

引用格式: 李佐强, 陈敏, 卢君勇, 等, 2023. 川南马边黄家坪磷矿下寒武统麦地坪组沉积相特征及磷成矿模式研究 [J]. 地质力学学报, 29 (1): 34–47. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.2022051](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.2022051)

Citation: LI Z Q, CHEN M, LU J Y, et al., 2023. Sedimentary facies characteristics and metallogenic model of the lower Cambrian Maidiping formation in the Huangjiaping phosphate deposit, Mabian County, southern Sichuan [J]. Journal of Geomechanics, 29 (1): 34–47. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.2022051](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.2022051)

川南马边黄家坪磷矿下寒武统麦地坪组沉积相特征及磷成矿模式研究

李佐强¹, 陈敏¹, 卢君勇¹, 阳开龙¹, 唐茂林¹, 朱荣涛²

LI Zuoqiang¹, CHEN Min¹, LU Junyong¹, YANG Kailong¹, TANG Maolin¹, ZHU Rongtao²

1. 四川省地质矿产勘查开发局二零七地质队, 四川 乐山 614000;

2. 贵州省瓮安县自然资源局, 贵州 瓮安 550400

1. *The 207 Geological Team, Sichuan Bureau of Exploration & Development of Geology & Mineral Resources, Leshan 614000, Sichuan, China;*

2. *Natural Resources Bureau of Weng'an, Weng'an 550400, Guizhou, China*

Sedimentary facies characteristics and metallogenic model of the lower Cambrian Maidiping formation in the Huangjiaping phosphate deposit, Mabian County, southern Sichuan

Abstract: The lower Cambrian Maidiping formation in the Mabian area of southern Sichuan is a crucial ore-bearing horizon for Kunyang-style phosphate ores. The sedimentary paleoenvironment controls the distribution of phosphate ore. Based on the field section measurements and borehole core observations of the phosphorus-bearing strata of the Maidiping formation in the Huangjiaping area of Mabian, the characteristics of the sedimentary phases, phosphate massifs, and the mode of phosphate ore genesis of the Maidiping formation were studied in detail. The study shows that the Maidiping formation has developed carbonate tidal flat sedimentary facies, and six micro-phases can be identified in three subphases: supratidal flat, strand flat, and subtidal flat. The supratidal flat includes supratidal beach and supratidal dolomite flat; the strand flat includes tidal channel, intertidal beach, and intertidal limestone flat; the subtidal flat is only developed with the low-energy subtidal flat, showing a sedimentary evolution sequence of sea recession and sea erosion in the vertical direction. Based on the finding, we established the bay–tidal flat depositional model in the Maidiping formation. The sedimentary facies strictly controls the enrichment of phosphorite, and the intertidal beach and tidal channel with high energy hydrodynamics in the strand flat is the most favorable environment for phosphorite formation. The sand–gravel phosphorite is the most widely developed phosphorite type in the Mabian area. The mineralization mode of phosphate deposits is that the rising ocean current brings phosphorus-rich seawater into the tidal flat environment of the bay, and the phosphorus condenses and accumulates in the form of colloid-chemical, by biological and chemical interactions, forming semi-solidified and weakly-solidified phosphate sediments, which are then subjected to water scouring, crushing, transporting, and precipitation again, and then formed into high-grade phosphate masses after compaction and consolidation.

Keywords: Mabian area; Maidiping formation; sedimentary facies; phosphorite; metallogenic model

摘要: 川南马边地区下寒武统麦地坪组是昆阳式磷矿的重要赋矿层位, 磷矿的分布受沉积古环境控

基金项目: 四川省政府性投资地质勘查项目 (DZ202105)

This research is financially supported by the Geological Exploration Program invested by the Sichuan Government (Grant DZ202105).

第一作者: 李佐强 (1995—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事地质调查及矿产勘查工作。E-mail: lzqyedt@163.com

通讯作者: 陈敏 (1985—), 男, 高级工程师, 主要从事矿产勘查及评价工作。E-mail: 37255525@qq.com

收稿日期: 2022-04-26; 修回日期: 2022-06-29; 责任编辑: 王婧

制。以马边黄家坪地区麦地坪组含磷地层野外剖面实测及钻孔岩芯观察为基础, 对麦地坪组沉积相特征、磷块岩特征、磷矿成因模式进行了详细研究。研究表明: 黄家坪地区麦地坪组发育碳酸盐岩潮坪相沉积, 可识别出潮上坪、潮间坪和潮下坪3个亚相共计6种微相类型: 潮上坪包括潮上滩和潮上云坪微相; 潮间坪包括潮汐水道、潮间滩、潮间灰坪; 潮下坪则仅发育低能潮下坪, 垂向上表现出海退-海侵的沉积演化序列。据此建立了麦地坪组海湾潮坪相沉积模式。磷块岩的富集严格受沉积相带控制, 潮间坪内高能水动力的潮间滩和潮汐水道是最有利于磷块岩形成的微相环境, 砂砾屑磷块岩是马边地区发育较为广泛的磷块岩类型。磷矿床的成矿模式为上升洋流将富磷海水带入到海湾潮坪环境内, 受生物-化学作用使磷以胶体-化学的形式发生凝聚富集, 形成半固结-弱固结的磷酸盐沉积物, 后遭受水流的冲刷、破碎、搬运、簸选再次发生沉淀, 经压实、固结即形成高品位的磷块岩。

关键词: 马边地区; 麦地坪组; 沉积相; 磷块岩; 成矿模式

中图分类号: P611.2+2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (2023) 01-0034-14

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2022051

0 引言

早寒武世梅树村期是扬子板块一次极为重要的成磷期, 在滇东以及川中地区的梅树村组(相当层位称渔户村组、麦地坪组、戈仲伍组等)中形成了一系列近南北向展布的昆阳式磷矿床, 构成了规模庞大的川滇磷成矿带(韩豫川等, 2012)。针对梅树村期川滇磷成矿带磷矿床的相关研究工作持续不断, 不少学者从沉积古地理条件、矿石物质组分、层序地层演化特征、矿床地质特征、沉积地球化学特征等方面进行了有益探讨, 对于磷块岩的成磷环境、成磷物质来源、磷块岩中稀土元素富集特征、富磷底水-胶体化学凝聚-盆内再改造富集-成岩压实作用多阶段成矿模式等取得了一定的认识(陈志明和陈其英, 1987; 曾允孚和杨卫东, 1987; 肖武权, 1992; 曾允孚等, 1994; 东野脉兴, 2001; 韩豫川等, 2012; 张君等, 2018; 杨豫川等, 2019; 米云川等, 2021; Zhang et al., 2021; 刘建清等, 2022)。

研究表明, 梅树村期磷矿层的厚度及品位特征严格受控于沉积古地理条件, 磷块岩大都沉积于浅水或是极浅水古陆边缘, 即有障壁滩后的泻湖-潮坪以及相邻的浅海陆棚沉积体系(刘发禄等, 1985; 韩豫川等, 2012)。但川西南地区早寒武世梅树村期麦地坪组地层的厚度、岩性特征差异极大, 沉积相的类型多样, 主要包括浅海碳酸盐台地海湾潮坪、风暴浅滩、浅海陆棚、碳酸盐岩缓坡、碳酸盐岩斜坡、台内裂隙槽、深水盆地等(陈志明和陈其英, 1987; 曾允孚和杨卫东, 1987; 东野脉兴, 2001; 邓小林等, 2009; 韩豫川等, 2012; 牟传龙等, 2012; Sato et

al., 2014; 杨豫川等, 2019; 刘建清等, 2022)。

位于四川盆地南部乐山市马边彝族自治县的聚磷盆地是川滇磷成矿带北段的磷矿富集地区, 磷矿层赋存于下寒武统麦地坪组下段地层。有关马边地区磷块岩的沉积环境研究较多, 归结起来包括: 磷酸盐沉积物在高压环境下破碎成内碎屑、较低能的海湾潮坪潮间-潮下高能相带成矿, 如马边老河坝磷矿(肖武权, 1992); 潮下高能浅滩环境为富磷矿聚集带, 如马边-美姑地区磷块岩(韩豫川等, 2012); 局限台地内潮坪沉积, 而潮下间歇高能区则为成磷的有利相带, 如马边地区麦地坪组(杨豫川等, 2019)。由此可见, 有关马边地区麦地坪组磷矿沉积环境的认识上存在较大差异, 这也制约了对该区磷矿的勘探, 因此, 有必要对其进行系统的研究。

文章在总结相关文献基础上, 对老河坝磷矿区南部哈罗罗磷矿段出露的麦地坪组地层剖面进行了野外实测, 针对马边县黄家坪地区麦地坪组深部隐伏磷矿普查项目的两口钻孔岩芯, 开展麦地坪组沉积相研究, 分析其沉积演化特征, 探究沉积环境与磷成矿模式之间的联系, 旨在为进一步的磷矿勘查工作提供详实的地质依据。

1 区域地质背景

四川盆地位于上扬子地块, 其发育受周缘地块的裂解和基底构造运动影响。新元古代扬子板块西缘发育康滇裂谷, 南缘发育南华裂谷, 整体处于拉张构造背景, 至南华纪晚期拉张裂谷活动逐渐减弱(Wang and Li, 2003; 管树巍等, 2017)。雷波-永善地区, 下寒武统麦地坪组在小范围内沉积相差异巨

