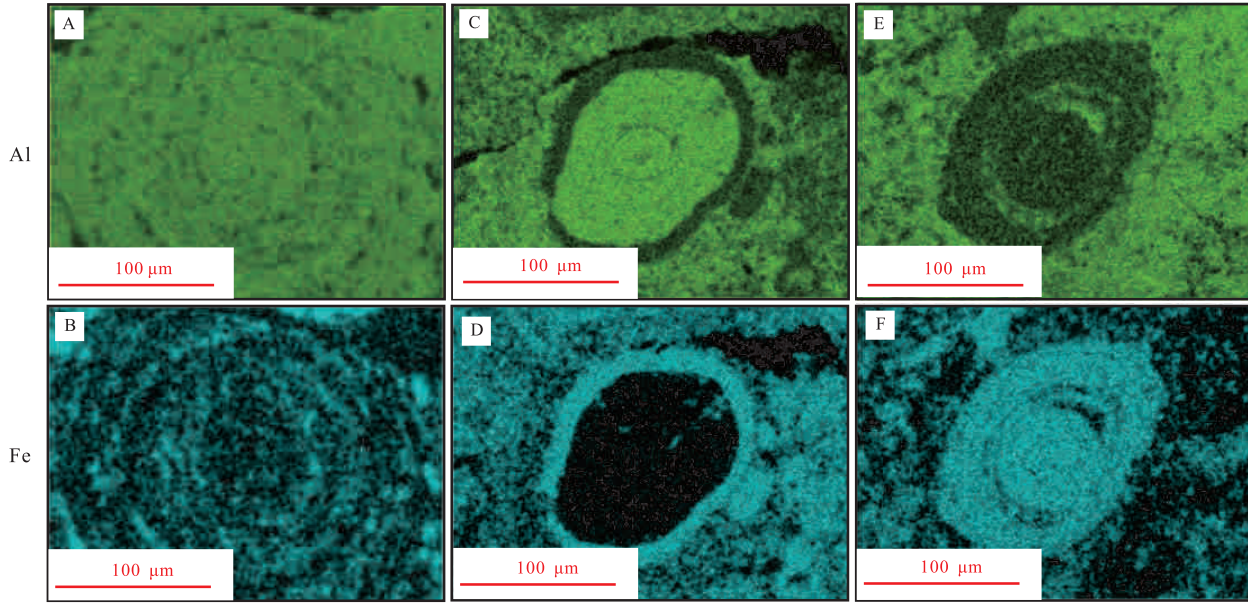
7 讨论

7.1 胶体包粒形成年龄估算

铝土矿床作为陆表风化淋滤作用的终极产物，本质上与热带成壤作用、红土化作用类似，区别在于风化程度、剖面形成时间及沉积过程的复杂性 (余文超等, 2023)。野外实地观测与前人研究表明，现代正在形成的三水铝石型铝土矿与氧化土成壤作用关系密切，三水铝石型铝土矿层上覆为表层

红土，下伏为网纹红土层 (陈世益等, 1992)。不论从纵向分层上还是横向不同类型分布变化上来看，铝土矿剖面与热带土壤剖面可以进行类比研究，且相当一部分铝土矿石中还保留了类似成壤作用过程中土壤孔隙内沉淀的同心球状或不规则状胶体沉淀作用证据 (余文超等, 2023)，例如热带氧化土剖面中淀积黏化层所含黏粒胶体薄膜与铝土矿胶体包粒具有相似的圈层状结构 (Brady and Weil, 2017)。基于这种相似性，有学者将铝土矿沉积视为古土壤的一种特殊类型 (Valeton, 2009)。此前的研究也有将热带氧化土成壤环境等价于铝土矿胶体包粒的形成环境，并认为其土壤内部含矿物质流体为胶体包粒的形成提供了物质来源 (Mongelli, 2002)。基于以上论述，本研究假设铝土矿胶体包粒形成基质为热带强风化土壤环境，该类型土壤为胶体包粒形成提供了碎屑及各种离子来源。

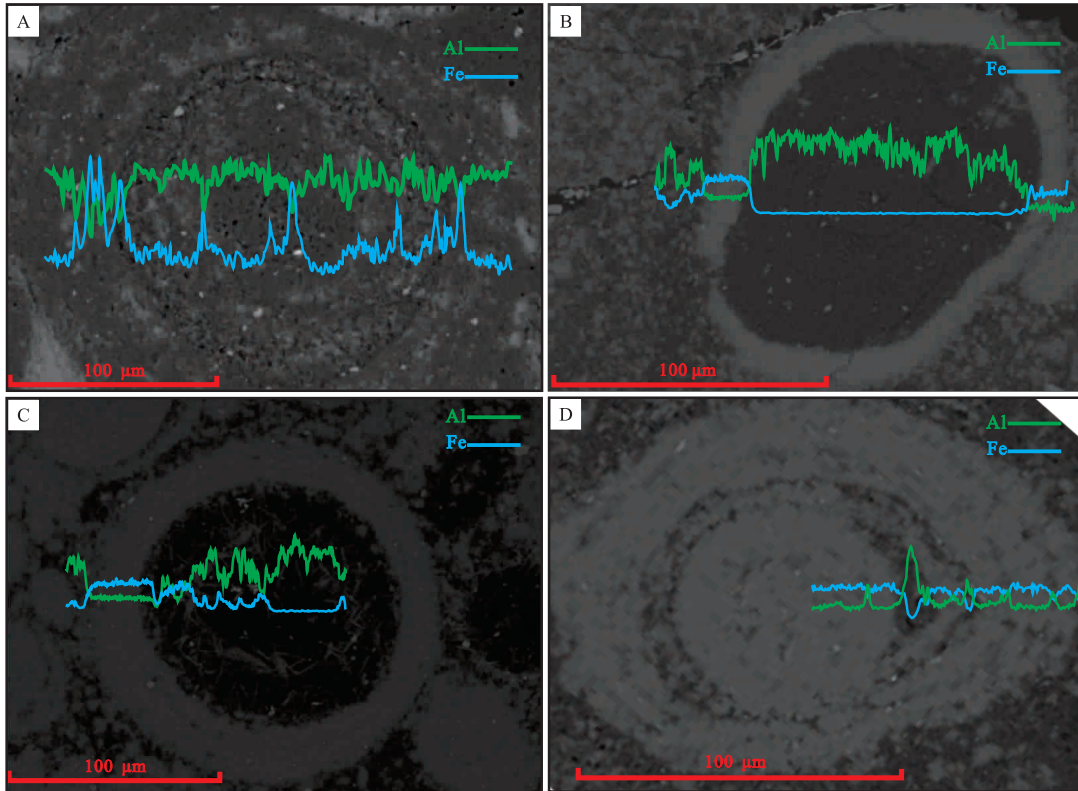
旦坪地区胶体包粒以圆形、近圆形为主。Sefton-Nash 和 Catling (2008) 研究指出，同心状颗粒的上述特征表明形成它们的成岩事件不是由高



