

上扬子区西南部早寒武世梅树村期沉积环境演化及其对磷富集成矿的意义

何洪茜¹, 康逊¹, 李斌^{1*}, 门欣¹, 杨光亮², 黄凯²

1. 有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 地球科学与信息物理学院, 中南大学, 湖南长沙 410083

2. 中化地质矿山总局贵州地质勘查院, 贵州 贵阳 55000

摘要: 早寒武世梅树村期磷矿是埃迪卡拉纪-寒武纪转折期重要的成磷事件。研究寒武系梅树村组地层厚度分布、岩相时空变化及海水氧化还原状态, 对该时期成磷机制研究具有重要意义。本文实测 43 条剖面并整理大量露头及钻井资料, 开展岩矿学工作, 划分岩相类型, 结合微量元素地球化学指标, 识别出沉积相并刻画了其时空分布特征, 进而绘制了该时期岩相古地理图。梅树村期上扬子碳酸盐台地以潮坪沉积为主, 相带展布受 NNE 向裂陷槽控制显著, 槽内为潮间滩、潮下滩和潮下泥坪, 槽外为潮上滩和云坪等微相。梅树村期早期 Ce 负异常更显著, Y/Ho 值更高, Ni/Co-V/Cr 及 Mo_{EF}-U_{EF} 结果均指示氧化水体环境。梅树村期上扬子台地裂陷槽内的潮间-潮下高能带是磷质聚集的有利场所; 梅树村早期水体氧化程度较高, 为磷矿形成提供了有利条件。裂陷槽内高能氧化环境利于厚层磷块岩发育, 据此指出贵州毕节-云南镇雄、贵州威宁-云南鲁甸为潜在磷矿远景区。

关键词: 古地貌; 岩相古地理; 氧化还原条件; 磷矿; 梅树村组; 上扬子区西南部

中图分类号: P619 收稿日期: 202-5-08-25

Sedimentary environment evolution and phosphorus enrichment significance of the Early Cambrian Meishucunian in Southwestern Upper Yangtze

He Hongxi¹, Kang Xun¹, Li Bin^{1*}, Men Xin¹, Yang Guangliang², Huang Kai²

1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring (Ministry of Education), School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China

2. Guizhou Geological Prospecting Institute of China Chemical Geology and Mine Bureau, Guiyang 55000, Guizhou, China

Abstract: The phosphogenic event during the Meishucunian Age of the early Cambrian represents a significant phosphate mineralization episode in the Ediacaran-Cambrian transition. Investigating the stratigraphic thickness distribution, spatiotemporal lithofacies variations, and seawater redox conditions of the Cambrian Meishucun Formation is of great significance for understanding phosphogenesis mechanisms during this period. Based on 43 measured sections and a large amount of compiled outcrop and drilling data, this study classified lithofacies types and utilized geochemical proxies (e.g., trace elements) to identify sedimentary facies and characterize their spatiotemporal distribution. Two lithofacies-paleogeographic maps of the Meishucunian age were subsequently reconstructed. The facies distribution of the Meishucunian carbonate platform (Yangtze Block) was controlled by

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.42073001); 贵州省地质勘查专项资金项目 (No.2024013)

第一作者简介: 何洪茜 (1997-), 女, 1997 年出生, 博士研究生, 从事沉积矿产研究, E-mail: hehongxi9@163.com, ORCID: 0009-0001-8935-8476。

通讯作者: 李斌 (1985-), 男, 博士, 教授, 从事矿床地球化学与同位素地球化学研究, E-mail: cutelb@csu.edu.cn。

a NNE-oriented rift trough, leading to subtidal-intertidal shoals and mudflats within the trough and supratidal flats outside it. The early Meishucunian stage exhibited more pronounced negative Ce anomalies, higher Y/Ho ratios, and Ni/Co-V/Cr and $Mo_{EF}-U_{EF}$ proxy values collectively indicative of oxidizing conditions. The high-energy tidal flat environment in the study area during the Meishucunian stage facilitated phosphorus enrichment, with intertidal-subtidal high-energy zones predominantly distributed within the rift trough. The highly oxidizing water conditions in the early Meishucunian stage provided a favorable setting for phosphorite formation. The high-energy oxidizing environment within the rift trough facilitated the development of thick phosphorite layers, leading to the identification of two potential prospecting targets: Bijie (Guizhou)-Zhenxiong (Yunnan) and Weining (Guizhou)-Ludian (Yunnan).

Key words: Paleotopography; Lithofacies Paleogeography; Redox Conditions; Phosphorite; Meishucun Formation; Southwestern Upper Yangtze

0 引言

磷是生命起源与生物演化的关键元素,也是一种战略资源,具有广泛的工业价值(Pufahl and Groat, 2017; Ye et al., 2020; Cañadas et al., 2022)。磷块岩的形成与海洋初级生产力、海洋-大气系统的氧化程度和古地理环境都密切相关(Delaney, 1998; Pufahl and Groat, 2017)。地质历史时期最早的全球性大规模成磷作用出现在新元古代-寒武纪过渡期,并伴随了新元古代大氧化、“寒武纪生命大爆发”等重要地质事件(Cook and Shergold, 1984; Pufahl and Groat, 2017; 李婷婷等, 2023)。新元古代埃迪卡拉纪陡山沱期和早古生代寒武纪梅树村期也是我国工业磷矿床形成的主要时期,其资源储量占我国磷矿总储量的80%以上(Yang et al., 2021; Yu et al., 2023; 王莹和熊先孝, 2023)。其中早寒武世含磷岩系在华南扬子地台主要分布于川西、滇东和黔西北地区,地层层序完整(王莹和熊先孝, 2023)。滇中昆阳梅树村剖面因出露良好、地层序列连续,发育丰富的小壳化石,曾是全球新元古代-寒武纪界线层型剖面的主要候选剖面之一(Cowie, 1985; Zhu et al., 2009)。

上扬子区西南部梅树村期磷块岩为海相沉积型磷矿,可划分为新华式和昆阳式两种。新华式磷矿主要分布于贵州织金地区,以富含稀土元素为特征(Chen et al., 2013; Zhang et al., 2022; Xing et al., 2024)。昆阳式磷矿主要分布于云南镇雄地区和贵州威宁地区,矿层赋存于梅树村组中谊村段(米云川等, 2024; 杨海英等, 2025)。前人对寒武纪梅树村期含磷岩系的研究主要集中在成矿物质来源(Liu and Zhou, 2020; Zhang et al., 2020; 刘文杰等, 2024; 米云川等, 2024)、海水氧化还原条件(Wen et al., 2015; Fan et al., 2016; Liu and Zhou, 2020; Yang et al., 2021; Zhang et al., 2022; 蒋元等, 2025)、稀土元素来源及富集机制等(Zhang et al., 2021; Yang et al., 2022; Zhang et al., 2022; Xing et al., 2024; 杨海英等, 2025),相对缺乏将古构造、沉积相和古水体氧化还原条件整合的系统性分析,这些关键因素对该时期磷富集成矿的作用机制有待厘清。

前人综合利用剖面、测井和地震等资料已对四川盆地内埃迪卡拉纪灯影期和寒武纪梅树村期古地貌有了详细研究,结果表明灯影期至梅树村期四川盆地内存在近南北向的德阳-安岳裂陷槽,该裂陷槽控制了灯影组和麦地坪组地层的分布以及岩相的变化(李忠权等,2015;周进高等,2018;黎荣等,2023;张帅等,2025)。但对四川盆地以南地区,裂陷槽的发育和展布情况研究甚少。

本次研究在区内实测了 43 条剖面并收集了露头及钻井资料,对上扬子区西南部寒武系梅树村组沉积地层厚度、含磷岩系岩石学特征、沉积相、海水氧化还原条件以及磷矿层厚度分布规律进行了研究,以期恢复梅树村期古地貌、岩相古地理特征和海水氧化程度变化,阐明梅树村期的有利成磷环境,圈定研究区内磷成矿远景区。

1 区域地质背景

华南地块为我国三大前寒武纪地块之一(Zhang et al., 2004; Zhao and Cawood, 2012),由扬子地块和华夏地块在元古代晋宁运动时期碰撞形成(Li et al., 2008; Zhao et al., 2011),北以秦岭-大别-苏鲁造山带与华北地块相隔,西北以龙门山造山带为界与松潘-甘孜地块相邻,西南以哀牢山-马江造山带与印支地块相连接,东南方向紧邻太平洋(Zhao et al., 2011; Zhao and Cawood, 2012)。研究区在构造位置上处于上扬子地区西南部(图 1a, Li et al., 2008; Zhao and Cawood, 2012),区内构造以深大断裂为主,形成了滇东、黔中和雪峰隆起,川南、滇黔北、武陵、黔南和黔西南坳陷(图 1b, 付景龙等, 2016)。

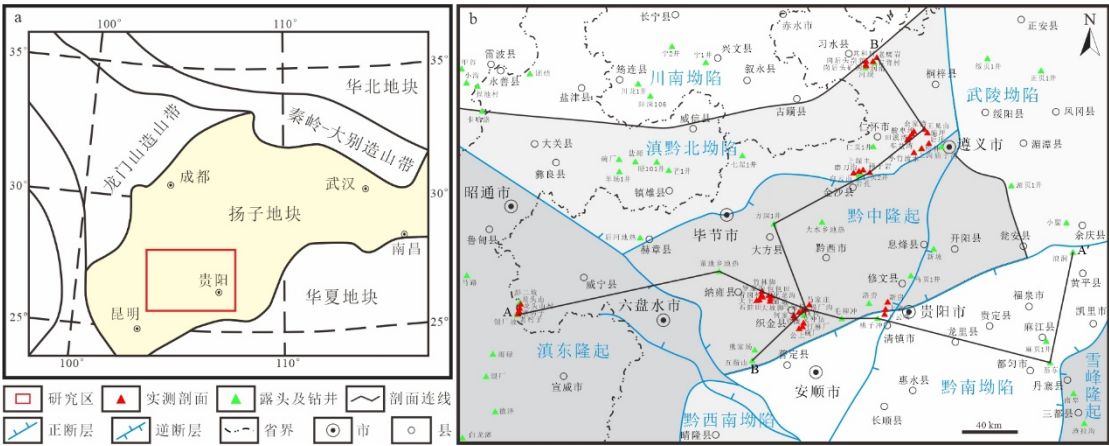


图 1 地质背景图(a. 研究区大地构造位置图, 据 Zhao and Cawood (2012)修改; b. 研究区构造单元图, 据付景龙等(2016)修改)