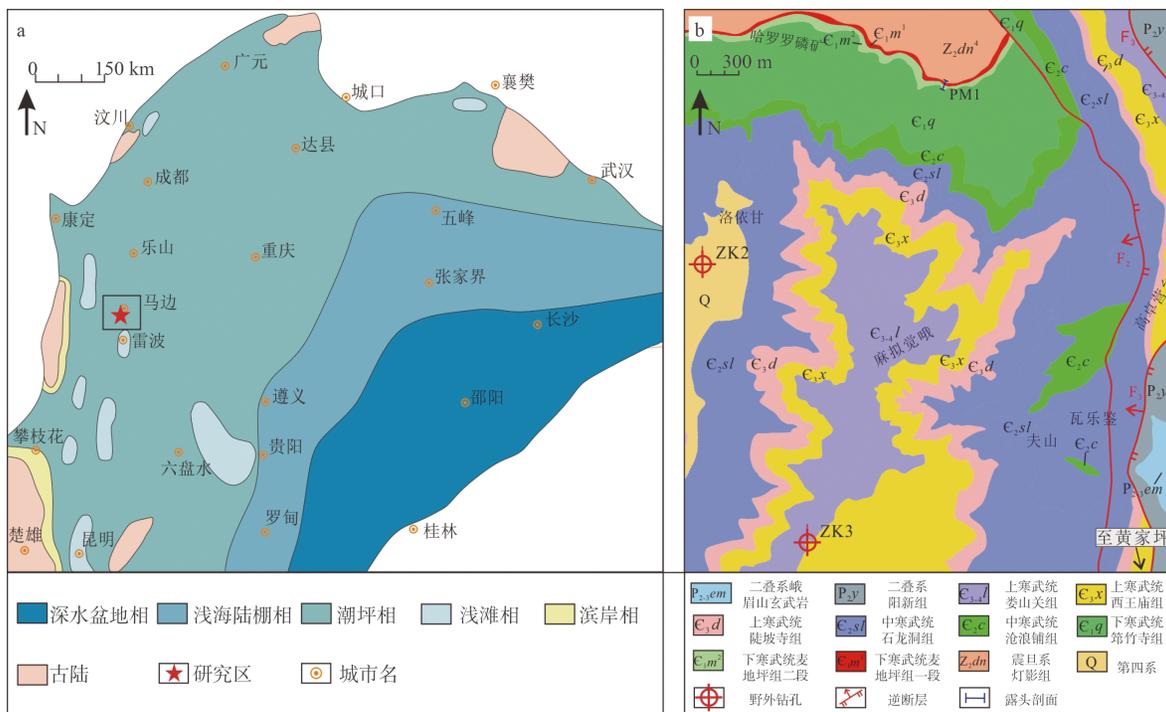
大,被认为受裂谷盆地拉张不均匀沉降,隆、凹相间古地理格局的反映,属新元古代裂谷盆地的延续(刘建清等,2022)。震旦纪灯影组至早寒武世麦地坪组沉积期,受桐湾运动多幕次影响,地层常有不同程度缺失,麦地坪组在盆地北缘及南缘部分地段厚度较薄,与下伏灯影组呈平行不整合接触;区域上筲竹寺组与下伏麦地坪组间存在明显地层缺失,在局部地段筲竹寺组直接超覆于灯影组之上,麦地坪组缺失(汪泽成等,2014;邢凤存等,2015;周慧等,2015;刘树根等,2018)。震旦纪后中上扬子地块已逐步形成稳定发育的碳酸盐台地面貌,四川盆地整体属稳定克拉通内发育的拗陷盆地,在盆地周缘则基本属克拉通边缘裂陷盆地(李皎和何登发,2014)。

麦地坪组沉积期,针对中上扬子地区的古地理重建结果表明,自北西向南东方向可划分出碳酸盐台地相、过渡陆棚相以及深水盆地相(图1a),其西缘沿康滇古陆一带同时发育潮坪-浅滩-滨岸相沉积,磷块岩集中富集于潮坪相潮下海湾地带,构成了国内著名的成矿时期和磷矿成矿带(陈志明和陈其英,1987;韩豫川等,2012;牟传龙等,2012)。自新

生代以来,受印度板块俯冲产生的南东向构造逃逸,马边-雷波地区发育大量南北向断裂,以峨边-金阳断裂最为重要,主要断于古生代-中生代地层,其他断层多沿大断裂附近发育,属次级派生断层(张芹贵等,2019)。研究区出露的主要地层最老为震旦系上统灯影组,最新为寒武系上统娄山关组,除筲竹寺组与麦地坪组平行不整合接触外,其余各层均为整合接触,西部构造相对稳定,褶皱发育,仅东部受区域次级断裂影响,导致二叠系地层逆冲至地表与寒武系地层呈断层接触,出露部分峨眉山玄武岩(图1b)。

2 沉积特征

依据生物组合特征差异将麦地坪组分为两段(成都地质学院震旦亚界专题组,1979),部分学者也将马边地区麦地坪组划分为三段式,以充分考虑其岩性组合的变化特征,且其二段为富磷矿层,以磷矿石品位大于12%作为上下地层分段的标志(肖武权,1992;杨豫川等,2019)。但实际上,四川马边



a—中上扬子区早寒武世梅树村期沉积古地理图(牟传龙等,2012); b—四川马边县黄家坪磷矿东北部矿区地质简图

图1 研究区区域地质背景图

Fig. 1 Regional geological map of the study area

(a) Sedimentary facies and palaeogeography in the middle-upper Yangtze area during the Early Cambrian Meishucunian (Mou et al., 2012); (b) Geological sketch of northeast Huangjiaping phosphate deposit, Mabian County, Sichuan Province

地区磷矿勘查生产实践中普遍沿用两段划分方式, 且研究区内麦地坪组底部含磷白云岩段整体厚度较薄, 通常不足 2 m 厚, 将其合并为一段。因此, 此次研究中暂沿用麦地坪组两段式划分方案(即 C_1m^1 、 C_1m^2 两段), 磷矿层富集于麦地坪组下部分麦一段, 上部的麦二段无矿层产出。

2.1 剖面特征概述

马边地区麦地坪组厚度变化不大, 各段厚度也较为一致, 目的层与下伏灯影组四段呈整合接触, 与上覆筇竹寺组一段为平行不整合接触(韩豫川等, 2012; 邢凤存等, 2015; 杨豫川等, 2019)。麦地坪组在地表主要出露于研究区北部, 大致近南北向展布, 产状稳定, 倾角多为 $18^\circ \sim 28^\circ$ 。此次研究选择黄

家坪磷矿北部出露较好的剖面(PM1)进行野外实测, 依据岩性特征, 将麦地坪组细分为 9 小层, 各小层相对连续出露。麦地坪组底部与灯影组分界明显, 地层中上部因地形及坡积物影响, 出露受限, 因此结合工区内紧邻的两口钻孔进行综合对比分析(图 1b)。黄家坪磷矿北部剖面(PM1)岩性特征简述如下(图 2)。

灯影组四段(Z_2dn^4): 灰色—浅灰色中—厚层状含硅质微晶—粉晶白云岩, 零星夹有薄层状硅质条带及硅质薄纹层, 剖面上沿节理裂隙中见少量方铅矿和闪锌矿发育。属局限台地内潮间云坪沉积, 与麦地坪组整合接触(图 3a)。

麦地坪组一段(C_1m^1): 厚度约为 15.09 m, 该段

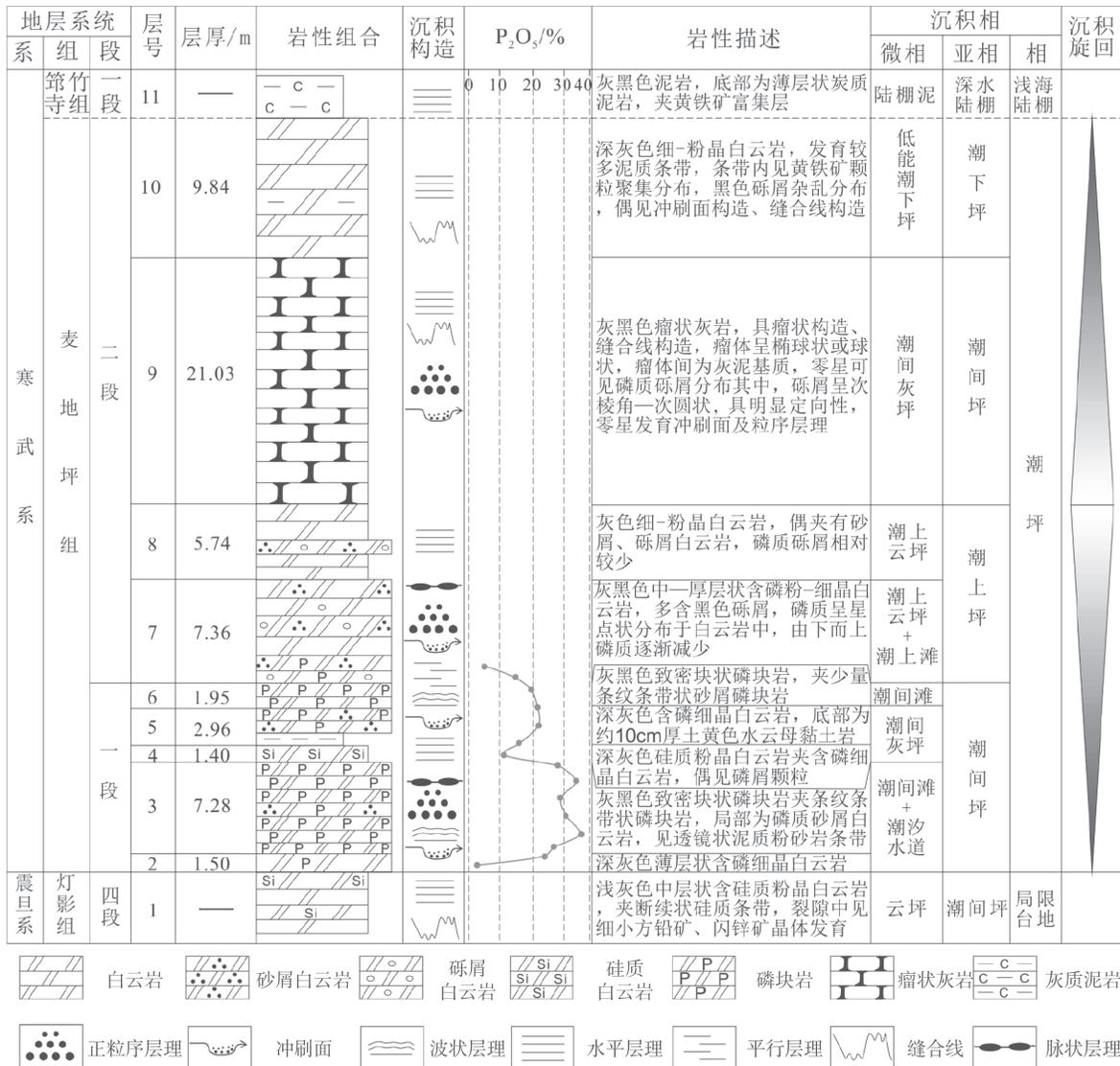


图 2 马边黄家坪磷矿下寒武统麦地坪组沉积相综合柱状图

Fig. 2 Synthetic histogram of sedimentary facies of the lower Cambrian Maidiping formation in the Huangjiaping phosphate deposit, Mabian County