A—正常胶体包粒 Al 元素面扫描图；B—正常胶体包粒 Fe 元素面扫描图；C—表胶体包粒 Al 元素面扫描图；
D—表胶体包粒 Fe 元素面扫描图；E—偏心胶体包粒 Al 元素面扫描图；F—偏心胶体包粒 Fe 元素面扫描图

图 6 黔北旦坪矿区大竹园组铝土矿床胶体包粒 Al、Fe 元素面扫描图

Fig. 6 Surface scan of Al and Fe elements in colloidal pellets of the Dazhuyuan Formation bauxite deposit in Danping mining area, northern Guizhou Province



A—正常包粒 Al、Fe 元素线扫描图；B—表包粒 Al、Fe 元素线扫描图；C—表包粒 Al、Fe 元素线扫描图；D—偏心包粒 Al、Fe 元素线扫描图

图 7 黔北旦坪矿区大竹园组铝土矿床胶体包粒 Al、Fe 元素线扫描图

Fig. 7 Line scan of Al and Fe elements in oolites of the Dazhuyuan Formation bauxite deposit in Danping mining area, northern Guizhou Province

能的外部侧向流驱动的，因此扩散可能主要是源物质移动的方式。此外，Mozley 和 Davis (2005) 指出当横向流动起到重要作用时，同心层状颗粒会出现拉长现象，但旦坪地区胶体包粒未见明显拉长现象。综上推断主要是由扩散作用控制胶体包粒的形成。基于扩散理论，表 2 列举了本研究所建立的胶体包粒扩散模型相关参数及符号涵义。

表 2 扩散形成胶体包粒模型参数

Table 2 Parameter for diffusion model of colloidal pellets

物理量	含义
t	胶体包粒圈层形成时间
v	离子迁移速度
c	孔隙离子浓度
D	扩散系数
j	单位时间单位面积离子通过量
L	扩散发生区域
D_i^0	铝离子在水中的扩散系数
ΔC	固结矿物表面与无限远一点间源物质浓度差
Φ	黏土基质孔隙度
D_i	铝离子在黏土中的扩散系数
F_p	固结矿物体积分数
F_d	源物质（铝离子）体积分数
V_i	沉淀矿物摩尔体积
r_c	胶体包粒矿物圈层厚度

溶液中的离子由于压力作用等条件渗入结核中的现象，被称为对流，铝离子的对流可以表示为式 (1)。其中 v 为离子迁移的速度， C 为孔隙溶液中离子的浓度。但因为铝土矿中形成胶体包粒的基质并非液态，并且为描述瞬时变化，故引入扩散系数 D ， dC 与 dX 的偏微分表示的是平衡浓度的变化速率，两者的乘积 J 表示单位时间内通过单位面积的量，以式 (2) 表示：

$$J = C \cdot v \quad (1)$$

$$J = -D \left(\frac{dC}{dX} \right) \quad (2)$$

将转化发生的区域厚度定为 L 。此时平衡浓度的变化速率可以表示为胶体包粒固结矿物表面与无限远处源物质浓度差随 L 扩大的变化速率，如式 (3) 所示：

$$J = -\frac{\Phi D}{L} \Delta C \quad (3)$$

Berner (1968) 认为，胶体包粒每个圈层的生长速率受到 Al^{3+} 在溶液或胶体中的扩散系数 D_i^0 、固结矿物表面与无限远一点之间的源物质浓度差 ΔC 、沉淀矿物的摩尔体积 V_i 以及圈层厚度 r_c 的影响。Mongelli (2002) 基于 Berner (1968) 提出的胶体包粒计算模式首次在铝土矿研究中应用的 Fick 第一定律（一维），即在静止的介质中，分子扩散与浓度梯度成正比，将该定律应用于研究胶体包粒圈层形成时溶解矿物与结晶矿物的扩散转化中，如式 (4) 所示：

$$t = \frac{r_c^2}{2V_i \Delta C D_i} \quad (4)$$

胶体包粒的孔隙度与其渗透率有很大的关系 (Streicher and Alexander, 1995)，即与离子的扩散密切相关，故引入 Φ ，即铝土矿中形成胶体包粒的基质孔隙度。还需要注意的是，由于受到孔隙度和弯曲度的影响，沉积物中铝离子的扩散速度较溶液中铝离子的扩散速度慢，且在稀溶液中，离子的移动阻力较小，但在孔隙流体中运移的离子会互相作用，影响运移速度，所以扩散系数需要进行校正 (Iversen and Jørgensen, 1993)。 Al^{3+} 在溶解体系中的扩散系数 $D_i^0 = 0.559 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ (Li and Gregory, 1974)。高岭石作为形成胶体包粒圈层的源物质，富含高岭石的土壤中产生扩散作用和固结作用，使用高岭石黏土测定的孔隙度值 0.27 (Diamond, 1970)，根据 Iversen 和 Jørgensen (1993) 提出的式 (5) 计算得到 $D_i = 0.225 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ ：

$$D_i = \frac{D_i^0}{1 + n(1 - \Phi)} \quad (5)$$

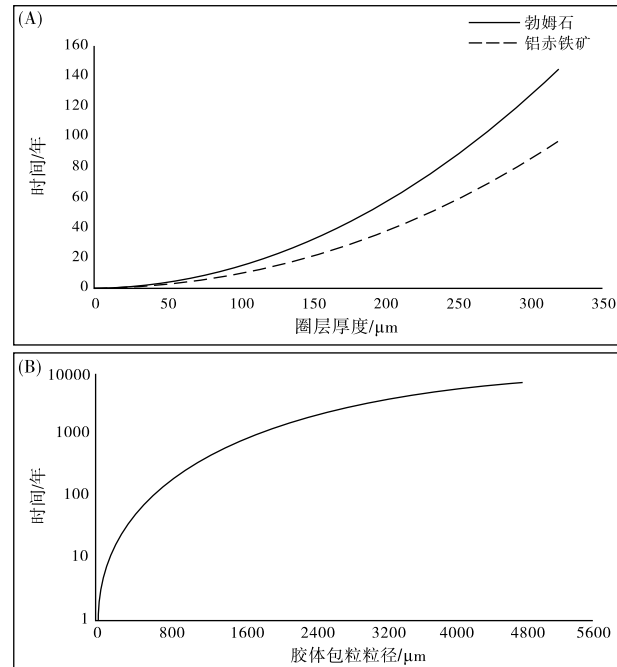
Mongelli (2016) 基于 Wilkinson 和 Dampier (1990) 的研究对铝土矿胶体包粒简单扩散模型进行修改，考虑非线性的稳态浓度梯度。并且引入了沉淀矿物勃姆石的体积分数 F_p 和固结形成胶体包粒的源物质（即 Al^{3+} ）在胶体包粒中的体积分数 F_d ，前者为 0.45 (Mongelli *et al.*, 2016)，后者为 0.01 (Sefton-Nash and Catling, 2008)，同时引入沉淀矿物勃姆石的摩尔体积 V_i ，为 $19.507 \text{ cm}^3/\text{mol}$ (Smyth and McCormick, 1995)。前文指出，铝赤铁矿可以被认为是赤铁矿和刚玉之间的固溶体，沉淀矿物铝赤铁矿的摩尔体积 V_i 为 $29.566 \text{ cm}^3/\text{mol}$