Fig.1 Geological background map (a. Tectonic location map of the study area, modified after Zhao and Cawood (2012); b. Tectonic units map of the study area, modified after Fu et al. (2016))

早寒武世沉积序列形成于埃迪卡拉纪灯影期海退后的海侵事件(Chen et al., 2013), 扬子地块自西北向东南沉积环境依次为台地、斜坡和盆地, 水体逐渐加深(Chen et al., 2013;

Wen et al., 2015; Zhang et al., 2022; Xing et al., 2024)。扬子地块上保存了较为完整的早寒武世地层序列，不同地区沉积相具有显著变化（Zhu et al., 2003; Steiner et al., 2007; Chen et al., 2013; Zhang et al., 2022）。研究区内的川西南麦地坪组、滇东北梅树村组和黔西北戈仲伍组为同期异相沉积（Ishikawa et al., 2008; Wen et al., 2015; Liu and Zhou, 2017），在后文中将统一称作梅树村组。

上扬子区西南部早寒武世含磷岩系主要为两种沉积组合（图 2）。一种是主要分布在滇东北地区的梅树村组，呈岩相组合差异显著的三个段，一段为以硅质白云岩为特征的局限潮下坪，二段为发育球粒磷块岩的潮间滩，三段为含磷质球粒白云岩潮下滩，水体由深至浅再变深（胡清华等, 2024; 米云川等, 2024; 杨海英等, 2025）；另一种主要在黔西北地区梅树村组，发育两个段，一段是生屑磷块岩发育的高能潮汐水道，二段为潮下滩，与滇东北地区相似，主要沉积含磷质球粒白云岩，为持续海侵过程（杨瑞东等, 2017; Xing et al., 2024; 蒋元等, 2025）。

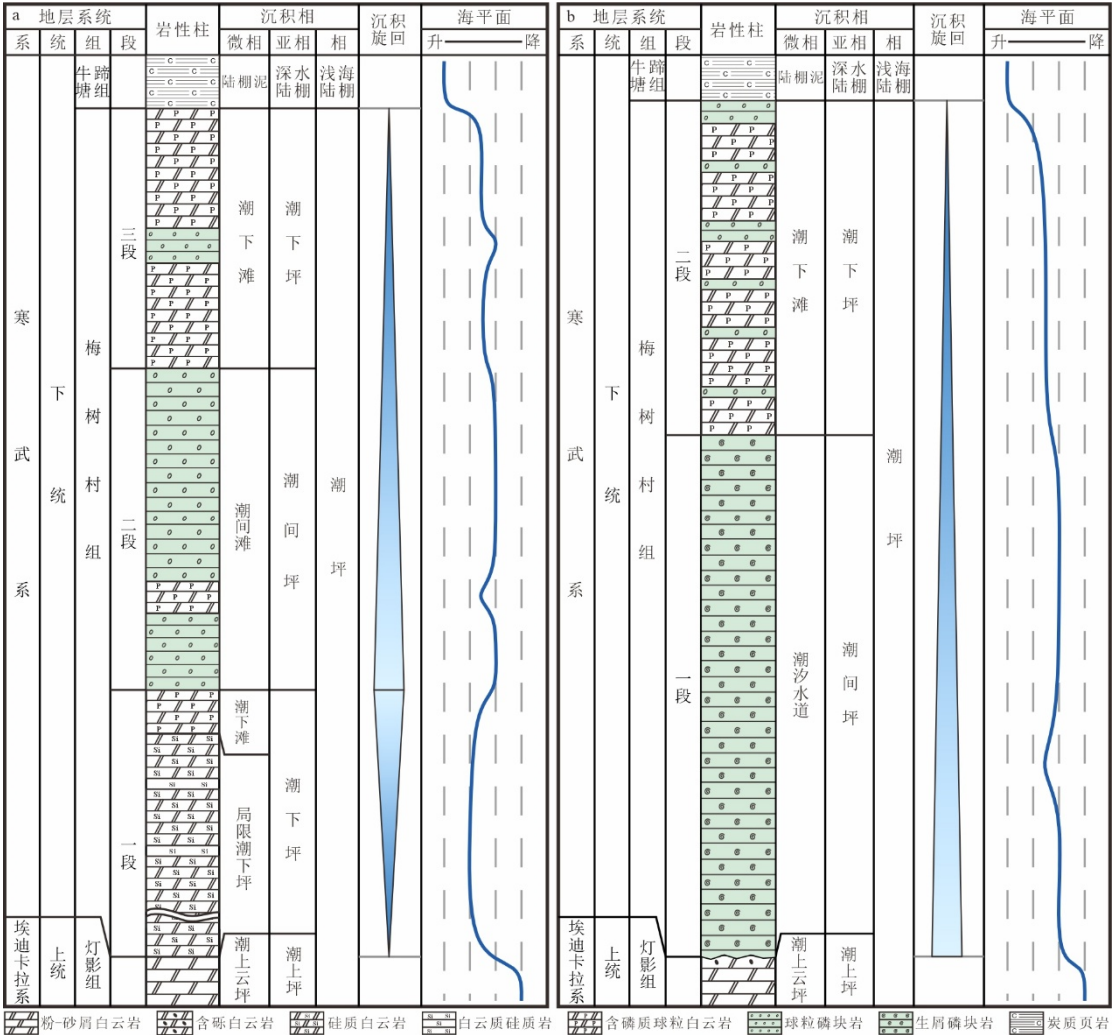


图 2 综合地层柱状图 (a. 滇东北镇雄地区梅树村组, 据米云川等(2024)修改; b. 黔西北织金地区梅树村组)

Fig.2 Composite stratigraphic column (a. Meishucun Formation in Zhenxiong area, northeastern Yunnan, modified after Mi et al. (2024); b. Meishucun Formation in Zhijin area, northwestern Guizhou)

2 分析方法

2.1 等厚图的制作

利用本次实测的 43 个剖面 and 收集整理的 56 处露头 and 21 口钻井资料, 统计了寒武系梅树村组沉积地层厚度和磷矿层厚度, 使用 Surfer 软件绘制了梅树村组地层及磷矿层等厚图。

2.2 岩相图的制作

整合了实测剖面 and 前人在研究区发表的岩性和沉积特征资料, 对上扬子区西南部梅树村期的沉积相进行了细致分析。采用冯增昭提出的单因素分析-多因素综合作图法 (冯增昭, 2004), 基于优势相原则并结合区域古地理背景, 系统编制了研究区寒武纪梅树村早期和晚期的岩相古地理图。

2.3 主量和微量元素

全岩主量和全岩微量实验在南京聚谱有限公司完成。首先称取 40 毫克全岩粉末置于聚四氟乙烯溶样弹中, 加入 0.5ml 浓硝酸与 1.0ml 浓氢氟酸, 溶样弹经钢套密封后放入 195℃ 烘箱加热 3 天, 确保彻底消解。然后盛放消解液的溶样弹在电热板上蒸至湿盐状, 加入 1ml 内标 Rh, 再加入 5ml 15wt% 硝酸, 重新密闭溶样弹, 放入 195℃ 烘箱过夜。取约 6ml 消解液转移至离心管中, 经天平称重。最后取部分溶液适当稀释后上机测试。微量元素用 Agilent 7700x ICP-MS 测定, 实验结果偏差低于 1%, 误差低于 3%。除 Si 以外的主量元素用 Agilent 5110 ICP-OES 测定, 实验结果偏差小于 5%, 误差小于 10%。Si 元素测定单独进行, 称取 30 毫克全岩粉末置于银坩埚中, 加入 150mg 氢氧化钠粉末, 均匀混合, 在 650℃ 马沸炉加热 20 分钟。熔融物经盐酸中和, 转移至离心管中, 经天平称重。取部分溶液适当稀释, 用 Agilent 5110 ICP-OES 测定。

3 梅树村期古地貌恢复

沉积地层的厚度主要受沉积物输入量和沉积可容纳空间的控制, 若沉积期构造活动相对稳定, 则地层厚度等值线图可以反映该地区沉积时的构造古地理格局, 如相对隆起和相对坳陷的分布。

根据实测剖面 and 收集资料的梅树村组厚度 (附表 1), 绘制出研究区梅树村期地层等厚

图，可大致恢复该时期四川盆地以南的古地貌特征，揭示德阳-安岳裂陷槽向南转变为近 NNE 向延伸（图 3）。裂陷槽内主要为“两洼一隆”地形，北东方向为长宁-镇雄洼地，南西方向以东川-会泽-会东为洼地中心，洼地内地层厚度大，一般大于 100m，最高可大于 200m，昭通-威宁为两者间的隆起区，地层厚度预估在 30-40m，槽内还存在雷波-永善和晋宁-华宁等次级凹陷。在裂陷槽外，碳酸盐台地内除织金-清镇地区发育了厚度大于 30m 的地层，其余地层厚度普遍小于 20m。