$C_1 m^1$ —麦地坪组一段; $C_1 m^2$ —麦地坪组二段; $Z_2 dn^4$ —灯影组四段

a—麦地坪组宏观照; b—磷矿层宏观照(图3a中方框放大), 箭头处见硅质白云岩透透镜体; c—水云母黏土岩; d—瘤状灰岩; e—筇竹寺组炭质泥岩与麦地坪组白云岩呈平行不整合接触; f—含磷质砾屑白云岩, 砾屑杂乱分布; g—砂屑磷块岩, 砂屑多呈圆形、椭圆形, 充填物多为不规则状泥晶胶磷矿及白云石(+); h—砂砾屑磷块岩, 发育多期冲刷面、正粒序层理组成的沉积序列; i—砂砾屑磷块岩, 发育多期冲刷面、正粒序层理组成的沉积序列

图3 马边黄家坪磷矿下寒武统麦地坪组典型沉积特征和显微镜下特征

Fig. 3 Typical sedimentary features and microscopic characteristics of the lower Cambrian Maidiping formation in the Huangjiaping phosphate deposit, Mabian County

(a) Macrophotograph of the Maidiping formation; (b) Macrophotograph of the phosphorite layer (enlarged by the box in Fig 3a), and siliceous dolomite lenticle is seen at the arrow; (c) Hydromica clay rock; (d) Nodular limestone; (e) The carbonaceous mudstone of the Qiongzhusi formation is in disconformity with the dolomites of the Maidiping formation; (f) Phosphorus-bearing dolomite with phosphorus gravels disorderly distributed; (g) Arenite phosphorite, mostly with round, oval arenite and irregular micritecollophanite and dolomite as interstitial materials (+); (h) Sand-gravel phosphorite, developed with a sedimentary sequence consisting of multi-stage scouring surface and normal graded bedding; (i) Sand-gravel phosphorite, developed with a sedimentary sequence consisting of multi-stage erosion surface and normal graded bedding

$C_1 m^1$ —the first member of the Maidiping formation; $C_1 m^2$ —the second member of the Maidiping formation; $Z_2 dn^4$ —the fourth member of the Dengying formation

以富磷矿层为主要特征, 岩性主要为深灰色—灰黑色块状、条纹条带状砂屑磷块岩, 夹少量薄层状含磷粉—细晶白云岩, 发育较多硅质透镜体以及硅质条带。该含磷矿层段可进一步细分出上、下矿层, 中部夹一层含磷白云岩及水云母黏土岩的夹矸层(图 3b), 厚约 10 cm 薄层水云母黏土岩在区域上广泛发育(图 3c), 矿层向顶部、底部磷含量逐渐递减。

麦地坪组二段(C_1m^2): 厚度约为 43.97 m, 顶部及下部为浅灰色含砂屑、砾屑粉—细晶白云岩, 偶发育有磷质条纹, 磷质多成星点状杂乱分布, 中部发育一套区域上可对比的深灰色中—厚层状瘤状灰岩(图 3d)。

筇竹寺组一段(C_1q^1): 深黑色薄—中层状粉砂质泥岩、泥岩, 具微细的水平层理, 底部为黑色炭质泥岩层, 含大量巨型黄铁矿结核和团块, 属深水陆棚泥沉积。与下伏麦地坪组平行不整合接触(图 3e)。

2.2 沉积相分析

针对马边地区麦地坪组属碳酸盐岩潮坪相的划分目前基本达成共识(邓小林等, 2009; 韩豫川等, 2012; 牟传龙等, 2012; 杨豫川等, 2019), 但针对该沉积亚相以及沉积微相划分目前尚存较大差异, 例如已有研究通常将磷块岩划分为潮下高能带沉积, 且存在潮间云坪与潮上云坪用词的混乱及区别特征不明确等问题。金振奎等(2013)将碳酸盐岩沉积相以及相模式等进行了系统的提炼总结, 针对碳酸盐沉积相的定义以及各相的类型进行重新厘定和划分, 这一方案比较适合该区的沉积特征。因此, 此研究也采用该沉积相划分方案, 结合野外岩石学特征以及镜下薄片观察, 分析认为麦地坪组属碳酸盐台地沉积体系内潮坪沉积相, 可进一步识别出潮上

坪、潮间坪、潮下坪 3 个亚相, 各亚相细分出多个沉积微相, 磷矿层主体位于潮间坪内。马边黄家坪磷矿相关沉积相的划分及其特征如表 1 所示。

2.2.1 潮下坪

平均低潮线以下至最低低潮线之间的地带, 长期处于水下。黄家坪磷矿潮下坪亚相为低能环境, 由于潮下坪与正常水下环境较难区分, 其海岸坡度小于 3° (金振奎等, 2013), 因此在此研究中, 未对其做进一步微相划分, 低能潮下坪的沉积特征包括: 岩性主要为深灰色中—厚层状含泥质细—粉晶白云岩, 局部可见磷质砂砾屑白云岩, 砂砾屑多杂乱分布, 无明显特征(图 3f), 多见薄层泥质条带, 条带内发育少量聚集状黄铁矿颗粒, 不显层理特征, 零星发育冲刷面(图 3e), 反映为水体相对较深的弱还原环境, 有间歇性水体注入, 也可将其称为开阔潮下沉积, 其上与筇竹寺组炭质泥岩呈突变接触。

2.2.2 潮间坪

处于平均高潮线与平均低潮线之间, 受海水涨潮和退潮影响, 基本处于淹没状态, 整体水动力条件较强, 属高能相带。该亚相带内可进一步划分出潮汐水道、潮间滩、潮间灰坪 3 个微相类型。

(1) 潮汐水道

可以延伸进入潮上带及潮下带, 但以潮间带最为发育, 多呈曲流河道状向海方向变深。岩性主要为砂砾屑磷块岩(图 3g)、含磷细晶白云岩, 底部多发育凹凸不平的冲刷面, 冲刷面之上为正粒序层理(图 3h、3i), 冲刷作用频繁, 单个沉积序列的厚度不大, 一般为 3~8 cm 不等, 砂砾屑多为棱角状、半棱角状的隐晶质磷屑, 部分砾屑呈直立状(图 3h), 指示尚未完全固结前受到强水流冲刷破碎迅速堆积

表 1 马边黄家坪磷矿区麦地坪组沉积相带划分简表

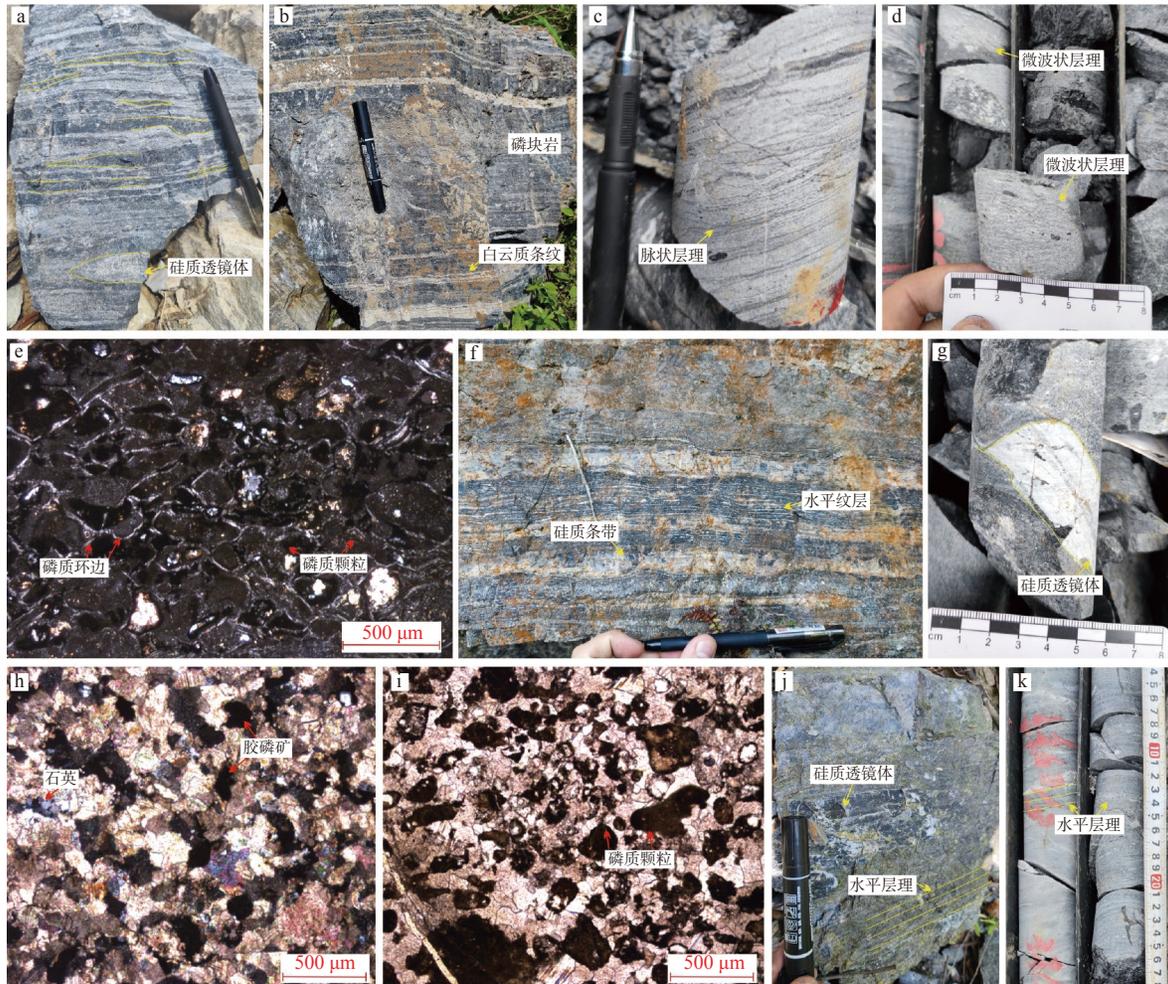
Table 1 Summary table of the sedimentary facies in the Maidiping formation in the Huangjiaping phosphate deposit, Mabian County