(Wedepohl, 1969), 铝赤铁矿在胶体包粒中的体积分数 F_p 为 0.55。固结矿物表面与无限远处的源物质 (即 Al^{3+}) 浓度差 $\Delta C = 0.5 \text{ mg/kg} = 18.5 \times 10^{-3} \text{ mol/m}^3$ (Mongelli *et al.*, 2016)。Sefton-Nash 和 Catling (2008) 对不同胶体包粒形成时间计算公式进行对比, 发现最契合胶体包粒自然生长的模型可能是 Wilkinson 和 Dampier (1990) 的模型, 因为它解释了源矿物质的成岩重新分布。因此本研究采用该公式进行计算, 厚度 r_c 的胶体包粒圈层形成所需的时间, 如式 (6) 所示:

$$t = \frac{r_c^2 \left(1 - \left(\frac{F_d}{F_p} \right)^{\frac{1}{3}} \right)}{2V_i D_i \Delta C} \quad (6)$$

黔北旦坪地区胶体包粒微观尺度的圈层厚度相差较大, 为 $11.2 \sim 319.5 \mu\text{m}$, 将圈层厚度代入 (6) 式进行计算, 分别得到旦坪地区胶体包粒勃姆石、高岭石圈层形成时间曲线, 胶体包粒勃姆石圈层的形成时间为 $0.2 \sim 143.6$ 年, 胶体包粒铝赤铁矿圈层的形成时间为 $0.1 \sim 96.9$ 年, 胶体包粒中勃姆石圈层的平均形成时间长于铝赤铁矿圈层的形成时间(图 8-A)。前文针对包粒的圈层数量统计和矿物学工作表明, 旦坪地区胶体包粒圈层为勃姆石与铝赤铁矿交替出现, 以 1~3 层居多, 故胶体包粒的圈层形成时间为 $0.3 \sim 240.6$ 年。胶体包粒核心根据其类型不同半径差异较大, Mongelli (2016) 研究指出形成胶体包粒核心所需的时间与外部圈层生长所需时间相近。旦坪地区胶体包粒的微观尺度形成时间应为核心形成时间与外部圈层形成时间之和, 结合旦坪地区微小胶体包粒粒径多为 $0.10 \sim 0.40 \text{ mm}$ (图 5-C), 其形成时间为 $0.6 \sim 481.2$ 年。在手标本尺度, 旦坪矿区胶体包粒圈层厚度为 $0.30 \sim 1.20 \text{ mm}$, 粒径多为 $2.00 \sim 5.00 \text{ mm}$ (图 5-D), 根据计算预估形成时间为 $1178 \sim 7364$ 年。根据上述证据, 我们认为结合微观尺度、手标本尺度测量数据, 旦坪地区胶体包粒形成时间为 $0.6 \sim 7364$ 年(图 8-B)。

Mongelli (2002) 和 Mongelli 等 (2016) 使用式 (6) 计算意大利南部晚白垩世古喀斯特型铝土矿胶体包粒的形成时间, 勃姆石圈层形成时间约为 4500 年, 胶体包粒形成时间为 $45\,000 \sim 150\,000$ 年, 与本研究下二叠统沉积型铝土矿胶体包粒形成时间相差较大, 且圈层数量 (20~30 层) 远多于旦坪



A—胶体包粒微观尺度勃姆石、铝赤铁矿圈层形成时间图;
B—微观尺度、手标本尺度胶体包粒形成时间图

图 8 黔北旦坪矿区大竹园组铝土矿床胶体包粒单矿物圈层及胶体包粒形成时间

Fig. 8 Colloidal pellets single mineral layer and colloidal pellets formation time diagram of the Dazhuyuan Formation bauxite deposit in Danping mining area, northern Guizhou Province

地区胶体包粒。这可能是因为在意大利地区晚白垩世频繁的海平面变化, 有利于铝赤铁矿保存的湿热环境与有利于勃姆石保存的干燥环境变化明显。而在早二叠世, 旦坪地区的准平原化更加彻底, 古地貌差异更小, 且基岩主要为不透水的韩家店组泥岩 (殷科华, 2009; 汪小妹等, 2013)。因此, 旦坪地区在早二叠世虽经历了地下水水位变化 (Yu *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2020), 但其渗流带与潜流带的改变可能并不频繁, 导致风化剖面干—湿分异不显著 (杜远生等, 2014; Zhou *et al.*, 2022)。旦坪地区在早二叠世的铝土矿成矿环境不利于勃姆石和铝赤铁矿保存, 这可能导致了旦坪地区胶体包粒圈层较少的现象发生。

7.2 胶体包粒形成与淋滤作用

铝土矿的形成受到气候、地下水位、二氧化碳浓度、植被覆盖率等环境因素综合作用, 成矿母质在经过陆表风化淋滤作用后形成铝土矿 (余文超等, 2023)。大气降水是陆表风化淋滤作用的重要

因素，风化剖面中的活动水流溶解并迁移走杂质元素，留存铝、铁质是铝土矿成矿作用的核心过程 (Lei *et al.*, 2023)。海平面的升降是陆地风化暴露面积与地下水位变化的主要影响因素 (Yu *et al.*, 2019; Khosravi *et al.*, 2021)，铝土矿含矿岩系根据地下水位的高低可分为渗流型 (低地下水位) 与潜流型 (高地下水位) (D'Argenio and Mindszenty, 1995)。渗流型铝土矿形成于富氧且排水条件好的环境，淋滤作用强，易于形成高品位的多孔状铝土矿。高地下水位的潜流型铝土矿形成于水体滞留的环境，淋滤作用较弱，铝土矿品质通常较差，如致密状铝土矿以及铝土质黏土岩 (杜远生等, 2013, 2014)。气候 (年平均温度与有效降水量) 也是控制铝土矿形成的重要因素，Yu 等 (2019) 研究表明，华南地区在晚古生代冰期也能形成铝土矿的原因是当时华南板块的古气候受到热带辐合带 (ITCZ) 的控制，特征为年均气温高，年均降水量大，利于形成高品质铝土矿。同时，应用高温强降水的数值进行模拟预测，较高预测成功率也印证了铝土矿形成于高温多降水的环境 (Price *et al.*, 1997)。