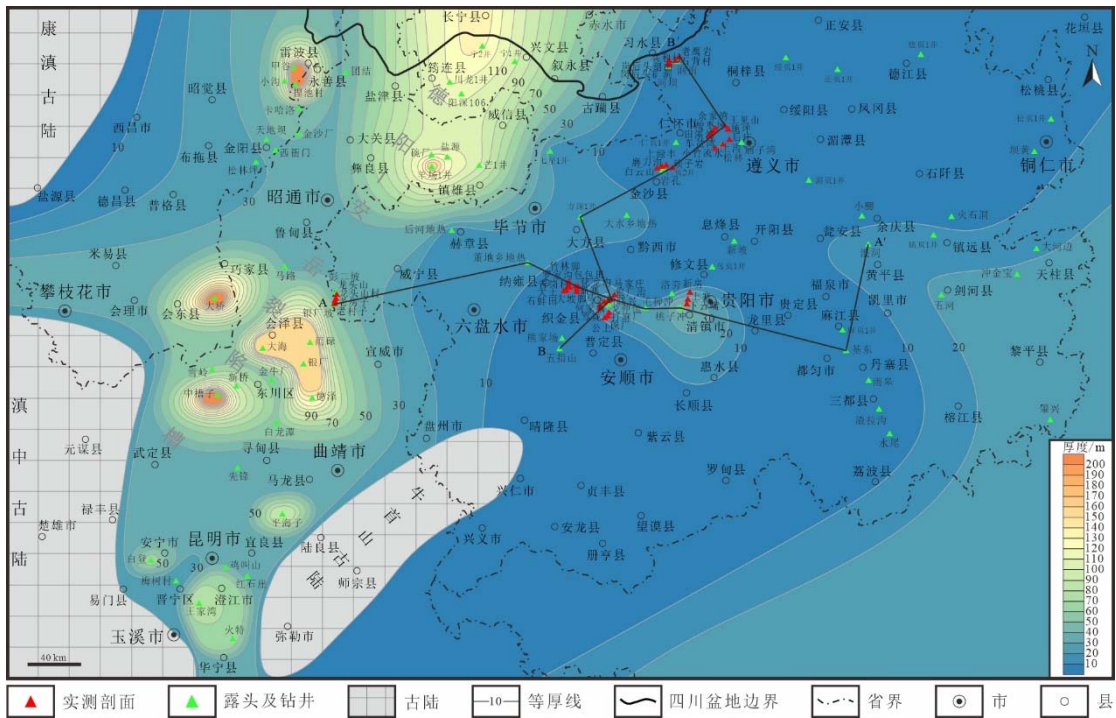


图 3 上扬子区西南部寒武系梅树村组地层等厚图

Fig. 3 Isopach map of the Cambrian Meishucun Formation, Southwestern Upper Yangtze

4 沉积相类型及特征

海相碳酸盐岩沉积可分为台地、斜坡和盆地环境，上扬子区西南部主要属于碳酸盐岩台地沉积体系，发育潮坪沉积相。根据潮差范围、平均海平面及其相对于海平面的地形位置，划分沉积相，基于岩矿学特征，总结研究区发育的以下沉积相：可分为潮上坪、潮间坪和潮下坪。

4.1 潮上坪

潮上坪是潮湿和干旱潮坪的最典型区域，代表了高潮线之上的溅浪区，属于最大高潮线与平均高潮线之间，每月仅有少数几次在大潮或风暴潮期间被淹没，因此该区域长期暴露环境，往往具有地表暴露、成土作用和渗流带胶结作用等标志。大多数沉积作用发生在风暴潮

期间的正常高潮线之上。研究区内可进一步划分为潮上滩和潮上云坪微相。

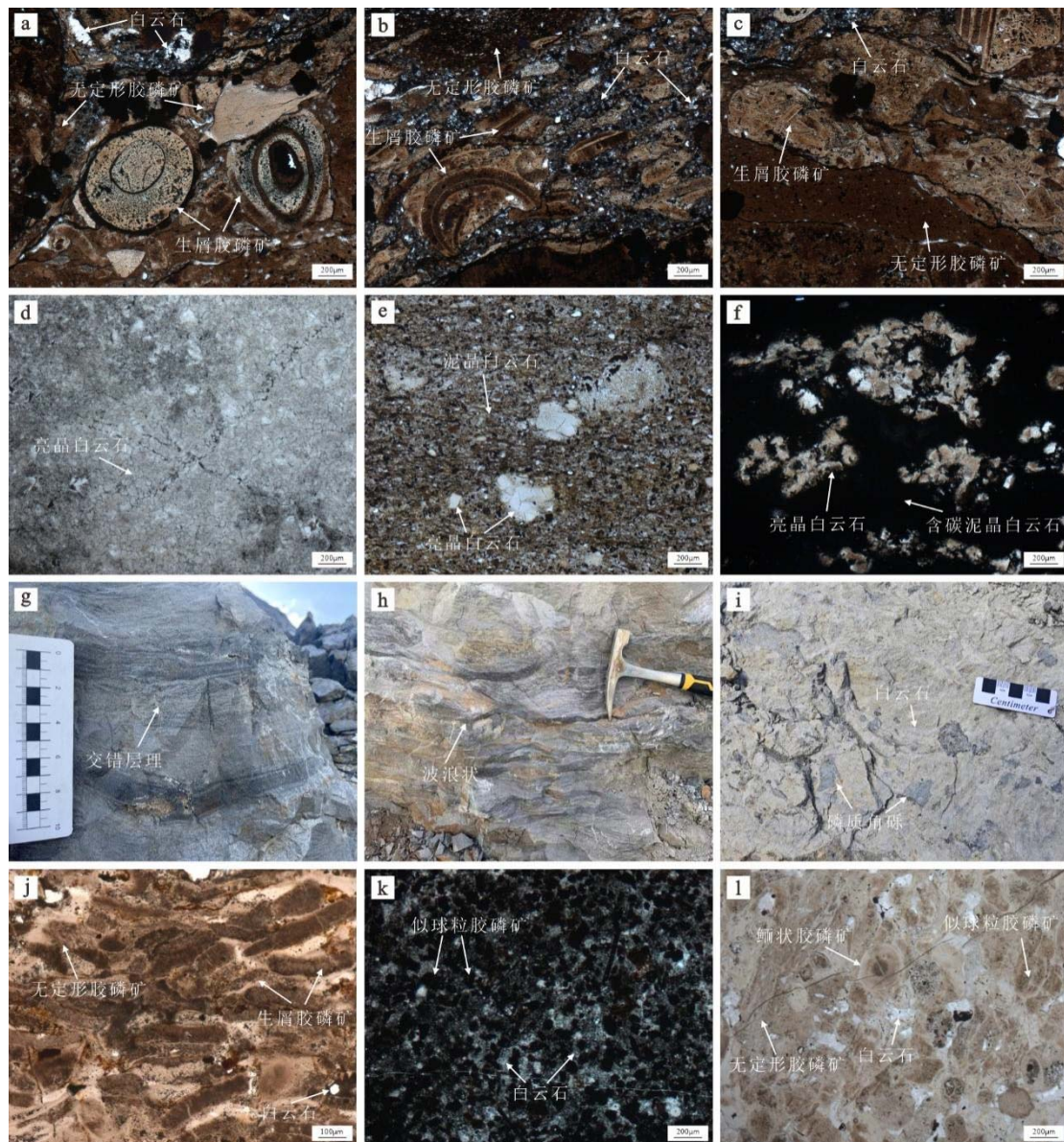


图 4 上扬子区西南部梅树村组典型沉积特征

Fig. 4 Typical sedimentary characteristics of the Meishucun Formation, Southwestern Upper Yangtze

(a) 生物碎屑磷块岩，具较完整的大颗粒软舌螺化石，单偏光，纳雍化龙沟剖面；(b) 生物碎屑磷块岩，亮晶胶结，具定向排列结构，单偏光，纳雍化龙沟剖面；(c) 生物碎屑磷块岩，发育底冲刷面，单偏光，纳雍化龙沟剖面；(d) 粉砂屑白云岩，单偏光，习水老鹰岩剖面；(e) 泥晶白云岩，具鸟眼构造，单偏光，纳雍大土剖面；(f) 泥晶白云岩，发育鸟眼构造，单偏光，纳雍大坡脚剖面；(g) 生物碎屑磷块岩，见交错层理，织金银厂沟剖面；(h) 生物碎屑磷块岩，岩层呈波浪状，织金银厂沟剖面；(i) 含砾白云岩，灯影组顶部，织金银厂沟剖面；(j) 生物碎屑磷块岩，发育小壳化石，见叠瓦状构造，单偏光，织金银厂沟剖面；(k) 球粒磷块岩，磷质球粒分选差，单偏光，镇雄羊场钻孔；(l) 球粒磷块岩，少量为磷质鲕粒，单偏光，威宁老房子剖面

(1) 潮上滩

潮上滩是由风暴潮或强水动力条件间歇性搬运碎屑沉积物至潮坪上部环境堆积形成的沉积体。岩性以生物碎屑磷块岩为主，沉积厚度较薄，生物类型主要为小壳类和软舌螺。偶见较为完整的生物碎屑（图 4a），普遍为破碎状，局部呈定向排列（图 4b），含生物碎屑层

与底部泥晶白云岩层为不整合接触，具有明显的底冲刷面（图 4c）。该生物碎屑磷块岩为滞留沉积形成，细粒沉积物被强簸选作用搬运走后，粗粒物质滞留在表面聚集成岩，常与球粒或鲕粒相混杂，为短期高能事件沉积作用形成。

（2）潮上云坪

潮上云坪主要形成于干旱气候，低能环境，其岩性以蒸发泵白云石化作用形成的粉砂质白云岩（图 4d）和泥晶白云岩（图 4e、f）占主导，薄至中层状，生物扰动构造不发育，常见鸟眼构造（图 4e、f）等暴露标志。