相	亚相	微相	水动力	岩性特征	层厚	沉积构造
潮上坪		潮上云坪	低能	细—粉晶白云岩	薄层	鸟眼构造 石膏溶孔
		潮上滩	间歇高能	砂砾屑白云岩 含磷砂砾屑白云岩	薄层	冲刷面 粒序层理
潮坪		潮汐水道	高能	砂砾屑磷块岩 含磷细晶白云岩	中—薄层	冲刷面 粒序层理
		潮间坪	高能	砂砾屑磷块岩 含磷砂屑白云岩	中—薄层	脉状层理 微波状层理 条带状构造
		潮间灰坪		瘤状灰岩 含磷细晶白云岩 硅质白云岩	薄—厚层	水平层理 偶见冲刷面
		潮下坪	低能潮下坪	低能	泥质白云岩 含泥质灰质白云岩	中—厚层

而成。磷质砾屑为原生磷质沉积物受到高能水体破碎,搬运再沉积的内碎屑产物,且大部分砾屑砾径较大和强烈下陷的侵蚀冲刷面亦说明其高能如潮道水流或风暴流的再改造作用(Pufahl and Groat, 2017; Zhang et al., 2019)。

(2) 潮间滩

岩性以砂屑磷块岩、含磷砂屑白云岩、磷质细晶白云岩为主,磷块岩内通常形成磷质砂屑条带与白云石条带互层,称条纹条带状构造,两者厚度比约为1:1~15:1,磷质条带多呈波状起伏的透镜体状向两侧逐渐尖灭或断续状分布,局部可夹少量硅质透镜体(图4a),磷质砂屑也见部分磷品位较高的



a—一条纹条带状磷块岩,夹硅质透镜体,磷块岩呈透镜状断续分布;b—致密块状砂砾屑磷块岩,夹少量白云质条纹;c—含磷白云岩,发育脉状层理;d—砂砾屑磷块岩,发育微波状层理;e—砂屑磷块岩,发育磷质鲕粒结构,磷质颗粒周缘发育磷质环边包壳,长轴方向具有一定定向性(+);f—硅质白云岩,发育硅质条带、水平纹层;g—含磷硅质白云岩,夹硅质透镜体;h—含磷细晶白云岩(+);i—磷质细晶白云岩,胶磷矿多为椭球型或不规则型砂屑(+);j—含磷硅质白云岩,夹硅质透镜体,具水平层理;k—含磷水云母黏土岩,具水平层理

图4 马边黄家坪磷矿下寒武统麦地坪组一段磷矿层沉积特征和显微结构特征

Fig. 4 Sedimentary features and microstructures of phosphate rocks in the first member of the lower Cambrian Maidiping formation in the Huangjiaping phosphate deposit, Mabian County

(a) Banded phosphorite, intercalated with siliceous lenticle, is intermittently distributed in a lenticular pattern; (b) Dense massive sand-gravel phosphorite interspersed with dolomite stripes; (c) Phosphorus-bearing dolomite with veined beddings; (d) Sand-gravel phosphorite with micro wavy beddings; (e) Arenite phosphorite, with phosphorus oolitic structure. Phosphorus crust is developed around the grain, with certain orientation along the long axis (+); (f) Siliceous dolomitite with siliceous bands and horizontal laminations; (g) Phosphorus-bearing siliceous dolomitite intercalated with siliceous lenticular; (h) Phosphorus-bearing fine-crystalline dolomite (+); (i) Phosphorous fine-crystalline dolomite, and collophanites are mostly ellipsoid or irregular arenes (+); (j) Phosphorus-bearing siliceous dolomitite intercalated with siliceous lenticular and horizontal beddings; (k) Phosphorus-bearing hydromica clay rock with horizontal beddings

层段夹极少量白云石薄纹层(图4b)。也见发育脉状层理(图4c), 微波状层理(图4d), 指示典型潮汐水流作用。白云岩-磷块岩韵律层受周期性洋流上涌影响, 磷质砂屑在搬运再沉积过程中, 水体环境的频繁变化, 加之受两者饱和度的差异影响进而产生沉积分异, 使磷质层内沉积白云石条带或纹层, 直到下一次周期性洋流来临, 又开始形成新的韵律层, 最后形成含白云质条带及纹层的砂屑磷块岩(骆学全, 1993; Vernhet and Reijmer, 2010)。

值得注意的是, 该砂屑磷块岩内发育磷质鲕粒结构, 磷质颗粒周缘普遍发育等厚纤维状磷质包壳(图4e), 为早成岩阶段粒间孔隙水中磷酸盐浓度过饱和的沉积产物, 代表海水潜流环境, 属第一世代胶结物; 后期粒间孔隙再次被微泥晶的磷质胶结物充填, 少量为白云石胶结物充填, 属第二代胶结物, 进而形成纤维状环边及泥晶孔隙充填的两期次复合结构, 成为品位较高的磷矿石(She et al., 2013; Pufahl and Groat, 2017; Yang et al., 2019; Zhang et al., 2019)。其磷质砂屑长轴方向具有一定的定向性, 分选性、磨圆度较好, 指示强水动力环境。

(3) 潮间灰坪

岩石类型主要为含磷细晶白云岩、瘤状灰岩, 夹少量硅质白云岩、水云母黏土岩, 水体环境相对低能。夹研层主要为含磷细晶白云岩、硅质白云岩及水云母黏土岩, 发育水平层理以及水平纹层(图4f、4g)。麦地坪组一段内岩性以白云岩为主, 目前常温常压通常难以形成大量的白云石沉积, 多为后期灰泥组分发生白云岩化而成。研究区内白云石晶体多呈半自形-它形粒状(图4h、4i), 晶体的自形程度偏低, 晶粒多为粉晶-细晶, 粒度多在0.06~0.25 mm, 且孔隙度较低, 也见呈细分散状或细小团状的炭质物及黏土不均匀分布, 且沉积环境处于潮间带下部-潮下带环境, 该特征较为符合渗透回流白云岩化模式(邹佐元等, 2020)。同时, 受到潮汐水流的影响, 在潮汐期白云石以胶结物形式沉淀下来, 静水期则发育硅质白云岩夹层(图4j), 以此形成硅质与白云质互层(刘建清等, 2022)。此次暂将水云母黏土岩层一并划分至潮间灰坪内, 因其以薄层状黏土沉积为主, 基本不含陆源石英颗粒, 含炭质碎屑物(图4k, 图5a), 与硅质白云岩层相伴生, 属低能还原水体, 为海平面相对上升过程中黏土矿物的大量注入, 在海进-海退序列深水环境下的产物(王登芳和戴灿发, 1995)。