淋滤作用形成铝土矿，胶体包粒状结构常出现在铝土矿中，胶体包粒的形成也与淋滤作用密切相关。前人研究表明，胶体包粒的高场强元素和正 Ce 异常值均高于基质，胶体包粒晚于基质形成，具有原位后生的特点 (张亚男等, 2013)。胶体包粒的形成晚于基质，基质为胶体包粒的形成提供了物质基础，而淋滤作用对基质的成分有显著影响，在强烈淋滤的环境下，会发生脱硅排铁作用，大规模出现以高岭石、伊利石或蒙脱石等黏土矿物转化为三水铝石等铝矿物 (Yu *et al.*, 2014; Zhao *et al.*, 2023)。胶体包粒主要依赖于胶体化学凝聚形成，而淋滤作用控制下的热带风化过程可以在风化层位中形成孔隙，为胶体包粒形成提供必要空间 (Richards and Kum, 2003; 杜远生和余文超, 2020)。旦坪地区胶体包粒圈层主要为一水硬铝石与铝赤铁矿互层交替出现，相较于一水硬铝石的高强度淋滤作用，铝赤铁矿指示相对低强度淋滤作用。互层状圈层的形成指示了旦坪地区含铝土矿地层中胶体包粒因淋滤作用产生的周期性凝聚，从微观上刻画了周期性的成矿节律。

7.3 铝的地球化学行为及有机酸影响下胶体包粒圈层的形成机制

胶体包粒圈层的形成相对宏观上是勃姆石与铝赤铁矿胶体交替发生扩散吸附作用，微观上是铝在基质中的扩散富集过程。聚焦于相对微观上铝的地球化学行为，将圈层的形成区分为铝的迁移和铝的吸附沉淀 2 个阶段。前人研究认为，成矿母质在富含有机酸的酸性、还原的条件下脱硅去铁形成铝土矿 (Liu *et al.*, 2016; Ling *et al.*, 2017; Barnett *et al.*, 2020)。余文超等 (2012) 测定务正道地区铝土矿含矿岩系中的重排甾烷和规则甾烷的含量也表明，铝土矿在酸性、还原性的环境下沉积形成。且 Montoroi (1994) 研究发现，酸性土壤水中铝能够大量溶解达到高浓度，在该环境中，铝的浓度受到三水铝石和高岭石的溶解度控制。所以在铝土矿形成过程中，有大量的铝呈各种形态分布在酸性环境中。铝主要以矿物形式存在 (铝硅酸盐和氧化铝) 于土壤和水中。此外，铝浓度和铝的形态取决于土壤溶液的 pH 值和化学环境，根据土壤 pH 的不同，Al 可以以沉淀物或共轭有机、无机离子以及分子的形式存在，大多以 Al^{3+} (pH \approx 5)、 $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ (pH \approx 5.5)、 $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ (pH \approx 6)、 $\text{Al}(\text{OH})_3^0(\text{s})$ (pH \approx 6.5)、 $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ (pH \approx 7) 几种形态出现 (Bojórquez-Quintal *et al.*, 2017)。通常在土壤学上将铝组分划分为全铝、活性羟基铝、有机络合态铝以及交换性铝 (龚子同等, 2003)。土壤交换性铝是土壤黏粒表面静电引力所能吸附的易移动的元素 (龚子同等, 2003)，同时土壤胶体的内外部表面携带大量的正负静电荷，这些土壤胶体的表面电荷都是通过羟基基团形成的，受到 pH 值变化的影响 (Brady and Weil, 2008)。

在铝的迁移机制方面，许弟发等 (2002) 认为，土壤胶体吸附金属离子可能与形成氢氧化物，即在铝土矿体系内主要表现为氢氧化铝表面沉淀有关。氢氧化铝由铝单核物质发生聚合水解，再加上羟基充当桥梁逐步形成 (Hsu, 1989)。羟基铝由铝聚合水解产生，其聚合水解反应会受到有机质分解后产生的腐殖质 (腐殖酸、胡敏素) 的影响 (Boodt *et al.*, 1990)。有机酸会与羟基铝形成络合物，有机配体对羟基铝配位点的占据破坏了铝离子聚合所必需的羟基桥接机制，有机配体与羟基铝络

合的强度和范围越大,它们对其配位点的占据就越稳定。因此,有机配体对羟基铝的水解以及随后的沉淀和结晶的破坏性影响会越大(Ng Kee Kwong and Huang, 1978)。由此可知羟基铝的聚合水解作用随着该过程中存在的有机酸浓度的增加而变弱,即有机酸的存在可以阻止氢氧化铝沉淀形成,使得羟基铝发生迁移作用,影响铝土矿床中胶体包粒的形成。

在实际土壤中,相比其他阳离子,铝离子可以很好地吸附并保持在胶体包粒表面而较难被取代,这就使得胶体包粒圈层在形成时可以吸附交换性铝,吸附的性质和效率会受到pH的控制。pH值升高会导致颗粒表面负电荷增加,反之pH值降低会导致负电荷减少(Brady and Weil, 2008),Shanshuddin 和 Ismail (1995) 研究马来西亚老成土时从阴阳离子交换量方面揭示出土壤电荷与pH值之间的关系,与前者结论相似,同时提出大约pH值为4.4时出现等电荷点。当土壤pH值为中酸性时,交换性铝的含量与pH值呈负相关关系,即随着pH值的增加,交换铝的含量会随之降低(龚子同等, 2003)。值得注意的是,仅依靠交换铝含量的变化来断定土壤胶体的吸附强度是不够的,许弟发等(2002)研究表明,虽然pH值的升高会导致交换铝含量的降低,但却利于土壤胶体吸附金属阳离子,同时促进解吸阴离子,使得金属元素阳离子在土壤中的吸附量随pH值的升高而增大。理论上不同矿物成分的圈层可能指示pH值变化引起的差异性交换铝吸附强度,从而指示不同的pH环境,表征古环境变化信息,但多个因素的影响下,哪种是主导交换铝吸附强度的主要变量有待实验探究。同时,形成的不同矿物成分携带的正负电荷可能不同。显然,异极电荷互相吸引,同极电荷相互排斥,这可能是胶体包粒不同矿物成分圈层形成的原因之一。综上,羟基铝与交换性铝均会从不同方面对铝微观地球化学行为产生影响,从而进一步影响胶体包粒圈层的形成,但实际的影响程度有待实验进一步验证。

8 结论

1) 黔北旦坪矿区铝土矿含矿岩系中胶体包粒形态以圆形、近圆形为主,近椭球形次之,椭球形最少。具有正常包粒、表包粒、偏心包粒、复包粒

结构。胶体包粒圈层数量主要为1~3层。后生阶段,铝土矿中胶体包粒由核心和圈层组成,核心成分复杂,外部圈层为铝赤铁矿、一水硬铝石交替构成。

2) 在后生阶段,一水硬铝石和铝赤铁矿分别指示不同的淋滤强度。互层状圈层的形成指示了旦坪地区含铝土矿地层中胶体包粒的周期性凝聚作用,是微观上周期性成矿的反映。

3) 基于分子扩散模型,计算出胶体包粒铝赤铁矿圈层的形成时间为0.1~96.9年,勃姆石圈层的形成时间为0.2~143.6年。估算获得铝土矿中各尺度胶体包粒的形成时间为0.6~7364年。