4.2 潮间坪

潮间坪被交替性淹没和暴露，属于平均高潮线和平均低潮线之间的区域。典型特征是交替性的侵蚀作用和沉积作用，以及水流和波浪速度的快速变化。这些特征导致不连续的沉积作用，常伴有冲淤作用、水道的形成、被改造沉积物的堆积，以及纹层间和岩层间颗粒大小的明显变化。研究区内可进一步划分为潮汐水道、潮间滩、潮间云坪和潮间砂泥坪微相。

（1）潮汐水道

潮汐水道是潮汐作用所形成，呈弯曲条带状，向深水区变深变宽。岩性主要为生屑磷块岩和角砾状磷块岩。具有明显的野外沉积特征，发育小型交错层理（图 4g），岩层具有明显变形，呈波浪状（图 4h），底部与下伏岩层为不整合接触，见冲刷面和底砾岩（图 4i）。镜下鉴定显示生物类型主要为小壳类，生物碎屑密集堆积，颗粒被改造并磨圆，分选较好，具有线性接触的叠瓦状构造，由平行和倾斜排列的生物碎屑构成（图 4j），指示了水流搬运的方向，内碎屑长轴一般垂直流向。碳酸盐岩泥仅作为生屑颗粒间的风暴后充填物保存下来。角砾状磷块岩，含黑色硅质角砾，磨圆度差，大小不一（毛铁, 2015; 杨瑞东等, 2017）。

（2）潮间滩

潮间滩为高能动荡水体环境。岩性主要为薄至中层深灰色球粒磷块岩和白云质磷块岩，泥晶胶结。磷质球粒较为密集堆积，次圆状和次棱角状小泥晶颗粒，不具内部结构，分选性较差（图 4k、l），说明这些颗粒是由弱固结的磷酸盐泥经改造再沉积形成的。磷块岩中发育少量磷质鲕粒，经历高能水体簸选呈同心圈层结构（图 4l），进一步富集磷质，形成于高能振荡环境中。普遍发育条纹条带构造、小型交错层理和波状层理（李向东等, 2025）。

（3）潮间砂泥坪

潮间砂泥坪为陆源碎屑和碳酸盐共同沉积区，水体能量中等。岩性组合为深灰色泥质粉砂岩（图 5a）和灰色泥晶白云岩（图 5b）。石英颗粒为棱角状与泥质混合，分选性差，搬运

距离相对较近，可能为附近古陆风化沉积。

(4) 潮间云坪

潮间云坪属于潮间带相对低能的沉积环境，长期被海水淹没。岩石类型主要为灰色薄至中层泥质-硅质白云岩和深灰色含磷泥质-硅质白云岩，可见水平层理，缺乏泥裂和鸟眼等暴露构造标志。

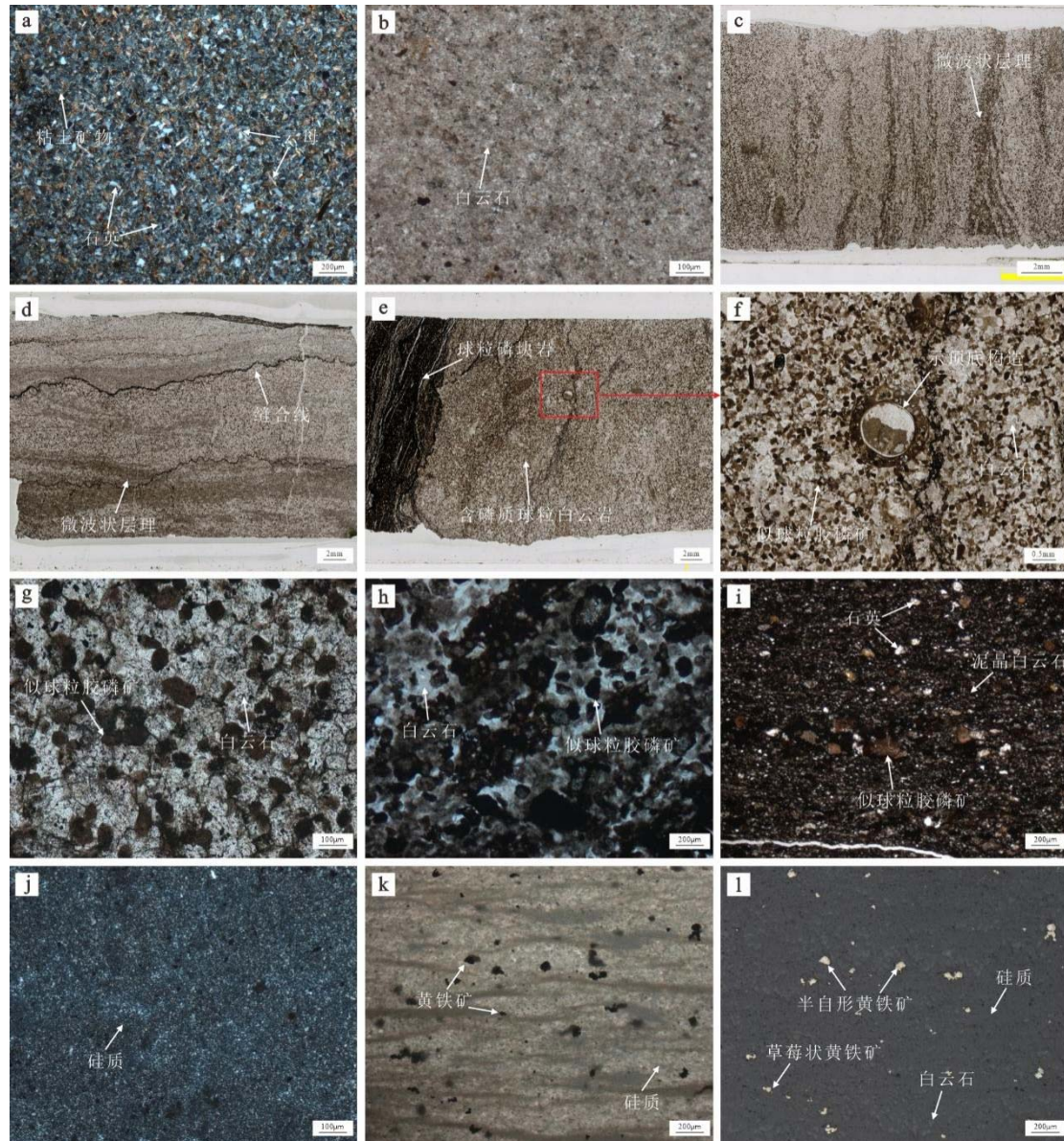


图 5 上扬子区西南部梅树村组典型沉积特征

Fig. 5 Typical sedimentary characteristics of the Meishucun Formation, Southwestern Upper Yangtze

(a) 泥质粉砂岩，棱角状石英碎屑，正交光，威宁老村子剖面；(b) 泥晶白云岩，单偏光，威宁老村子剖面；(c) 含磷质球粒白云岩，发育微波状层理，单偏光，织金银厂沟剖面；(d) 含磷质球粒白云岩，缝合线构造和微波状层理发育，单偏光，织金银厂沟剖面；(e) 含磷质球粒白云岩和球粒磷块岩，单偏光，织金银厂沟剖面；(f) 含磷质球粒白云岩，示顶底构造，单偏光，织金银厂沟剖面；(g) 含磷质球粒白云岩，大小不一的磷质球粒，单偏光，织金银厂沟剖面；(h) 含磷质球粒白云岩，单偏光，镇雄羊场钻孔；(i) 含磷质白云岩，泥晶胶结，单偏光，遵义赖子岩剖面；(j) 硅质岩，正交光，清镇新房剖面；(k) 硅质岩，见水平纹层，单偏光，清镇新房剖面；(l) 硅质岩，发育半自形和草莓状黄铁矿，反射光，清镇新房剖面

4.3 潮下坪

潮下坪是指平均低潮线之下被水永久性淹没的浅海沉积区域。

(1) 潮下滩

潮下滩为潮下高能环境。岩石组合为浅灰色中至厚层球粒含磷白云岩，亮晶胶结，常见微波状层理或纹层，缝合线构造发育（图 5c、d）。偶见半月形鲕粒，底部充填细粒磷酸盐沉积物，顶部充填亮晶方解石，重新定向的示顶底构造与正常顶底关系区别明显（图 5e、f），指示了发生海底胶结作用之后的石化沉积物作为巨砾的再沉积作用，为短期高能事件。磷质球粒和碳酸盐球粒（图 5g、h）由弱固结的磷酸盐泥和碳酸盐泥改造再沉积而成，次圆状和次棱角状，分选差，碳酸盐球粒通常具磷酸盐泥晶套（图 5h），可能为成岩期孔隙水中形成。

(2) 局限低能潮下坪

局限低能潮下为水体流通性相对较差的潮下带沉积环境。岩性以灰黑色中至厚层含磷硅质白云岩（图 5i）和硅质岩（图 5j、k）为主。发育水平纹层（图 5k）和黄铁矿（图 5l），黄铁矿呈草莓状和自形-半自形状，硅质多为玉髓，指示了水动力较弱的贫氧环境。

(3) 潮下泥坪

根据川西南宁 2 井等资料并结合寒武纪梅树村期古地貌特征（图 3），显示该区域梅树村期处于碳酸盐台地内的裂陷槽内，以沉积黑色炭质泥岩为主，缺乏生物和水体扰动的缺氧环境，推测其为潮下泥坪。

4.4 斜坡

斜坡是位于碳酸盐台地或陆架边缘向盆地的过渡带，地形上具有明显坡度的深水沉积环境（金振奎等, 2013）。斜坡环境相对不利于物质沉积成岩，黔西乌页 1 井及邻区岩性主要为灰黑色薄层硅质岩和磷质结核。