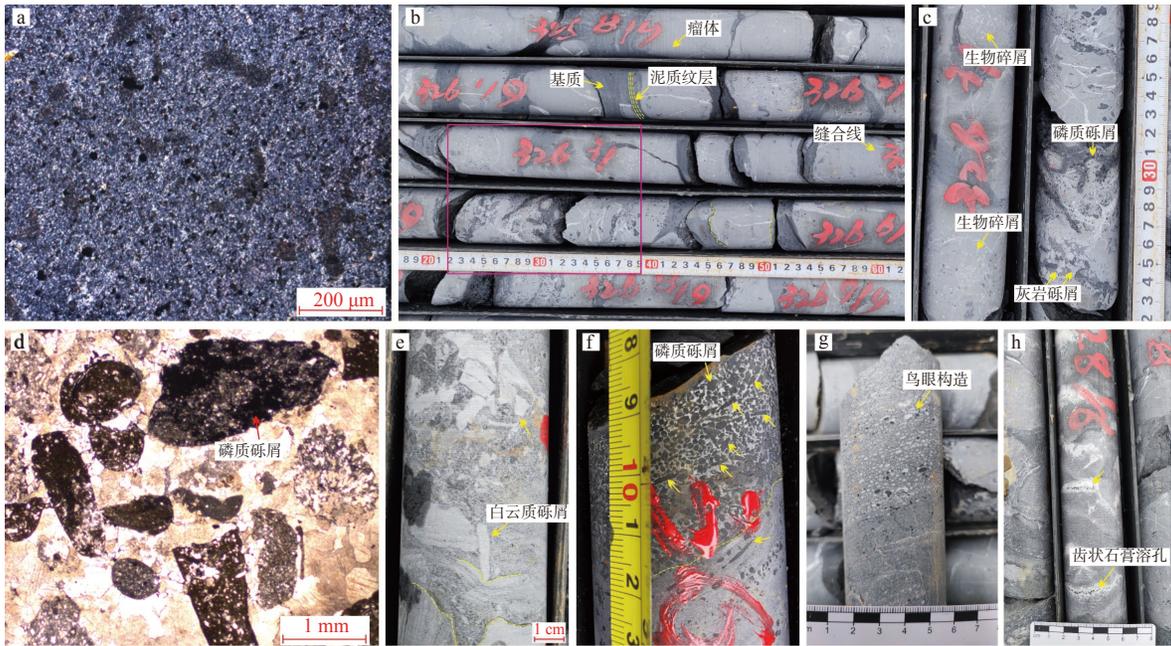
麦地坪组二段内潮间灰坪以沉积瘤状灰岩为特征, 瘤体多呈不规则的扁豆状或瘤状, 无内部结构, 瘤体内含较多瓣鳃类生物碎屑及磷质砾屑, 在其边缘部分可见明显的溶蚀痕迹, 发育缝合线构造, 有时瘤体呈塑性变形拉长特征(图5b); 基质为泥质成分, 多绕过瘤体分布, 未见生物碎屑, 可见明显的弯曲变形泥质纹层、泥质流动构造以及裂隙充填构造(图5b), 表明其由受重力作用影响快速沉积的泥质物处于半流动状态所形成。麦地坪组整体沉积于潮坪相, 基本处于浅海环境中。这些瓣鳃类生物碎屑也属近岸浅海的生物, 普遍存在于瘤体内(图5c), 含生物碎屑的瘤体很可能是浅水沉积的含生物碎屑灰岩原地改造而成, 同时瘤体边缘的灰岩内碎屑呈棱角状, 大都连接在一起, 表明两者具有一定的拼合性(图5c), 也反映出高能水体的原地改造作用。这些特征共同指示该瘤状灰岩为相对较浅的水体中快速堆积、受重力作用发生挤压流动以及后期成岩溶解作用下形成(高计元, 1988)。其内零星可见破碎的灰岩内碎屑和磷质砾屑等, 有时砾屑可具定向性, 呈次棱角-次圆状, 发育冲刷面、正粒序层理, 指示间歇性受风暴水流冲刷作用, 其水体能量较麦地坪组一段内潮间灰坪能量更强。

2.2.3 潮上坪

属平均高潮线与最大高潮线之间的区域, 最大高潮线通常为风暴潮所致, 因此该带长期处于暴露特征。可进一步识别出潮上滩和潮上云坪2个微相类型。

(1) 潮上滩

潮上滩为风暴等强水流间歇性将颗粒沉积物搬运至潮上坪沉积而成。岩石类型主要为砂砾屑白云岩、含磷质砾屑细晶白云岩(图5d), 粒度相对较大, 沉积厚度普遍为薄层状, 多为5~25 cm不等, 发育底冲刷面。可见白云质砾屑层底面与正常细晶白云层呈突变接触(图5e), 砾屑多为受强水流搅动原地破碎而成的内碎屑, 无分选和磨圆, 部分长条状砾屑呈直立状陷入先期沉积物内, 表明随着风暴潮能量衰减继而形成大量快速堆积; 有时为含磷质砾屑层与白云岩层突变接触, 具明显的底冲刷侵蚀面(图5f), 板片状砾屑长轴方向具定向排列特征, 多为平行于层面, 具有一定的分选性和磨圆, 整体泥质含量较少, 填隙物多为亮晶方解石充填, 反映受风暴浪和潮汐水流的共同作用(胡明毅和贺萍, 2002)。



a—黏土岩, 具泥状结构(+); b—瘤状灰岩, 瘤体内含较多生物碎屑及磷质砾屑, 瘤体边缘有明显的溶蚀痕迹, 基质为泥质; c—瘤状灰岩(图5b中方框放大); d—含磷屑细晶白云岩, 见部分胶磷矿砾屑包裹细小白云石、石英颗粒(+); e—含磷屑砾屑白云岩, 可见棒状砾屑直立分布; f—含磷质砾屑细晶白云岩, 砾屑具定向性; g—细-粉晶白云岩, 发育鸟眼构造; h—含磷屑白云岩, 发育齿状石膏溶孔

图5 马边黄家坪磷矿下寒武统麦地坪组二段沉积构造和显微镜下特征

Fig. 5 Sedimentary characteristics and microscopic characteristics of the second member of the lower Cambrian Maidiping formation in the Huangjiaping phosphate deposit of Mabian County

(a) Clay rock with muddy texture (+); (b) Nodular limestone with bioclasts and phosphorous gravels in the tumour-body and obvious corrosion traces at the edge of the tumour-body, and the matrix is argillaceous; (c) Nodular limestone (enlarged by the box in Fig 5b); (d) Phosphorus-bearing fine-crystalline dolomites with some collophanite gravels wrapped with fine dolomite and quartz particles (+); (e) Phosphorus-bearing dolomites with rodlike grain vertical distributed; (f) Phosphorus-bearing fine-crystalline dolomites with orientation; (g) Fine-powder crystalline dolomites with bird's eye structure; (h) Phosphorus-bearing dolomite with dentoid gypsum dissolution pores

(2) 潮上云坪

岩石类型以薄—中层状细—粉晶白云岩为主, 偶夹含磷砂砾屑白云岩, 普遍发育鸟眼构造(图5g)、齿状石膏溶孔(图5h), 石膏晶粒间被暗色泥质或有机质等充填, 可见部分透镜状石膏条带及缝合线构造, 基本没有生物扰动, 属典型的潮上蒸发暴露特征。且黏土含量相对较高, 隐约保留原始的微细水平层理, 属蒸发泵白云石化模式形成的白云岩(金振奎等, 2013; 邹佐元等, 2020)。

3 讨论

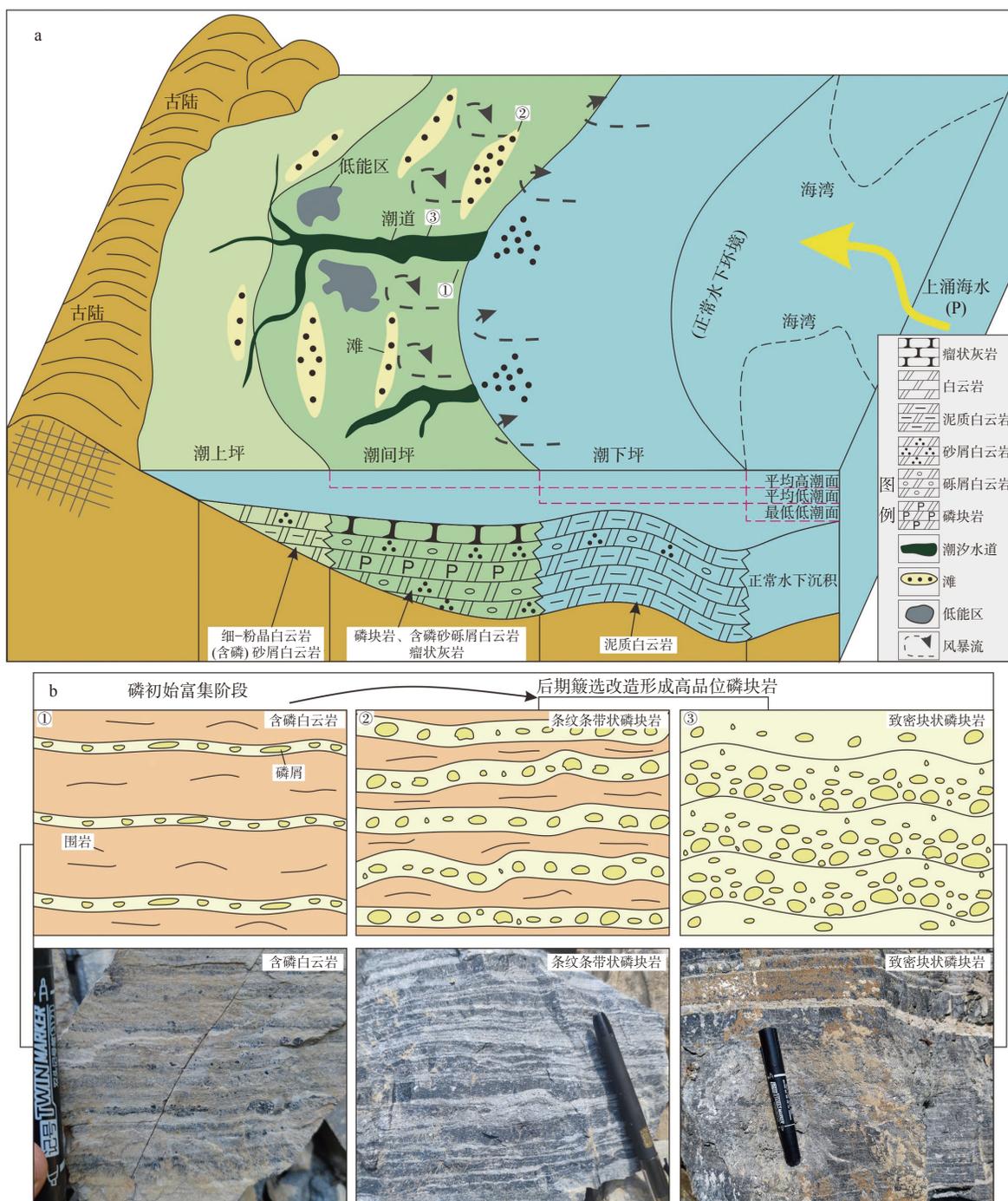
3.1 沉积演化及模式

早震旦世末期, 扬子板块西缘发生大规模海退—海侵旋回, 整体进入碳酸盐岩台地发育期, 灯影末期沉积大量含硅质条带或团块微晶白云岩, 早寒武世麦地坪组便是基于该古地貌格局, 伴随区域性的