4) 圈层的形成阶段,勃姆石与铝赤铁矿胶体交替发生扩散吸附作用的宏观表现是微观上铝在基岩中差异化扩散富集过程的反映。有机酸浓度、圈层矿物表面电荷属性会对羟基铝和交换铝的吸附富集产生不同程度的影响,影响胶体包粒的形成。

参考文献 (References)

- 陈强,杨时强,和秀林. 2014. 贵州正安旦坪铝土矿床概略技术经济评价. 内蒙古煤炭经济, (8): 99-100, 106. [Chen Q, Yang S Q, He X L. 2014. Brief technical and economic evaluation of Danping bauxite deposit in Zheng'an, Guizhou Province. Inner Mongolia Coal Economy, (8): 99-100, 106]
- 陈世益,周芳,罗德宣,吴肇清,卢彪,林景光. 1992. 广西贵港三水型铝土矿矿石特征及应用研究. 广西地质, (3): 9-16. [Chen S Y, Zhou F, Luo D X, Wu Z Q, Lu B, Lin J G. 1992. The features and studies on utilizations of the ores of the gibbsite-type bauxite deposits in Guigang, Guangxi. Geology of Guangxi, (3): 9-16]
- 崔滔,闫俊,张敏. 2022. 黔北沉积型铝土矿鲕粒成因. 中国有色金属学报, 32(2): 586-602. [Cui T, Yan J, Zhang M. 2022. Origin of oolites of sedimentary bauxite in northern Guizhou, China. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 32(2): 586-602]
- 戴塔根,李洁兰. 2016. 广西扶绥喀斯特型铝土矿氢氧同位素特征及地质意义. 中国有色金属学报, 26(7): 1505-1514. [Dai T G, Li J L. 2016. Features and significance of H-O isotopes from Fusui Karst bauxite in Guangxi Province, China. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 26(7): 1505-1514]
- 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. 古地理学报, 22(5): 812-826. [Du Y S, Yu W C. 2020. Subaerial leaching process of sedimentary bauxite and the discussion on classifications of bauxite deposits. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 22(5): 812-826]
- 杜远生,周琦,金中国,凌文黎,张雄华,喻建新,汪小妹,余文超,黄兴,崔滔,雷志远,翁申富,吴波,覃永军,曹建州,彭先红,张震,邓虎. 2013. 黔北务正道地区铝土矿基础地质与成矿作用研究

- 进展. 地质科技情报, 32(1): 1-6. [Du Y S, Zhou Q, Jin Z G, Ling W L, Zhang X H, Yu J X, Wang X M, Yu W C, Huang X, Cui T, Lei Z Y, Weng S F, Wu B, Qin Y J, Cao J Z, Peng X H, Zhang Z, Deng H. 2013. Advances in basic geology and metallogenic regularity study of bauxite in Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou Province. Geological Science and Technology Information, 32(1): 1-6]
- 杜远生, 周琦, 金中国, 凌文黎, 汪小妹, 余文超, 崔滔, 雷志远, 翁申富, 吴波, 覃永军, 曹建州, 彭先红, 张震, 邓虎. 2014. 黔北务正道地区早二叠世铝土矿成矿模式. 古地理学报, 16(1): 1-8. [Du Y S, Zhou Q, Jin Z G, Ling W L, Wang X M, Yu W C, Cui T, Lei Z Y, Weng S F, Wu B, Qin Y J, Cao J Z, Peng X H, Zhang Z, Deng H. 2014. Mineralization model for the Early Permian bauxite deposits in Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou Province. Journal of Palaeogeography(Chinese Edition), 16(1): 1-8]
- 范二川. 2011. 贵州大岩铝土矿床地质特征. 矿产勘查, 2(2): 135-141. [Fan E C. 2011. Geological characteristics of Dayan bauxite deposit in Guizhou. Mineral Exploration, 2(2): 135-141]
- 龚子同, 张甘霖, 赵文君, 陈志诚, 欧阳洮, 赵玉国. 2003. 海南岛土壤中铝钙的地球化学特征及其对生态环境的影响. 地理科学, 23(2): 200-207. [Gong Z T, Zhang G L, Zhao W J, Chen Z C, Ouyang T, Zhao Y G. 2003. Geochemical characteristics of aluminum and calcium of soils and their impact on ecological environment in Hainan Island. Scientia Geographica Sinica, 23(2): 200-207]
- 巩恩普, 杨臻元, 黄文韬, 关长庆, 张永利, 苗卓伟, 王立芙, 李骁, 王俊杰. 2021. 广西隆安都结剖面下石炭统都安组上部鲕粒类型及其地质意义. 古地理学报, 23(1): 125-141. [Gong E P, Yang Z Y, Huang W T, Guan C Q, Zhang Y L, Miao Z W, Wang L F, Li X, Wang J J. 2021. The coupled relationship between Carboniferous reefs and the Late Paleozoic ice age. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 23(1): 125-141]
- 古强, 邢凤存, 钱红杉, 孙汉骁. 2021. 川东北飞仙关组鲕粒特征与水动力相关性研究. 沉积学报, 39(6): 1371-1386. [Gu Q, Xing F C, Qian H S, Sun H X. 2021. Correlation between ooid characteristics and hydrodynamic forces in the Feixianguan formation, northeastern Sichuan. Acta Sedimentologica Sinica, 39(6): 1371-1386]
- 郭茂恒, 史书婷, 金振奎, 李阳, 王金艺, 任奕霖, 王凌. 2022. 河口湾潮坪潮汐水道发育特征及地质意义: 以钱塘江为例. 沉积学报, 40(1): 182-191. [Guo S H, Shi S T, Jin Z K, Li Y, Wang J Y, Ren Y L, Wang L. 2022. Characteristics and geological significance of tidal channels in an estuarine tidal flat: a case study from the Qiantang river estuary. Acta Sedimentologica Sinica, 40(1): 182-191]
- 胡旭, 伊海生, 王刚, 欧莉华. 2013. 沉积型铝土矿鲕豆粒结构特征及其成因分析. 重庆科技学院学报(自然科学版), 15(2): 5-9. [Hu X, Yi H S, Wang G, Ou L H. 2013. Texture characteristics and genesis of bean-pebble of sedimentary bauxite deposits. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition), 15(2): 5-9]
- 黄兴, 张雄华, 杜远生, 郗文昆, 杨兵, 段先锋. 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. 地质科技情报, 32(1): 80-86. [Huang X, Zhang X H, Du Y S, Qie W K, Yang B, Duan X F. 2013. Control of sea-level changes over the forming of bauxite between carboniferous and Permian in northern Guizhou and adjacent regions. Geological Science and Technology Information, 32(1): 80-86]
- 金敏昆. 1998. 江苏徐州大北望寒武系鲕粒及鲕粒灰岩特征. 岩相古地理, 18(5): 21-27. [Jin K K. 1998. The Cambrian ooides and oolitic limestones in the dabeiwang section in Xuzhou, Jiangsu. Sedimentary Facies and Palaeogeography, 18(5): 21-27]
- 李飞, 武思琴, 刘柯. 2015. 鲕粒原生矿物识别及对海水化学成分变化的指示意义. 沉积学报, 33(3): 500-511. [Li F, Wu S Q, Liu K. 2015. Identification of ooid primary mineralogy: a clue for understanding the variation in paleo-oceanic chemistry. Acta Sedimentologica Sinica, 33(3): 500-511]
- 李沛刚. 2021. 黔北大竹园二叠系超大型铝土矿微地貌与淋滤成矿作用. 中国地质大学(北京)博士学位论文. [Li P G. 2021. Microgeomorphology and leaching mineralization of the Permian super-large bauxite deposit in dazhuyuan, northern Guizhou. Doctoral dissertation of China University of Geosciences(Beijing)]
- 廖士范, 梁同荣. 1991. 中国铝土矿地质学. 贵州贵阳: 贵州科技出版社. [Liao S F, Liang T R. 1991. Geology of Bauxite in China. Guizhou Guiyang: Guizhou Science and Technology Press]
- 刘平. 1987. 初论贵州之铝土矿. 贵州地质, 4(1): 1-12. [Liu P. 1987. An initial discussion on gnizhou bauxites. Guizhou Geology, 4(1): 1-12]
- 刘巽锋. 1988. 黔北铝土矿豆鲕粒结构的成因机理. 贵州地质, 5(4): 337-341, 382. [Liu X F. 1988. Genesis mechanism of bean-pebble texture of bauxite in northern Guizhou. Guizhou Geology, 5(4): 337-341, 382]
- 刘长龄, 覃志安. 1999. 论中国岩溶铝土矿的成因与生物和有机质的成矿作用. 地质找矿论丛, 14(4): 24-28. [Liu C L, Qin Z A. 1999. On origin of karst bauxite in China and bio-organic metallogenesis. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 14(4): 24-28]
- 梅冥相. 2012. 鲕粒成因研究的新进展. 沉积学报, 30(1): 20-32. [Mei M X. 2012. Brief introduction on new advances on the origin of ooids. Acta Sedimentologica Sinica, 30(1): 20-32]
- 钱利军, 王刚, 欧莉华, 胡旭. 2016. 广西平果、贵州清镇沉积型铝土矿结构特征与沉积环境对比. 科学技术与工程, 16(4): 135-140. [Qian L J, Wang G, Ou L H, Hu X. 2016. Contrast of structure characteristics and sedimentary environment of sedimentary bauxite deposit in Pingguo Guangxi and Qingzhen Guizhou. Science Technology and Engineering, 16(4): 135-140]
- 王洁, 宋玉萍. 2010. 从巨鲕的概念窥视碳酸盐岩包覆颗粒的研究. 大庆石油地质与开发, 29(2): 40-43. [Wang J, Song Y P. 2010. The research progress of coating grains in carbonate rock based on the definition change of large ooid. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 29(2): 40-43]