4.5 盆地

盆地是远在风暴浪基面之下的深水区，地形平坦（金振奎等, 2013）。黔西南浪洞地区主要沉积黑色厚层硅质岩和黑色中薄层炭质页岩，发育水平纹层，缺乏底栖生物化石，层面平整，为海底低能缺氧沉积环境。

5 岩相古地理展布特征

黔西北地区寒武纪梅树村期含磷岩系相比滇东北“昆阳式”含磷岩系通常缺少了磷矿层

的底板硅质白云岩地层,可能是由于织金-遵义-习水一线在梅树村早期暴露于地表被剥蚀或未接受沉积,表现为该地区梅树村组与下伏埃迪卡拉纪灯影组为平行不整合接触。因此本研究针对区内梅树村期两个主要成矿段开展对比,并将岩相古地理相应划分为早、晚两期予以分析。

5.1 沉积相横向对比

基于研究区实测野外剖面,并结合收集的露头、钻井资料,主要对黔西北和滇东北地区梅树村组进行地层对比和沉积相划分,选择威宁县-织金县-黄平县方向(东西向)和织金县-遵义市-习水县方向(南北向)的典型代表剖面进行区域横向对比(图3)。

上扬子区西南部早寒武世梅树村期,自西向东,沉积水体经历了由深变浅再变深(图6)。最西侧威宁地区梅树村组,主要为潮间-潮下坪沉积,和云南滇东北梅树村组具有相似性,可划分为三段,底部一段以硅质白云岩和硅质岩为主,二段为磷矿赋存层位,顶部三段主要为泥晶白云岩和泥质粉砂岩。纳雍地区水体最浅,沉积厚度最薄,仅有几米,且梅树村组底部存在不整合面。根据岩性和沉积特征,该地区梅树村组可划分为两段,一段为高能沉积的生物碎屑磷块岩,品位高,二段转变为低能沉积且具有鸟眼构造的泥晶白云岩,推测为古隆起上发育的潮上坪,时常暴露于地表。织金地区梅树村期主要为高能潮间-潮下坪,发育大段磷块岩和含磷白云岩。清镇地区为碳酸盐台地内水体最深处,厚度大于40m,以含磷硅质白云岩和硅质岩为主,发育水平层理,长期处于潮下低能带。最东侧麻江和黄平地区依次为斜坡和盆地相,磷块岩不发育,以硅质岩为主。对比结果表明,西侧碳酸盐台地内的高能潮坪更有利于磷矿赋存。

自南向北,从织金地区到习水地区,水体变化趋势为由浅变深再变浅,沉积相由潮上坪过渡至潮间-潮下坪,再到潮上坪,同时岩性由生屑磷块岩和球粒磷块岩为主转变为含磷硅质白云岩和泥晶白云岩等(图7)。大方、遵义和习水地区大部分剖面都呈现梅树村组沉积厚度较薄且磷块岩少,仅遵义松林王见山剖面及附近地区沉积了两三米厚的高品位球粒磷块岩。南边纳雍和织金地区磷矿层更加发育且品位较高。

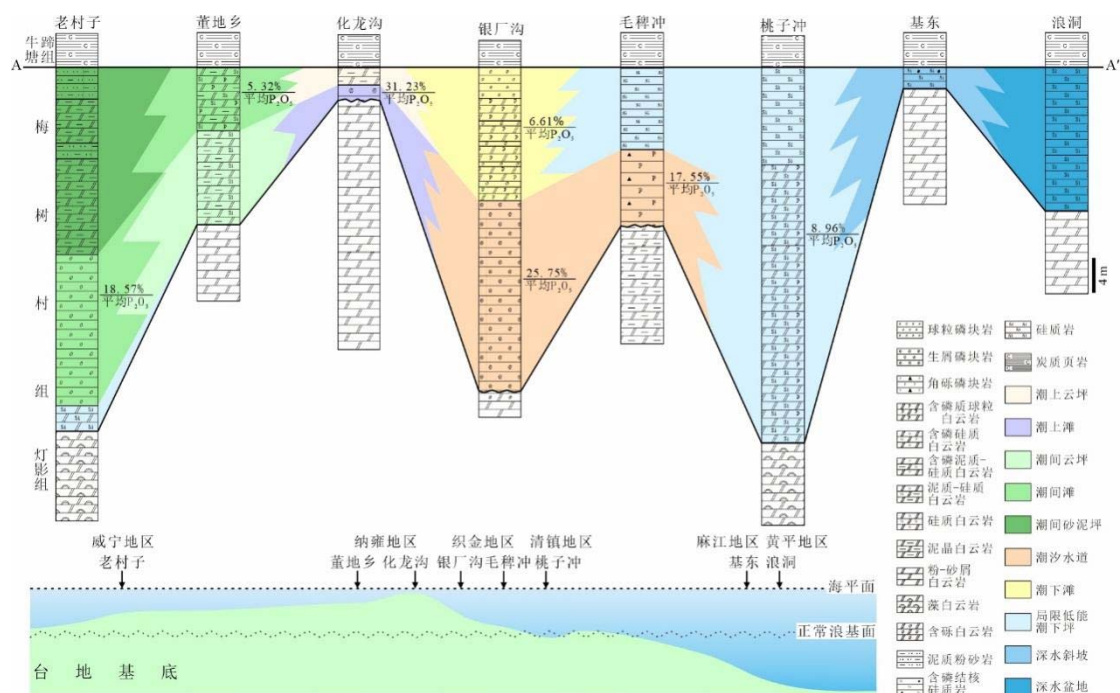


图 6 上扬子区西南部梅树村组连井对比（东西向）图

Fig. 6 Well-tie correlation profile (E-W) of the Meishucun Formation, Southwestern Upper Yangtze

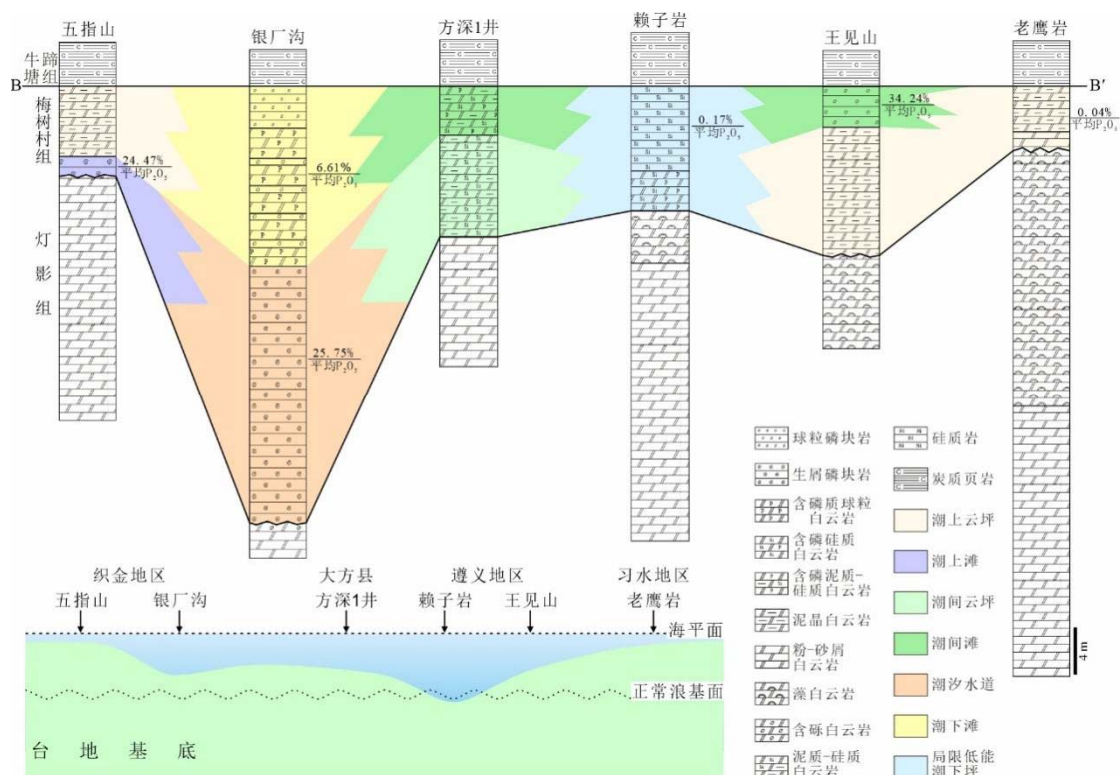


图 7 上扬子区西南部梅树村组连井对比（南北向）图

Fig. 7 Well-tie correlation profile (N-S) of the Meishucun Formation, Southwestern Upper Yangtze

5.2 梅树村早期

寒武纪梅树村早期，上扬子区西南部整体继承了灯影末期的古地理格局，西北方向大部分属于碳酸盐台地，东南方向少部分属于斜坡和深水盆地，西北至东南水体为先变浅再加深

趋势（图 8）。西侧的滇东北和川西南地区主要处于裂陷槽内，为台内深水区。川西南盐津-叙永一带沉积了大段黑色炭质泥岩，推测为潮下泥坪，水动力条件弱。雷波-永善、镇雄-彝良和威宁西南地区为球粒磷块岩，厚度大，品位高，属于潮间滩，水体动荡。昭通鲁甸至毕节威宁地区，据古地貌恢复结果（图 3），此处为裂陷槽内相对高地，但地势仍低于东南方向的六盘水-毕节地区，该地梅树村组应属于昆阳式含磷岩系，可划分为三段。前人整体将此处划分为含磷块岩、泥质粉砂岩和白云岩潮间砂泥坪相（岳维好等, 2022）。本文推测其与附近镇雄羊场、威宁老村子相似，富矿层位于梅树村组第二段，属于潮间滩。习水至织金一带属于台地边缘的相对隆起区，习水-遵义和纳雍地区为潮上坪，水体较浅，长期暴露于地表，沉积厚度薄，分别发育粉-砂屑白云岩和生物碎屑磷块岩。大方地区处于两者间的相对低洼处，以发育深灰色泥质-硅质白云岩为主，属于低能潮间云坪。金沙和清镇附近分别存在台内洼地，为低能局限潮下坪，发育含磷硅质白云岩。织金地区主要为生屑磷块岩和角砾状磷块岩，属于潮汐水道。湄潭-丹寨以沉积磷结核和薄层灰黑色硅质岩为主，属于斜坡相，余庆-黄平属于深水盆地相，发育大套黑色硅质岩。主要成磷区在西北方向裂陷槽内的潮间滩，东南方向的潮上滩和潮汐水道内也存在小范围聚磷，均属于高能水体环境。