海侵背景, 表现为碳酸盐岩潮坪沉积(牟传龙等, 2012; 李皎和何登发, 2014; 周慧等, 2015)。结合马边黄家坪地区麦地坪组沉积相及沉积微相的典型特征描述, 建立了麦地坪组潮坪沉积模式图(图6a), 麦地坪组以潮间坪沉积为主, 中上部发育少量潮上坪及潮下坪沉积, 垂向上表现为海退—海侵的沉积旋回特征, 磷矿层沉积于潮间坪高能相带内。

(1) 麦地坪组一段

沉积初期, 底部岩性主要为薄层状含磷粉—细晶白云岩, 零星含有磷质砂屑, 见少量硅质及磷质薄纹层分布, 反映沉积水体相对较深, 属灯影组四段深水潮下沉积的延续, 沉积厚度普遍较薄。上伏磷矿层沉积大致可划分为3个阶段: ①下部的磷块岩、含磷砂砾屑白云岩(即下矿层), 磷品位普遍高于上磷矿层(图2), 偶见泥质粉砂岩条带, 冲刷作用频繁, 微波状层理、脉状层理发育, 表明其受潮汐水流作用的改造, 该沉积时期, 水动力条件显著增强,



a—麦地坪组沉积模式图；b—磷块岩富集模式图(①、②、③分别对应图 6a 中位置；①为磷初始富集阶段，受间歇性水流冲刷，形成少量纹层状或条带状含磷沉积物，②、③为后期受强水流冲刷、簸选作用，分别形成高品位条纹条带状磷块岩或致密块状磷块岩)

图 6 马边黄家坪磷矿下寒武统麦地坪组磷成矿模式图

Fig. 6 Phosphorus mineralization model of the lower Cambrian Maidiping formation in the Huangjiaping phosphate deposit, Mabian County (a) Sedimentary model of the Maidiping formation; (b) Enrichment model of phosphorite, and ①, ② and ③ correspond to the positions in Fig. 6a respectively. ① represents the initial phosphorite enrichment stage, in which a small amount of laminar or banded phosphorus sediments were formed by the intermittent water scouring; ② and ③ are the later stages, where high-grade striped or dense massive phosphorites were formed under the action of scouring and winnowing, respectively.

相对海平面有所下降，属于潮间坪内潮间滩和潮汐水道沉积微相的组合；②中部为含磷细晶白云岩、

硅质白云岩夹水云母黏土岩(即夹矸层)，发育水平层理、硅质与白云质纹层，偶见硅质透镜体及磷质

薄纹层,表明水动力条件较弱,该沉积阶段相对海平面存在短期的波动加深,为潮间坪内的潮间灰坪微相;③上部为磷块岩、含磷砂砾屑白云岩(即上矿层),该带内磷质条带多呈波状起伏的透镜体状向两侧断续状分布,条纹条带状构造较为发育,少数为致密块状,冲刷作用相对较弱,整体水动力条件较中部的夹研层明显增强,相对海平面显著降低,属于潮间坪上部的潮间滩微相沉积。

(2) 麦地坪组二段

该时期基本上结束了磷块岩的沉积,根据其沉积特征,也可划分为3个阶段:①下部岩性以细-粉晶白云岩夹砂砾屑白云岩、含磷质砂砾屑细晶白云岩为主,发育鸟眼构造、齿状石膏溶孔等潮上蒸发暴露特征构造,且泥质含量相对较高,间歇性受到风暴等强水流作用发育底冲刷面、粒序层理等,向上磷屑含量显著减少,该阶段相对海平面持续下降以致出现潮上暴露沉积特征,属于潮上坪内的潮上云坪和潮上滩沉积微相的组合,至瘤状灰岩沉积前显示出大区域的海退沉积旋回;②中部以沉积大套瘤状灰岩为特征,前已述及,属相对浅水快速沉积,发育冲刷面、正粒序层理特征等,指示间歇性地段受到风暴水流冲刷作用,相对海平面已逐渐加深,属潮间灰坪沉积,但其水体能量中等,较麦地坪组一段内潮间灰坪能量更强;③顶部岩性主要为含泥质细-粉晶白云岩夹薄层泥质条带,条带内见少量聚集状黄铁矿集合体,零星发育冲刷面及磷质砾屑层,表明水动力条件低能,相对海平面已显著升高,对应低能潮下坪沉积。

3.2 成磷模式分析

通过对马边黄家坪地区麦地坪组沉积相演化和磷块岩特征分析,马边地区品位较高的磷块岩形成主要包括2个阶段:受生物-化学作用富集沉淀原生磷酸盐沉积物、强水动力沉积相带内机械簸选富集成矿(图6b)。

早寒武世麦地坪组沉积期,上扬子西缘地区受到周缘古岛链及纵贯南北方向的深大断裂所围限,上扬子地台内部形成多个隆起和断陷带,断陷带内发育多个利于磷沉积的大型成磷盆地,构成了近南北向展布的川滇磷成矿带(戈宏儒等,1983;韩豫川等,2012)。马边地区磷矿在东西方向上分别受峨眉-金阳、甘洛-宁南古断裂构造控制,仅南东方向与广海相通,其处于特定的古地理成矿环境-古隆起一侧的海湾潮坪环境,加之盆地内部存在次级

隆起-坳陷造成古地貌差异而形成潮下浅滩、潮下海湾及潮间坪环境,正是适宜磷块岩的堆积成矿场所(肖武权,1992;邓小林等,2009;韩豫川等,2012)。

形成大量磷块岩沉积,磷质来源问题显得尤为重要。早寒武世,伴随罗迪尼亚超大陆裂解和全球性冰川作用,化学风化速率和大陆风化作用的急剧增强将地球系统推向一个新时期,进一步加剧磷、铁、锰等矿产在岩石圈沉积,这一时期陆源风化作用产生的碎屑物不断运移至海水,提供丰富的磷成矿物质,使广海中磷酸盐浓度达到较高水平(Shields,2007;Zhang et al.,2021)。Sato et al.(2014)指出早寒武世沿康滇裂谷西缘分布大量磷含量普遍较高的碱性火成岩体,受风化侵蚀作用向裂谷盆地提供大量的磷,而裂谷盆地发育多个小规模近岸局限海湾避免来自广海海水的稀释作用,可能进一步为川滇地区磷的高浓度富集发挥重要作用。

显生宙磷块岩的富集主要受海洋上升洋流的影响(Papineau,2010),而在华南早寒武世同样发现上升流的证据,沉积磷块岩中无机碳同位素($\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$)普遍偏负,认为是上升洋流携带富 ^{12}C 海水进入浅水地带进而造成负偏(Jin et al.,2020;Liu et al.,2020)。在成矿期间,上扬子地区所处的中低纬度上升洋流十分活跃,当上升洋流将深部富磷海水沿大洋边缘带入浅水区适当的位置,磷质在化学和生物作用下发生滞留,一方面磷等营养元素的增加为大洋藻类微生物繁衍提供有利条件,生物不断繁盛,其降解作用会持续释放磷酸盐,生物也会对海水中的磷质黏结、富集形成大量磷酸盐沉淀;另一方面由于流速、温度、压力的变化,化学作用也使磷以胶体-化学形式发生凝聚富集,后经早期成岩作用形成半固结-弱固结的磷酸盐沉积物(杨卫东和曾允孚,1990;肖武权,1992;蒲心纯等,1993;东野脉兴,2001;Creveling et al.,2014;Pufahl and Groata,2017;杨海英等,2020;米云川等,2021)。但麦地坪组一段沉积初期整体处于潮间带下部较低能环境,受间歇性强水流冲刷作用,因此多形成少量纹层状或条带状磷质沉积物,未达工业品位(图6b-①)。

通过成磷事件所形成的富磷沉积物,其磷的品位普遍较低,所含的胶磷矿物多呈分散状散布于沉积物内,远达不到工业开采价值,一般需要经过后期一定水动力条件改造后再沉积作用才能达到工业开采品位。相较于沉积物中的硅质碎屑及砂泥质颗粒($1.5\sim 2.5\text{ g/cm}^3$),磷灰石颗粒的比重通常

更大(2.9 g/cm³), 强水流的冲蚀作用可将陆源碎屑颗粒除去而保留下磷灰石颗粒, 也因此机械簸选作用被认为是磷质颗粒再富集形成高品位磷矿的重要形式(Filippelli, 2008; Pufahl and Groat, 2017)。麦地坪组一段内上、下矿层沉积期, 相对海平面变化形成一定的高能条件, 属潮间坪内的潮间滩和潮汐水道沉积, 这些弱固结一半固结的磷酸盐沉积物受潮汐、风暴浪、波浪作用等改造, 遭受潮汐水流等冲刷、破碎、搬运、簸选, 形成磷质内碎屑颗粒, 经短距离的搬运后再次沉淀下来, 形成高品位条纹条带状磷块岩或致密块状磷块岩(图 6b-②、6b-③)。至成岩作用阶段, 在成岩早期粒间孔隙水中磷酸盐浓度过饱和, 磷质颗粒周缘发育等厚纤维状磷质包壳, 属第一世代胶结物; 成岩晚期剩余粒间孔隙再次被泥晶磷质胶结物或白云石胶结物充填, 属第二世代胶结物, 即形成再造的品位较高的磷块岩(Shen et al., 2013; Yang et al., 2019; Zhang et al., 2019; 杨海英等, 2020)。