- 王庆飞,刘学飞,杨淑娟,张起钻,邓军. 2022. 喀斯特型铝土矿是如何形成的? 地球科学, 47(10): 3880-3881. [Wang Q F, Liu X F, Yang S J, Zhang Q Z, Deng J. 2022. How did the karst bauxite form? *Earth Science*, 47(10): 3880-3881]
- 汪小妹,焦养泉,杜远生,周琦,崔滔,计波,雷志远,翁申富,金中国,熊星. 2013. 黔北务正道地区铝土矿稀土元素地球化学特征. 地质科技情报, 32(1): 27-33. [Wang X M, Jiao Y Q, Du Y S, Zhou Q, Cui T, Ji B, Lei Z Y, Weng S F, Jin Z G, Xiong X. 2013. Rare earth element geochemistry of bauxite in Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou Province. *Geological Science and Technology Information*, 32(1): 27-33]
- 邢延路,冯李强. 2015. 北京西山下苇甸剖面寒武系徐庄组鲕粒研究. 古地理论, 17(4): 517-528. [Xing Y L, Feng L Q. 2015. A study on ooids in limestones of the Cambrian xuzhuang formation at Xiaweidian outcrop in western hill of Beijing. *Journal of Palaeogeography*(Chinese Edition), 17(4): 517-528]
- 许第发,钟天祥,徐冬梅,刘广深. 2002. 酸沉降对土壤地球化学过程的影响. 地质地球化学, 30(4): 68-74. [Xu D F, Zhong T X, Xu D M, Liu G S. 2002. Effects of acid deposition on soil geochemical cycles. *Geology-Geochemistry*, 30(4): 68-74]
- 杨延伟,卢欣祥,侯广顺,朱康钰,杨崇科,郭晓伟. 2018. 河南关庙一大坪地区铝土矿岩相学特征及成矿物源分析. 矿产与地质, 32(6): 978-986. [Yang Y W, Lu X X, Hou G S, Zhu K Y, Yang C K, Guo X W. 2018. Petrographic characteristics and ore-forming material source analysis of bauxite in Guanmiao-Daping area, Henan Province. *Mineral Resources and Geology*, 32(6): 978-986]
- 殷科华. 2009. 黔北务正道铝土矿的成矿作用及成矿模式. 沉积学报, 27(3): 452-457. [Yin K H. 2009. Mineralization and metallogenic model for bauxite in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou. *Acta Sedimentologica Sinica*, 27(3): 452-457]
- 余文超,杜远生,周琦,金中国,汪小妹,覃永军. 2012. 黔北务川一正安一道真地区铝土矿系中生物标志物及其地质意义. 古地理论, 14(5): 651-662. [Yu W C, Du Y S, Zhou Q, Jin Z G, Wang X M, Qin Y J. 2012. Biomarkers of bauxite-bearing strata and its geological significance in Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou Province. *Journal of Palaeogeography*(Chinese Edition), 14(5): 651-662]
- 余文超,杜远生,周琦,金中国,汪小妹,覃永军,崔滔. 2014. 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. 古地理论, 16(1): 19-29. [Yu W C, Du Y S, Zhou Q, Jin Z G, Wang X M, Qin Y J, Cui T. 2014. Provenance of bauxite beds of the Lower Permian in Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou Province; evidence from detrital zircon chronology. *Journal of Palaeogeography*(Chinese Edition), 16(1): 19-29]
- 余文超,杜远生,周锦涛,成龙,邓旭升,戴贤铎,庞大卫,翁申富,雷志远,李沛刚,陈群. 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. 地质学报, 97(9): 3056-3074. [Yu W C, Du Y S, Zhou J T, Cheng L, Deng X S, Dai X D, Pang D W, Weng S F, Lei Z Y, Li P G, Chen Q. 2023. Provenance and deep-time environmental factors for bauxitization in China: Progress and discussion. *Acta Geologica Sinica*, 97(9): 3056-3074]
- 张亚男,张莹华,吴慧,丁晓英,凌文黎,雷志远,翁申富,马倩,杜远生. 2013. 黔北务正道地区铝土矿鲕状矿石中鲕粒的微量元素地球化学特征及其成矿意义. 地质科技情报, 32(1): 62-70. [Zhang Y N, Zhang Y H, Wu H, Ding X Y, Ling W L, Lei Z Y, Weng S F, Ma Q, Du Y S. 2013. Microscopic geochemical characteristics of oolite in oolitic bauxite ores from Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area in the northern Guizhou Province and their metallogenic significance. *Geological Science and Technology Information*, 32(1): 62-70]
- 周瑶琪,张晗,张振凯. 2017. 海相碳酸盐鲕粒形成过程的模拟实验研究. 中国石油大学学报(自然科学版), 41(3): 23-30. [Zhou Y Q, Zhang H, Zhang Z K. 2017. Experiment study of synthesis for marine carbonate ooids genesis. *Journal of China University of Petroleum*(Edition of Natural Science), 41(3): 23-30]
- Astin T R, Scotchman I C. 1988. The diagenetic history of some septarian concretions from the kimberidge clay, England. *Sedimentology*, 35: 349-368.
- Bárdossy G. 1982. *Karst Bauxites*. Amsterdam: 4-6.
- Barnett M J, Palumbo-Roe B, Deady E A, Gregory S P. 2020. Comparison of three approaches for bioleaching of rare earth elements from bauxite. *Minerals*, 10(8): 649.
- Beitler B, Parry W T, Chan M A. 2005. Fingerprints of fluid flow: chemical diagenetic history of the Jurassic Navajo sandstone, southern Utah, U.S.A. *Journal of Sedimentary Research*, 75: 547-561.
- Berner R A. 1968. Rate of concretion growth. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 32: 477-483.
- Bhattacharyya D P, Kakimoto P K. 1982. Origin of ferrous ooids: an SEM study of ironstone ooids and bauxite pisoids. *Journal of Sedimentary Research*, 52(3): 849-857.
- Bojórquez-Quintal E, Escalante-Magaña C, Echevarría-Machado I, Martínez-Estévez M. 2017. Aluminum, a friend or foe of higher plants in acid soils. *Frontiers in Plant Science*, 8: 1767.
- Boodt M F, Hayes M H B, Herbillon A. 1990. *Soil Colloids and Their Associations in Aggregates*. New York: Plenum Press, 245-305.
- Brady N C, Weil R R. 2008. *The Nature and Properties of Soils*. Upper Saddle River NJ: Pearson Press, 117-119.
- Brehm U, Krumbein W E, Palinska K A. 2006. Biomicrospheres generate ooids in the laboratory. *Geomicrobiology Journal*, 23: 545-550.
- D'Argenio B, Mindszenty A. 1995. Bauxites and related paleokarst: tectonic and climatic event markers at regional unconformities. *Eclogae Geologicae Helveticae*, 88(3): 453-499.
- Davies P J, Bubela B, Ferguson J. 1978. The formation of ooids. *Sedimentology*, 25: 703-730.
- Diamond S. 1970. Pore size distributions in clays. *Clays and Clay Minerals*, 18: 7-23.
- Diaz M R, Eberli G P. 2019. Decoding the mechanism of formation in marine ooids: A review. *Earth-Science Reviews*, 190: 536-556.
- Diaz M R, Swart P K, Eberli G P, Oehlert A M, Devlin Q, Saied A, Alta-