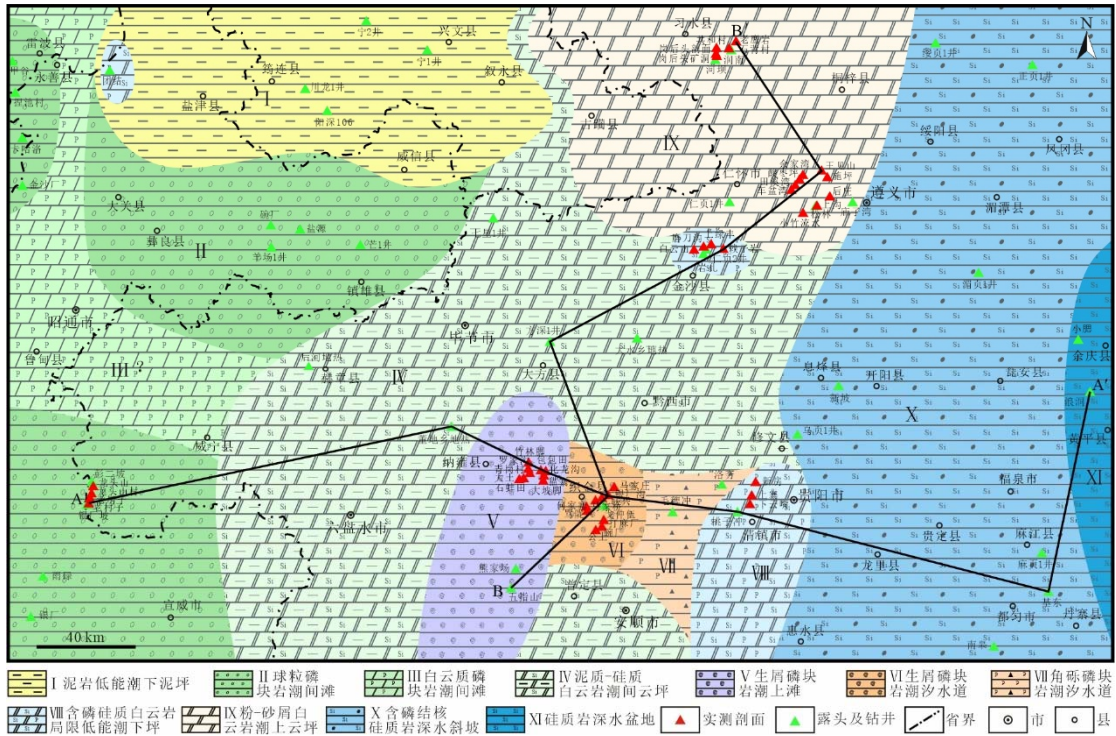


图 8 上扬子区西南部梅树村早期岩相古地理图

Fig. 8 Lithofacies paleogeographic map of the Early Meishucunian Stage, Southwestern Upper Yangtze

5.3 梅树村晚期

受持续海侵作用的影响，梅树村晚期整个研究区水体相对变深，与早期沉积古地理环境对比，潮下坪范围明显扩张，潮间坪范围相对缩小，成磷区范围也缩小，成磷环境变差，磷块岩基本不发育。镇雄、雷波、宣威和织金地区处于潮下高能带，以沉积含磷白云岩为主，

磷含量明显降低。鲁甸-威宁地区水动力条件明显减弱,开始沉积泥晶白云岩和泥质粉砂岩,磷块岩不发育,属于低能潮间坪。习水和纳雍地区仍处于潮上坪,以发育鸟眼构造的泥晶白云岩为主。遵义市西北方向出现几米厚的球粒磷块岩,为潮间滩环境。大方地区沉积了深灰色含磷泥质-硅质白云岩,与早期相比岩性变化不大,磷含量明显增加,推测转变为潮间高能区。金沙和清镇地区水体加深,转变为以硅质岩为主,依旧处于低能局限潮下坪。湄潭-丹寨和余庆-黄平沉积相没有改变,但斜坡和盆地范围向西有所扩大。

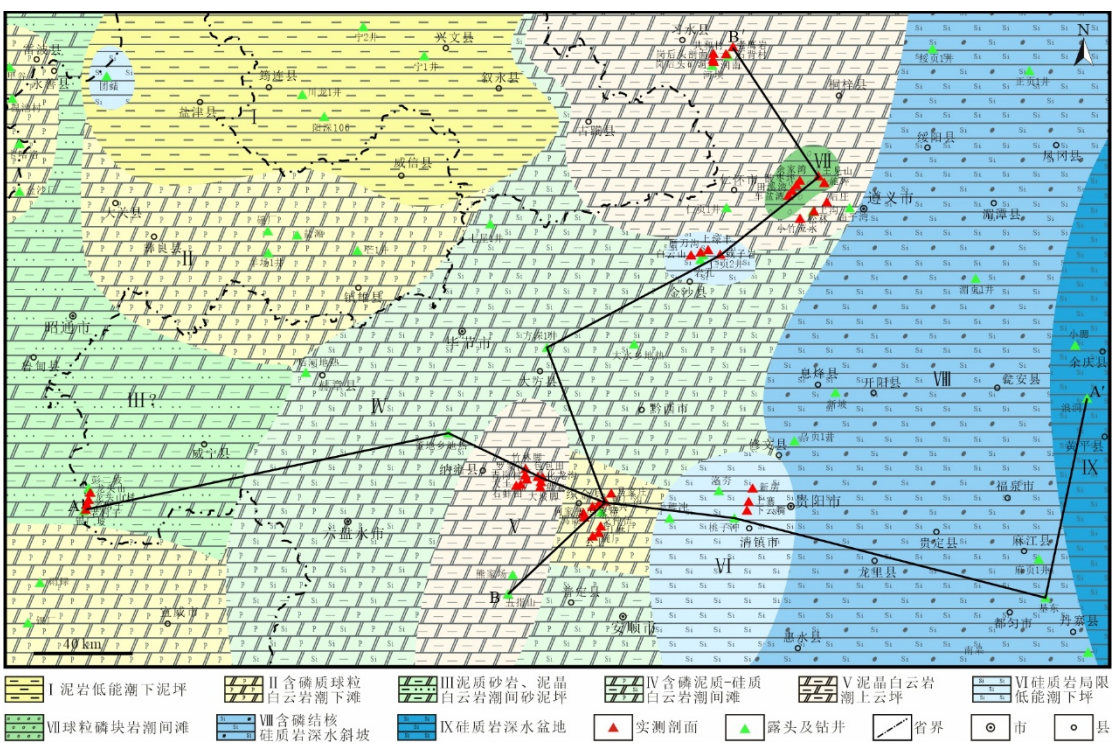


图 9 上扬子区西南部梅树村晚期岩相古地理图

Fig. 9 Lithofacies paleogeographic map of the Late Meishucunian Stage, Southwestern Upper Yangtze

6 水体氧化还原条件

古海水氧化还原条件与古水深变化、构造背景等密切相关,其影响了沉积岩的岩性、矿物组合及岩相分布规律。研究区织金联兴村属于新华式磷矿,威宁老房子属于昆阳式磷矿,两剖面均地层连续、露头完整,是进行水体氧化还原条件对比分析的理想对象。

稀土元素离子半径相近,具有相似地球化学行为,其中 Ce 存在特殊性,受氧化还原控制。在氧化水体中 Ce^{3+} 被氧化 Ce^{4+} 并形成不溶的 Ce 的氢氧化物,导致 Ce 与其他稀土元素分离,水体中呈现出 Ce 的亏损,因此常用 Ce_{anom} 小于 -0.1 指示氧化环境, Ce_{anom} 大于 -0.1 指示还原环境 (Wright et al., 1987; Bau and Koschinsky, 2009; 腾格尔等, 2004; 吕荐阔等, 2021; 樊秋爽等, 2022)。梅树村期磷块岩和白云岩都具有明显的负 Ce 异常,同时随剖面从下至上 Ce_{anom} 值逐渐变高 (表 1, 图 10), 指示了梅树村期水体一直为氧化状态,但从早期到晚期,

水体氧化程度在逐渐降低。Y 和 Ho 的分异也受氧化还原条件的约束，Fe/Mn 氧化物会优先吸附 Ho 将其从水体中去除，造成 Y 和 Ho 的分馏（Bau et al., 1997）。氧化环境中形成大量 Fe/Mn 氧化物，使 Y 和 Ho 的分馏更强烈，因此更高的 Y/Ho 比值指示了水体氧化程度更高（樊秋爽等, 2022）。研究区梅树村早期 Y/Ho 比值略高于晚期，与 Ce 异常揭示了相同规律，早期水体氧化程度更高。