3.3 沉积相控矿因素

马边黄家坪地区磷矿层中磷块岩以内碎屑(砂屑占多数, 少数砾屑)结构为主, 其次为少量泥晶结构磷块岩, 且内碎屑颗粒含量越多, 磷品位往往也越高。磷块岩的富集程度严格受沉积相的控制, 在纵向演化上出现于深水潮下向潮上坪过渡的海退时期, 基本位于潮间坪相带, 上、下磷矿层往往位于相对海平面短暂升高后的相对海平面降低时期, 这与王登芳等(2016)认为云贵地区寒武系底部的富磷层位发育在海侵序列晚期相一致, 但不同沉积相带内磷含量存在显著差异。

潮间坪内潮间滩和潮汐水道沉积环境中, 水动力条件较强, 岩性以磷块岩、含磷砂砾屑白云岩为主, 砂砾屑颗粒呈棱角状一次圆状, 部分达圆状, 颗粒形态也表明在尚未固结石化前受冲刷破碎原地或异地堆积胶结而成, 发育微波状层理、脉状层理、平行层理、冲刷面构造、粒序层理等浅水高能沉积构造, 高能水流易去除掉颗粒间黏土质杂基等填隙物, 利于后期成岩过程中磷质胶结物富集。尤其下矿层冲刷作用较频繁, 多发育潮汐水道, 胶磷矿颗粒更为富集, 矿层厚度较为稳定, 磷块岩多呈致密块状构造, 夹部分条纹条带状构造; 而上磷矿层以潮间滩环境为主, 磷块岩多发育条纹条带状构造, 少数为致密块状, 冲刷作用相对减弱, 矿层厚度不稳定且偏小, 因此下矿层磷品位显著高于上矿层

(图 2)。

而潮间灰坪、潮上云坪、低能潮下坪等相对低能沉积微相内, 通常难以形成磷块岩, 多沉积含少量磷质砂砾屑细晶白云岩、硅质白云岩、瘤状灰岩等, 含泥质较高, 水动力条件普遍较低, 很大程度影响磷质颗粒富集。该相带普遍处于安静水体, 又属潮坪环境中, 气候环境较为干旱, 在海水、淡水的共同作用下, 沉积云泥、灰泥、硅质组分, 灰泥组分在后期成岩作用阶段易发生白云石化, 因此多形成白云岩(刘建清等, 2022)。间歇性受风暴潮或潮汐水流共同作用, 零星夹含磷质砾屑薄层或纹层, 但难以达到工业品位。

4 结论

(1) 马边黄家坪地区下寒武统麦地坪组发育碳酸盐岩潮坪相沉积, 可识别出潮上坪、潮间坪和潮下坪 3 个亚相共计 6 种微相类型: 潮上坪包括潮上滩和潮上云坪微相; 潮间坪包括潮汐水道、潮间滩、潮间灰坪; 潮下坪仅发育低能潮下坪, 垂向上表现出海退-海侵的沉积演化序列。

(2) 砂砾屑磷块岩是马边地区发育较为广泛的磷块岩类型, 磷块岩富集程度严格受沉积相带控制, 潮间坪内高能水动力潮间滩和潮汐水道是最有利于磷块岩形成的微相环境。下矿层磷块岩多发育致密块状构造, 上矿层多发育条纹条带状构造, 且下矿层相较于上矿层多发育潮汐水道, 冲刷作用更为频繁, 因此下矿层磷的品位及厚度显著高于上矿层。

(3) 磷矿床的成矿模式为上升洋流将富磷海水带入到海湾潮坪环境内, 受生物-化学作用使磷以胶体-化学的形式发生凝聚富集, 形成半固结-弱固结的磷酸盐沉积物, 后遭受水流的冲刷、破碎、搬运、簸选再次发生沉淀, 至成岩作用阶段, 磷质颗粒间可形成多世代的磷质胶结物, 经压实、固结即形成再造的品位较高的磷块岩。

致谢: 论文写作过程中得到成都理工大学张鹏飞博士的悉心指正, 审稿人对文章提出了宝贵意见, 在此一并致谢。

References

- CHEN Z M, CHEN Q Y, 1987. Paleogeography of Yangzi platform and the characteristics of the phosphorite distribution of early Meishucun stage, early Cambrian[J]. *Scientia Geologica Sinica*(3): 246-257. (in Chinese with English abstract)

- CREVELING J R, JOHNSTON D T, POULTON S W, et al., 2014. Phosphorus sources for phosphatic Cambrian carbonates[J]. *GSA Bulletin*, 126(1-2): 145-163.
- DENG X L, YAO C M, WANG J P, et al., 2009. Mineralized regularity of phosphorite in the Yangtze area[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 31(1): 1-12. (in Chinese with English abstract)
- DONGYE M X, 2001. Regional ore-forming regulation of phosphorite in Yangtze massif in the times of Doushantuo and Meishucunages[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 23(4): 193-209. (in Chinese with English abstract)
- FILIPPELLI G M, 2008. The global phosphorus cycle: past, present, and future[J]. *Elements*, 4(2): 89-95.
- GAO J Y, 1988. Origin of nodular limestone in Devonian system in South China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 6(2): 77-86. (in Chinese with English abstract)
- GE H R, LUO C S, LI J, 1983. Phosphorite sedimentary environment of Meishucun age, Early Cambrian, and condition of phosphorous accumulation in eastern Yunnan[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 3(3): 11-20. (in Chinese with English abstract)
- GUAN S W, WU L, REN R, et al., 2017. Distribution and petroleum prospect of Precambrian rifts in the main cratons, China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 38(1): 9-22. (in Chinese with English abstract)
- HAN Y C, XIA X H, XIAO R G, et al., 2012. Phosphate rock in China[M]. Beijing: Geology Press: 1-649. (in Chinese)
- HU M Y, HE P, 2002. The study of tidal storm deposits and its research significance[J]. *Advance in Earth Sciences*, 17(3): 391-395. (in Chinese with English abstract)
- JIN C S, LI C, ALGEO T J, et al., 2020. Controls on organic matter accumulation on the early-Cambrian western Yangtze Platform, South China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 111: 75-87.
- JIN Z K, SHI L, GAO B S, et al., 2013. Carbonate facies and facies models[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 31(6): 965-979. (in Chinese with English abstract)
- LI J, HE D F, 2014. Palaeogeography and tectonic-depositional environment evolution of the Cambrian in Sichuan Basin and adjacent areas[J]. *Journal of Palaeogeography*, 16(4): 441-460. (in Chinese with English abstract)
- LIU D, FAN Q G, PAPINEAU D, et al., 2020. Precipitation of protodolomite facilitated by sulfate-reducing bacteria: the role of capsule extracellular polymeric substances[J]. *Chemical Geology*, 533: 119415.
- LIU F L, HUANG J F, YANG Z Q, 1985. Characteristics of phosphorites in the early Meishucunstage (early Cambrian) in western Sichuan and their depositional and diagenetic environments[J]. *Geological Review*, 31(2): 149-157. (in Chinese with English abstract)
- LIU J Q, HE L, JIANG Y F, et al., 2022. Phosphorus-bearing strata in Maidiping Formation of the Lower Cambrian in Leibo area of Sichuan province and its potential of phosphate resources[J]. *Geology in China*, 49(6): 1908-1922. (in Chinese with English abstract)
- LIU S G, LIU S, SUN W, et al., 2018. Tectonic and sedimentary features of the northern Mianyang-Changning intracratonic sag, Sichuan, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 45(1): 1-13. (in Chinese with English abstract)
- LUO X Q, 1993. Sedimentary facies and model of the phosphorites in western Hunan[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 13(3): 33-39. (in Chinese with English abstract)
- MI Y C, HUANG T P, ZHOU Q, et al., 2021. The sedimentary environment and resource potential of the newly discovered Yangchang super-large phosphate deposit in the Zhenxiang area, Yunnan[J]. *Geology and Exploration*, 57(4): 808-824. (in Chinese with English abstract)
- MOU C L, LIANG W, ZHOU K K, et al., 2012. Sedimentary facies and palaeogeography of the middle-upper Yangtze area during the Early Cambrian (Terreneuvian-Series 2)[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 32(3): 41-53. (in Chinese with English abstract)
- PAPINEAU D, 2010. Global biogeochemical changes at both ends of the Proterozoic: insights from phosphorites[J]. *Astrobiology*, 10(2): 165-181.
- PU X C, ZHOU H D, WANG X L, et al., 1993. Cambrian lithofacies paleogeography and mineralization in South China[M]. Beijing: Geology Press: 1-191. (in Chinese)
- PUFAHL P K, GROAT L A, 2017. Sedimentary and igneous phosphate deposits: formation and exploration: an invited paper[J]. *Economic Geology*, 112(3): 483-516.
- SATO T, ISOZAKI Y, HITACHI T, et al., 2014. A unique condition for early diversification of small shelly fossils in the lowermost Cambrian in Chengjiang, South China: enrichment of phosphorus in restricted embayments[J]. *Gondwana Research*, 25(3): 1139-1152.
- SHE Z B, STROTHER P, MCMAHON G, et al., 2013. Terminal Proterozoic cyanobacterial blooms and phosphogenesis documented by the Doushantuo granular phosphorites I: *In situ* micro-analysis of textures and composition[J]. *Precambrian Research*, 235: 20-35.
- SHIELDS G A, 2007. A normalised seawater strontium isotope curve: possible implications for Neoproterozoic-Cambrian weathering rates and the further oxygenation of the Earth[J]. *eEarth*, 2(2): 35-42.
- Sinian Sub-Boundary Group, Chengdu Institute of Geology, 1979. Division of Sinian and Sinian-Cambrian boundary in Gaoqiao, Emei, Sichuan[J]. *Journal of Chengdu Institute of Geology*(1): 73-91. (in Chinese)
- VERNHET E, REIJMER J J G, 2010. Sedimentary evolution of the Ediacaran Yangtze platform shelf (Hubei and Hunan provinces, Central China)[J]. *Sedimentary Geology*, 225(3-4): 99-115.
- WANG D F, DAI C F, 1995. Research on genesis of Bainiceng claystone in Kunyang phosphate ore deposit, Yunnan province[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 15(3): 16-23. (in Chinese with English abstract)
- WANG D F, MAO T, CHEN Rong, 2016. Sediment characteristics of the Lower Cambrian phosphorus rock and comparison of mineral phase in Guizhou and Yunnan provinces[J]. *Science Technology and Engineering*, 16(8): 42-48. (in Chinese with English abstract)
- WANG J, LI Z X, 2003. History of Neoproterozoic rift basins in South China: implications for Rodinia break-up[J]. *Precambrian Research*, 122(1-4): 141-158.
- WANG Z C, JIANG H, WANG T S, et al., 2014. Paleo-geomorphology formed during Tongwan tectonization in Sichuan Basin and its significance for hydrocarbon accumulation[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 41(3): 305-312. (in Chinese with English abstract)
- XIAO W Q, 1992. Conditions of the depositional medium of the Laoheba phosphorite deposit, Mabian, Sichuan[J]. *Journal of Xiangtan Mining Institute*, 7(2): 133-139. (in Chinese with English abstract)
- XING F C, HOU M C, LIN L B, et al., 2015. The records and its dynamic genesis discussion of tectonic movement during the Late Sinian and the Early Cambrian of Sichuan Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 22(1): 115-125. (in Chinese with English abstract)
- YANG H Y, XIAO J F, XIA Y, et al., 2019. Origin of the Ediacaran Weng'an and Kaiyang phosphorite deposits in the Nanhua basin, SW China[J].