- bet M A. 2015. Geochemical evidence of microbial activity within ooids. *Sedimentology*, 62: 2090–2112.
- Duguid S M A, Kyser T K, James N P, Rankey E C. 2010. Microbes and ooids. *Journal of Sedimentary Research*, 80: 236–251.
- Fontaine E R. 1954. Investigations into the mechanism of soil adhesion. *Journal of Soil Science*, 5(2): 251–263.
- Hsu P H. 1989. Aluminum hydroxides and oxyhydroxides. In: Dixon J B, Weed S B (eds). *Minerals in Soil Environments*. Soil Science Society of America, Madison, WI, 99–143.
- Iversen N, Jørgensen B B. 1993. Diffusion coefficients of sulfate and methane in marine sediments: influence of porosity. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(3): 571–578.
- Khosravi M, Vêrard C, Abedini A. 2021. Palaeogeographic and geodynamic control on the Iranian Karst-type bauxite deposits. *Ore Geology Reviews*, 139: 104589.
- Lei Z Y, Ling W L, Wu H, Zhang Y H, Zhang Y N. 2023. Geochemistry and mineralization of the Permian bauxites with contrast bedrocks in northern Guizhou, South China. *Journal of Earth Science*, 34: 487–503.
- Li F, Yan J X, Algeo T, Wu X. 2013. Paleocceanographic conditions following the end-Permian mass extinction recorded by giant ooids (Moyang, South China). *Global and Planetary Change*, 105: 102–120.
- Li F, Yan J X, Burne R V, Chen Z Q, Algeo T J, Zhang W, Tian L, Gan Y L, Liu K, Xie S C. 2017. Paleo-seawater REE compositions and microbial signatures preserved in laminae of Lower Triassic ooids. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 486: 96–107.
- Li F, Webb G E, Algeo T J, Kershaw S, Lu C J, Oehlert A M, Gong Q L, Pourmand A, Tan X C. 2019. Modern carbonate ooids preserve ambient aqueous REE signatures. *Chemical Geology*, 509: 163–177.
- Li P G, Yu W C, Du Y S, Lai X L, Weng S F, Pang D W, Xiong G L, Lei Z Y, Zhao S, Yang S Q. 2020. Influence of geomorphology and leaching on the formation of Permian bauxite in northern Guizhou Province, South China. *Journal of Geochemical Exploration*, 210: 106446.
- Li Y H, Gregory S. 1974. Diffusion of ions in sea water and in deep-sea sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 38(5): 703–714.
- Liu X F, Wang Q F, Zhang Q Z, Zhang Y, Li Y. 2016. Genesis of REE minerals in the karstic bauxite in western Guangxi, China, and its constraints on the deposit formation conditions. *Ore Geology Reviews*, 75: 100–115.
- Ling K Y, Zhu X Q, Tang H S, Li S X. 2017. Importance of hydrogeological conditions during formation of the karstic bauxite deposits, Central Guizhou Province, Southwest China: a case study at Lindai deposit. *Ore Geology Reviews*, 82: 198–216.
- Ma P J, Dong C M, Lin C Y. 2022. Petrographic and geochemical characteristics of nodular carbonate-bearing fluorapatite in the lacustrine shale of the Shahejie Formation, Dongying Depression, Bohai Bay Basin. *Sedimentary Geology*, 439: 106218.
- Mongelli G. 2002. Growth of hematite and boehmite in concretions from ancient Karst bauxite: clue for past climate. *Catena*, 50(1): 43–51.
- Mongelli G, Acquafredda P. 1999. Ferruginous concretions in a Late Cretaceous Karst bauxite: composition and conditions of formation. *Chemical Geology*, 158: 315–320.
- Mongelli G, Buccione R, Sinisi R. 2015. Genesis of autochthonous and allochthonous Apulian Karst bauxites (southern Italy): climate constraints. *Sedimentary Geology*, 325: 168–176.
- Mongelli G, Buccione R, Gueguen E, Langone A, Sinisi R. 2016. Geochemistry of the Apulian allochthonous Karst bauxite, Southern Italy: distribution of critical elements and constraints on Late Cretaceous Peri-Tethyan palaeogeography. *Ore Geology Reviews*, 77: 246–259.
- Montoroi J P. 1994. Geochemical, behavior of aluminum in saline acid sulfate soils of lower Casamance (Senegal): agricultural consequences for the rehabilitation of rice cultur. *Proceeding of 15th World Congress of Soil Science*: 10–16.
- Mozley P S, Davis J M. 2005. Internal structure and mode of growth of E-longate calcite concretions: evidence for small-scale, microbially induced, chemical heterogeneity in groundwater. *Geological Society of America Bulletin*, 117(11–12): 1400–1412.
- Newell N D, Purdy E G, Imbrie J. 1960. Bahamian Oolitic sand. *The Journal of Geology*, 68(5): 481–497.
- Ng Kee Kwong K F, Huang P M. 1978. Sorption of phosphate by hydrolytic reaction products of aluminium. *Nature*, 271: 336–338.
- Parry W T. 2011. Composition, nucleation, and growth of iron oxide concretions. *Sedimentary Geology*, 233: 53–68.
- Price G D, Valdes P J, Sellwood B W. 1997. Prediction of modern bauxite occurrence: Implications for climate reconstruction. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 131: 1–13.
- Richards P L, Kump L R. 2003. Soil pore-water distributions and the temperature feedback of weathering in soils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(20): 3803–3815.
- Sefton-Nash E, Catling D. 2008. Hematitic concretions at Meridiani Planum, Mars: their growth timescale and possible relationship with iron sulfates. *Earth and Planetary Science Letters*, 269: 366–376.
- Shamshuddin J, Ismail H. 1995. Reactions of ground magnesium limestone and gypsum in soils with variable-charge minerals. *Soil Science Society of America Journal*, 59(1): 106–112.
- Simone L. 1980. Ooids: a review. *Earth-Science Reviews*, 16: 319–355.
- Smyth J R, McCormick T C. 1995. Crystallographic data for minerals. In: Ahrens T J (ed). *Mineral Physics and Crystallography: A Handbook of Physical Constants*. American Geophysical Union: 1–17.
- Sorby H C. 1879. The structure and origin of limestones. *The Popular Science Review*, 3(9): 134–137.
- Streicher P E, Alexander M G. 1995. A chloride conduction test for concrete. *Cement and Concrete Research*, 25: 1284–1294.
- Swirydczuk K, Wilkinson B H, Smith G R. 1979. The Pliocene Glens Ferry oolite: lake-margin carbonate deposition in the southwestern Snake River plain. *Journal of Sedimentary Research*, 49(3): 995–1004.
- Tang B, Fu Y, Yan S, Chen P W, Cao C, Guo C, Wu P, Long Z, Long K