Mo、V、U、Ni 等氧化还原敏感元素的赋存状态与迁移富集行为，对环境氧化还原条件的变化具有显著的响应性（Russell and Morford, 2001; 樊秋爽等, 2022）。在氧化环境中，Mo、V、U、Ni 等元素以高价态离子形式存在，易溶于海水并发生迁移；而在缺氧环境中，这些元素被还原为低价态离子，通过沉淀或吸附作用从水体中析出，最终保存在沉积物中（韦恒叶, 2012; Shi et al., 2016; 吕荐阔等, 2021; 樊秋爽等, 2022）。因此，Mo 的富集系数及 V/Cr 等地球化学参数，常被用作判别古海水氧化还原条件的重要指标（附表 2, 吕荐阔等, 2021; 樊秋爽等, 2022）。根据二元判别图解（图 11），研究区梅树村早期样品数据点集中分布于氧化-次氧化区域，而晚期样品数据点主要位于次氧化-缺氧区域，表明梅树村早期整体处于氧化程度较高的沉积环境，到晚期逐渐转化成更为还原的水体。该结论与 Ce 异常等指标反应的氧化还原趋势相一致，同时与研究区重建的岩相古地理演化共同揭示了梅树村期存在持续性的海侵事件。该事件导致水体深度持续增加并伴随海水氧化还原界面上升，底层海水氧化程度逐渐降低，成磷作用显著减弱，磷块岩发育规模逐渐减小。

表 1 研究区梅树村组 P₂O₅(wt%)、有关元素富集系数及比值

Table 1 P₂O₅ (wt%), elemental enrichment coefficients, and relevant elemental ratios of the Meishucun Formation in the study area

样品号	P ₂ O ₅	Ce _{anom}	Y/Ho	Ni/Co	V/Cr	Mo _{EF}	U _{EF}
LXC-3	5.22	-0.50	59.16	5.02	5.83	10.59	26.97
LXC-6	13.07	-0.53	57.86	4.84	3.71	9.32	44.98
LXC-8	20.05	-0.52	57.33	1.16	4.49	22.96	96.05
LXC-12	31.41	-0.53	58.85	2.37	3.92	25.80	97.13
LXC-14	21.02	-0.52	57.09	1.82	2.37	23.84	137.93
LXC-17	19.18	-0.51	56.29	4.30	1.21	32.38	92.50
LXC-19	21.63	-0.52	55.42	7.02	1.23	14.94	54.82
LXC-22	25.78	-0.48	54.77	6.12	1.61	6.64	19.11
LXC-23	14.00	-0.46	59.11	170.71	1.19	43.42	33.43
LXC-25	4.97	-0.46	55.74	92.17	1.26	3.83	17.61
LXC-27	4.09	-0.46	56.84	67.71	2.09	42.96	29.27
LXC-30	5.22	-0.47	58.43	175.12	1.18	25.65	34.62
LFZ-B8	5.22	-0.28	48.59	6.85	0.26	387.62	184.63
LFZ-B13	13.07	-0.43	55.47	6.20	0.99	76.33	215.50
LFZ-B15	20.05	-0.47	56.32	8.79	1.06	191.59	480.23

LFZ-B17	31.41	-0.48	58.85	4.34	0.81	118.88	538.66
LFZ-B18	21.02	-0.42	55.19	7.43	0.77	63.74	361.51
LFZ-B19	19.18	-0.42	54.59	3.91	0.91	66.41	263.76
LFZ-B23	4.97	-0.25	46.53	1.93	2.41	37.68	34.16
LFZ-B26	4.09	-0.26	48.23	2.97	1.66	40.03	13.80

注： $Ce_{anom} = \log[3Ce_N / (2La_N + Nd_N)]$ (Wright et al., 1987)。 $X_{EF} = (X/Al)_{样品} / (X/Al)_{PAAS}$ (Algeo and Tribovillard, 2009)。 LXC-联兴村剖面， LFZ-老房子剖面。

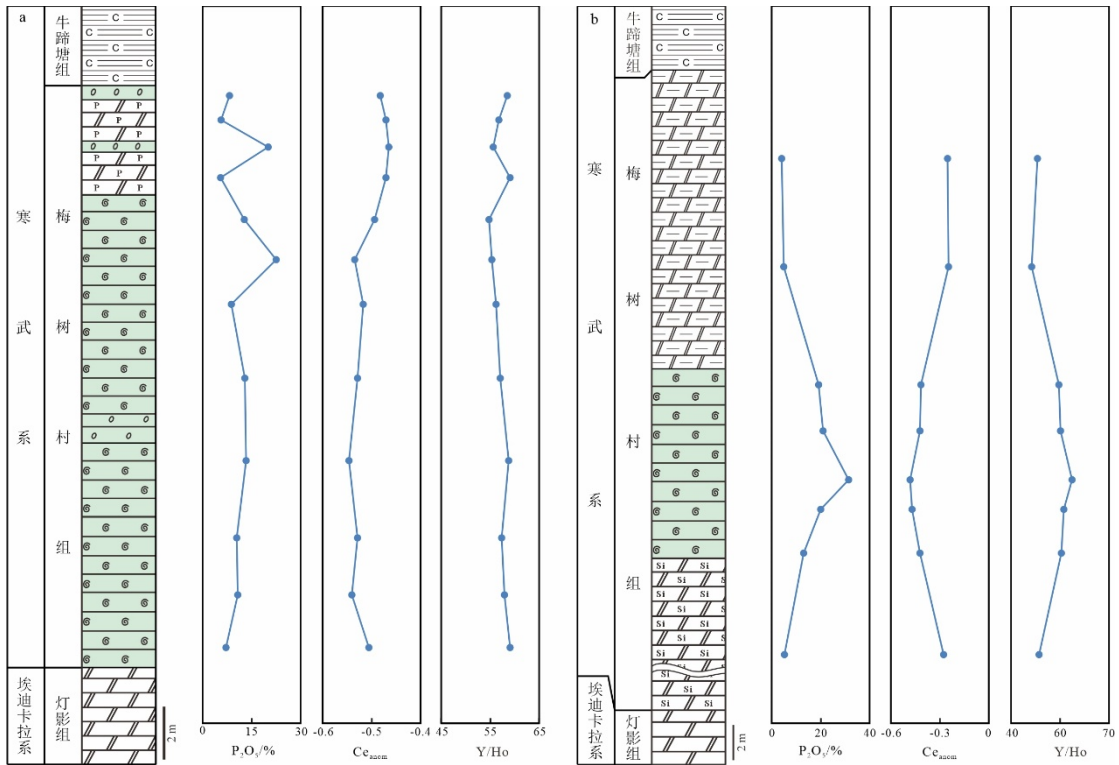


图 10 研究区相关元素指标纵向变化趋势 (a. 织金县联兴村剖面; b. 威宁县老房子剖面)

Fig. 10 Vertical variation trends of relevant elemental indicators in the study area (a. Lianxingcun Section, Zhijin County; b. Laofangzi Section, Weining County)

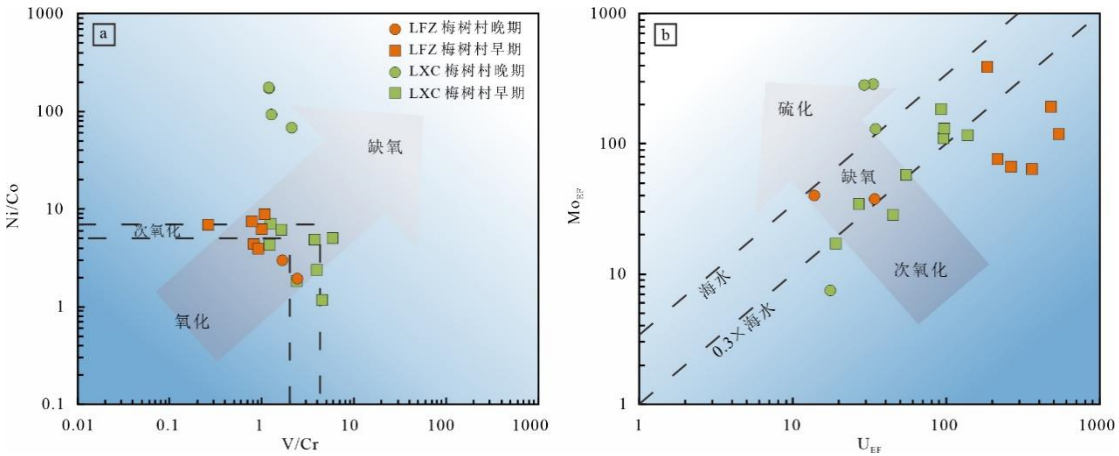


图 11 研究区氧化还原条件二元判别图 (a. Ni/Co-V/Cr, 据 Jones and Manning (1994); b. Mo_{EF}-U_{EF}, 据 Algeo and Tribovillard (2009); LFZ-老房子剖面; LXC-联兴村剖面)

Fig. 11 Binary discrimination diagram for redox conditions in the study area (a. Ni/Co-V/Cr, after Jones and

Manning (1994); b. Mo_{EF}-U_{EF}, after Algeo and Tribovillard (2009); LFZ-Laofangzi Section; LXC-Lianxingcun Section)

7 古地理格局对磷矿的控矿意义

上扬子区西南部早寒武世梅树村期磷矿的成矿作用和分布显著受控于古地貌和岩相古地理条件。根据实测剖面和分析的资料,研究区内已探明了多个聚磷中心(图 12)。雷波、镇雄和威宁西南方向的成磷中心均位于四川盆地往南延伸的裂陷槽内,其磷矿层厚度可达 30m 以上,具有以各自为中心向周缘逐渐减薄的趋势。雷波成磷区向西和镇雄成磷区向北沉积相迅速从高能潮间-潮下滩转变为低能潮下泥坪,同时磷矿层也出现快速减薄至尖灭的现象。雷波地区往南沉积相仍为高能潮间-潮下坪,仍有几米厚的磷矿层。