- Journal of Asian Earth Sciences*, 182: 103931.
- YANG H Y, XIAO J F, HU R Z, et al., 2020. Formation environment and metallogenic mechanism of Weng'an phosphorite in the Early Sinian, Central Guizhou Province[J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 22(5): 929-946. (in Chinese with English abstract)
- YANG W D, ZENG Y F, 1990. Systematic research on the origin of the phosphorites of Doushantuo Stage central Guizhou, China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 8(3): 84-92. (in Chinese with English abstract)
- YANG Y C, PENG X H, ZHANG J, et al., 2019. Sedimentary characteristics and phosphorite mineralization model of Maidiping Formation in Mabian area, Sichuan[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 35(1): 29-36. (in Chinese with English abstract)
- ZENG Y F, YANG W D, 1987. Mechanism of enrichment of Kunyang and Haikou phosphorite deposits, Yunnan China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 5(3): 19-27. (in Chinese with English abstract)
- ZENG Y F, SHEN L J, HE T G, et al., 1994. Preliminary analysis of the outcrop sequence stratigraphy for phosphatic series of Early Cambrian in eastern Yunnan[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 14(3): 43-53. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG J, ZHANG Y, YANG Y C, et al., 2018. Sedimentary characteristics and mineralization of the phosphorite deposits in the Leibo ore field, Sichuan[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 38(4): 76-84. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Q G, PENG X H, ZHU J H, 2019. Characteristics and activity of the Mabian-Leibo-Ebian-Jinyang major fault[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 39(1): 30-33. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Y G, PUFAHL P K, DU Y S, et al., 2019. Economic phosphorite from the Ediacaran Doushantuo Formation, South China, and the Neoproterozoic-Cambrian Phosphogenic Event[J]. *Sedimentary Geology*, 388: 1-19.
- ZHANG Z Y, JIANG Y H, NIU H C, et al., 2021. Enrichment of rare earth elements in the early Cambrian Zhijin phosphorite deposit, SW China: evidence from francolite micro-petrography and geochemistry[J]. *Orb Geology Reviews*, 138: 104342.
- ZHOU H, LI W, ZHANG B M, et al., 2015. Formation and evolution of Upper Sinian to Lower Cambrian intraplateformal basin in Sichuan Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 36(3): 310-323. (in Chinese with English abstract)
- ZOU Z Y, XIANG F, SHEN X, et al., 2020. Genesis and identification of dolomite under the control of sedimentary Facies zone[J]. *Science Technology and Engineering*, 20(15): 5887-5899. (in Chinese with English abstract)
- 附中文参考文献**
- 陈志明, 陈其英, 1987. 扬子地台早寒武世梅树村早期的古地理及其磷块岩展布特征[J]. *地质科学*, 3(3): 246-257.
- 成都地质学院震旦亚界专题组, 1979. 四川峨眉高桥震旦系及震旦系-寒武系界线划分[J]. *成都地质学院学报*, 1(1): 73-91.
- 邓小林, 姚超美, 王吉平, 等, 2009. 扬子地区磷矿成矿规律[J]. *化工矿产地质*, 31(1): 1-12.
- 东野脉兴, 2001. 扬子地块陡山沱期与梅树村期磷矿区域成矿规律[J]. *化工矿产地质*, 23(4): 193-209.
- 高计元, 1988. 中国南方泥盆系瘤状灰岩的成因[J]. *沉积学报*, 6(2): 77-86.
- 戈宏儒, 罗朝舜, 李季, 1983. 云南东部早寒武世梅树村期磷块岩沉积环境及聚磷条件[J]. *矿物岩石*, 3(3): 11-20.
- 管树巍, 吴林, 任荣, 等, 2017. 中国主要克拉通前寒武纪裂谷分布与油气勘探前景[J]. *石油学报*, 38(1): 9-22.
- 韩豫川, 夏学惠, 肖荣阁, 等, 2012. 中国磷矿床[M]. 北京: 地质出版社: 1-649.
- 胡明毅, 贺萍, 2002. 潮坪风暴沉积特征及其研究意义[J]. *地球科学进展*, 17(3): 391-395.
- 金振奎, 石良, 高白水, 等, 2013. 碳酸盐岩沉积相及相模式[J]. *沉积学报*, 31(6): 965-979.
- 李皎, 何登发, 2014. 四川盆地及邻区寒武纪古地理与构造-沉积环境演化[J]. *古地理学报*, 16(4): 441-460.
- 刘发禄, 黄菊芳, 杨振强, 1985. 川西早寒武世梅树村早期磷块岩特征及其沉积、成岩环境[J]. *地质论评*, 31(2): 149-157.
- 刘建清, 何利, 江永富, 等, 2022. 四川雷波地区下寒武统麦地坪含磷地层研究及磷矿资源潜力分析[J]. *中国地质*, 49(6): 1908-1922.
- 刘树根, 刘殊, 孙玮, 等, 2018. 绵阳-长宁拉张槽北段构造-沉积特征[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 45(1): 1-13.
- 骆学全, 1993. 湘西磷块岩的沉积相及沉积模式[J]. *岩相古地理*, 13(3): 33-39.
- 米云川, 黄太平, 周骞, 等, 2021. 云南镇雄地区新发现羊场超大型磷矿沉积环境及资源潜力分析[J]. *地质与勘探*, 57(4): 808-824.
- 牟传龙, 梁薇, 周恩恩, 等, 2012. 中上扬子地区早寒武世(纽芬兰世-第二世)岩相古地理[J]. *沉积与特提斯地质*, 32(3): 41-53.
- 蒲心纯, 周浩达, 王熙林, 等, 1993. 中国南方寒武纪岩相古地理与成矿作用[M]. 北京: 地质出版社: 1-191.
- 王登芳, 戴灿发, 1995. 昆阳磷矿床中白泥层粘土岩及成因分析[J]. *矿物岩石*, 15(3): 16-23.
- 王登芳, 毛铁, 陈蓉, 2016. 云南-贵州寒武系成磷期特征对比[J]. *科学技术与工程*, 16(8): 42-48.
- 汪洋成, 姜华, 王铜山, 等, 2014. 四川盆地桐湾期古地貌特征及成藏意义[J]. *石油勘探与开发*, 41(3): 305-312.
- 肖武权, 1992. 四川马边老河坝磷矿沉积介质条件[J]. *湘潭矿业学院学报*, 7(2): 133-139.
- 邢凤存, 侯明才, 林良彪, 等, 2015. 四川盆地晚震旦世-早寒武世构造运动记录及动力学成因讨论[J]. *地学前缘*, 22(1): 115-125.
- 杨海英, 肖加飞, 胡瑞忠, 等, 2020. 黔中瓮安早震旦世磷块岩的形成环境及成因机制[J]. *古地理学报*, 22(5): 929-946.
- 杨卫东, 曾允孚, 1990. 黔中陡山沱期磷块岩成因的系统研究[J]. *沉积学报*, 8(3): 84-92.
- 杨豫川, 彭向辉, 张君, 等, 2019. 四川马边麦地坪组磷矿沉积特征及其成矿模式[J]. *科技通报*, 35(1): 29-36.
- 曾允孚, 杨卫东, 1987. 云南昆阳、海口磷矿的富集机理[J]. *沉积学报*, 5(3): 19-27.
- 曾允孚, 沈丽娟, 何廷贵, 等, 1994. 滇东早寒武世含磷岩系层序地层分析[J]. *矿物岩石*, 14(3): 43-53.
- 张君, 张珂, 杨豫川, 等, 2018. 四川雷波矿集区磷矿沉积特征及成矿规律研究[J]. *沉积与特提斯地质*, 38(4): 76-84.
- 张芹贵, 彭向辉, 祝建华, 2019. 马边-雷波峨边-金阳大断裂构造特征及活动性[J]. *四川地质学报*, 39(1): 30-33.
- 周慧, 李伟, 张宝民, 等, 2015. 四川盆地震旦纪末期-寒武纪早期台盆的形成与演化[J]. *石油学报*, 36(3): 310-323.
- 邹佐元, 向芳, 沈昕, 等, 2020. 沉积相带控制下的白云岩成因模式及判别特征[J]. *科学技术与工程*, 20(15): 5887-5899.