- S, Wang T S, Liu Y, Yang Y. 2022. The source, host minerals, and enrichment mechanism of lithium in the Xinmin bauxite deposit, northern Guizhou, China; constraints from lithium isotopes. *Ore Geology Reviews*, 141: 104653.
- Tardy Y, Nahon D. 1985. Geochemistry of laterites, stability of Al-goethite, Al-hematite, and Fe(super 3+)–kaolinite in bauxites and ferricretes; an approach to the mechanism of concretion formation. *American Journal of Science*, 285(10): 865-903.
- Trower E J. 2020. The Enigma of neoproterozoic giant ooids: fingerprints of extreme climate? *Geophysical Research Letters*, 47.
- Trower E J, Lamb M P, Fischer W W. 2017. Experimental evidence that ooid size reflects a dynamic equilibrium between rapid precipitation and abrasion rates. *Earth and Planetary Science Letters*, 468: 112–118.
- Valeton I. 2009. Saprolite-Bauxite Facies of Ferralitic Duricrusts on Palaeosurfaces of Former Pangaea. Blackwell Publishing Ltd, 153–188.
- Wedepohl K H. 1969. *Handbook of Geochemistry (Vol. 1)*. Berlin: Springer, 1–442.
- Wilkinson M, Dampier M D. 1990. The rate of growth of sandstone-hosted calcite concretions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54(12): 3391-3399.
- Wilkinson B H, Owen R M, Carroll A R. 1985. Submarine hydrothermal weathering, global eustasy, and carbonate polymorphism in Phanerozoic marine oolites. *SEPM Journal of Sedimentary Research*, 55(2): 171–183.
- Xiao E Z, Riaz M, Zafar T, Latif K. 2021. Cambrian marine radial ceribroid ooids: participatory products of microbial processes. *Geological Journal*, 56(9): 4627-4644.
- Xiong G L, Yu W C, Du Y S, Weng S F, Pang D W, Deng X S, Zhou J T. 2021. Provenance of Lower Carboniferous bauxite deposits in northern Guizhou, China; constraints from geochemistry and detrital zircon U-Pb ages. *Journal of Earth Science*, 32(1): 235–252.
- Yu W C, Wang R H, Zhang Q L, Du Y S, Chen Y, Liang Y P. 2014. Mineralogical and geochemical evolution of the Fusui bauxite deposit in Guangxi, South China; from the original Permian orebody to a Quaternary Salento-type deposit. *Journal of Geochemical Exploration*, 146: 75–88.
- Yu W C, Algeo T J, Yan J X, Yang J H, Du Y S, Huang X, Weng S F. 2019. Climatic and hydrologic controls on upper Paleozoic bauxite deposits in South China. *Earth-science Reviews*, 189: 159–176.
- Zhao L H, Liu X F, Wang Q F, Ma X L, Liu L, Sun X F, Deng J. 2023. Genetic mechanism of super-large karst bauxite in the northern North China Craton: constrained by diaspore in-situ compositional analysis and pyrite sulfur isotopic compositions. *Chemical Geology*, 622: 121388.
- Zhou J T, Yu W C, Du Y S, Liu X, Wang Y H, Xiong G L, Zhao Z Y, Pang D W, Shen D X, Weng S F, Liu Z C, Chen D. 2022. Provenance change and continental weathering of Late Permian bauxitic claystone in Guizhou Province, Southwest China. *Journal of Geochemical Exploration*, 236: 106962.

(责任编辑 李新坡; 英文审校 李攀)