研究区东南方向裂陷槽外还存在以织金地区为成磷中心的矿区,磷矿层向四周沉积厚度逐渐减小,从织金以东-东北方向延伸的清镇、金沙、遵义、习水地区磷矿层厚度均低于 2 米,织金西南方向熊家场附近和西侧的纳雍地区沉积厚度也均低于 2 米。织金地区在梅树村期一直处于强水动力条件的潮坪沉积环境,而其余地区常处于水动力较弱的潮坪环境。磷矿层的沉积厚度与水动力条件、水体深度等存在一定规律,高能动荡的水体往往有利于磷质富集成矿,过浅或过深的沉积环境均不利于成矿。

基于矿层及地层变化规律与沉积相分析结果,本次在研究区内圈定了两个成矿远景区,毕节-镇雄远景区和威宁-鲁甸远景区(图 12)。在云南镇雄羊场大型成磷区,矿层及梅树村组地层厚度往东南方向均为缓慢减薄,至毕节-镇雄一带可能还具有 10m 以上的矿层厚度,且该地区处于槽内的潮间-潮下滩环境,故将该地区圈定为成矿远景区。在威宁地区西南方向的银厂成磷区,矿层与梅树村组地层厚度则往东北方向逐渐减薄,至龙头山附近矿层厚度仍可达 16m 左右。据此推断,龙头山东北方向的威宁-鲁甸地区可能也存在大于 10m 的矿层厚度。岩相古地理分析进一步表明,威宁-鲁甸地区在梅树村早期可能处于利于成磷作用发生的潮间滩环境(图 8),共同指示了该区域具备形成工业磷矿层的潜力。

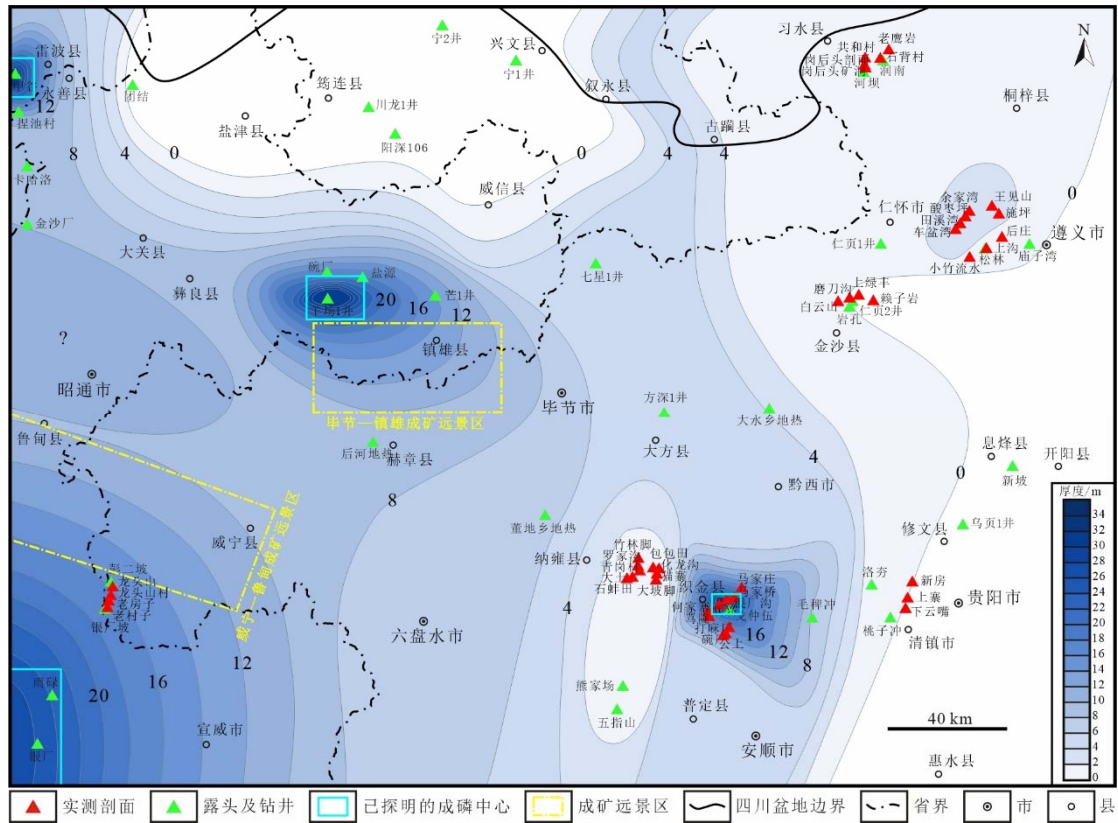


图 12 上扬子区西南部早寒武世梅树村期磷矿层等厚图及成矿远景区圈定

Fig. 12 Isopach and metallogenic prospective map of the phosphorite layers for the Meishucun Stage, Lower Cambrian, Southwestern Upper Yangtze

8 结论

(1) 本研究揭示了上扬子区西南部早寒武世梅树村期发育碳酸盐台地潮坪沉积体系，沉积相展布与梅树村组地层厚度均受四川盆地南延的台内裂陷槽控制。槽内镇雄-威宁一带主要发育潮间-潮下坪，地层较厚(大于 30m)，其中会泽、镇雄等槽内洼地地层厚度可逾 200m；槽外织金-习水一带以潮间-潮上坪为主，地层较薄(普遍小于 20m)。从梅树村早期至晚期，研究区水体加深，台内沉积相主体由潮间-潮上坪转为潮间-潮下坪。

(2) 上扬子区西南部早寒武世成磷作用在空间上受古地理环境制约，磷质主要聚集于裂陷槽内潮间-潮下高能滩环境(镇雄-威宁一带)及槽外织金坳陷的潮汐水道。时间上，成磷作用受海侵过程控制，梅树村早期水体能量高、氧化程度大，利于磷块岩广泛沉积；晚期海平面升高，水体能量总体减弱、还原性增强，导致磷块岩分布范围收缩。

(3) 黔西北毕节-滇东北镇雄地区和黔西北威宁-滇东北鲁甸地区梅树村组沉积厚度较大，且沉积相属于最有利于磷质聚集的潮间-潮下滩环境，故其成矿潜力大，有望成为磷矿的有利勘探区。

参考文献

- Algeo, T. J., Tribouillard, N., 2009. Environmental analysis of paleoceanographic systems based on molybdenum–uranium covariation. *Chemical Geology*, 268(3/4): 211-225. doi:10.1016/j.chemgeo.2009.09.001
- Bau, M., Koschinsky, A., 2009. Oxidative scavenging of cerium on hydrous Fe oxide: Evidence from the distribution of rare earth elements and yttrium between Fe oxides and Mn oxides in hydrogenetic ferromanganese crusts. *Geochemical Journal*, 43(1): 37-47. doi:10.2343/geochemj.1.0005e
- Bau, M., M'öller, P., Dulski, P., 1997. Yttrium and lanthanides in eastern Mediterranean seawater and their fractionation during redox-cycling. *Marine Chemistry*, 56(1-2): 123-131. doi:10.1016/s0304-4203(96)00091-6
- Cañadas, F., Papineau, D., Leng, M. J., et al., 2022. Extensive primary production promoted the recovery of the Ediacaran Shuram excursion. *Nature communications*, 13(1): 148. doi:10.1038/s41467-021-27812-5
- Chen, J., Yang, R., Wei, H., et al., 2013. Rare earth element geochemistry of Cambrian phosphorites from the Yangtze Region. *Journal of Rare Earths*, 31(1): 101-112. doi:10.1016/s1002-0721(12)60242-7
- Cook, P. J., Shergold, J. H., 1984. Phosphorus, phosphorites and skeletal evolution at the Precambrian—Cambrian boundary. *Nature*, 308(5956): 231-236. doi:10.1038/308231a0
- Cowie, J. W., 1985. Continuing work on the Precambrian-Cambrian boundary. *Episodes Journal of International Geoscience*, 8(2): 93-97. doi:10.18814/epiugs/1985/v8i2/003
- Delaney, M. L., 1998. Phosphorus accumulation in marine sediments and the oceanic phosphorus cycle. *Global biogeochemical cycles*, 12(4): 563-572. doi:10.1029/98gb02263
- Fan, H., Wen, H., Zhu, X., 2016. Marine redox conditions in the Early Cambrian ocean: Insights from the Lower Cambrian phosphorite deposits, South China. *Journal of Earth Science*, 27: 282-296. doi:10.1007/s12583-016-0687-3
- Fan, Q. S., Xia, G. Q., Li, G. J., et al., 2022. Analytical Methods and Research Progress of Redox Conditions in the Paleo-Ocean. *Acta Sedimentologica Sinica*, 40(5): 1151-1171(in Chinese with English abstract). doi:10.14027/j.issn.1000-0550.2021.023
- Feng, Z. Z., 2004. Single factor analysis and multifactor comprehensive mapping method-reconstruction of quantitative lithofacies palaeogeography. *Journal of Palaeogeography*, 6(1): 3-19(in Chinese with English abstract).
- Fu, J. L., Ding, W. L., Zeng, W. T., et al., 2016. Influence of Structure of Northwest Guizhou Area on Preservation of Lower Cambrian Shale Gas Reservoirs. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 38(5): 22-32(in Chinese with English abstract). doi:10.11885/j.issn.1674 5086.2015.01.08.02
- Hu, Q. H., Zhou, Q., Xia, J. F., et al., 2024. Genesis and prospecting potential of Yangchang phosphorus deposit in northeastern Yunnan Province. *Mineral Deposits*, 43(05): 1127-1148(in Chinese with English abstract). doi:10. 16111/j. 0258-7106. 2024. 05. 011
- Ishikawa, T., Ueno, Y., Komiya, T., et al., 2008. Carbon isotope chemostratigraphy of a Precambrian/Cambrian boundary section in the Three Gorge area, South China: prominent global-scale isotope excursions just before the Cambrian Explosion. *Gondwana Research*, 14(1-2): 193-208. doi:10.1016/j.gr.2007.10.008
- Jiang, Y., Gao, J. B., Lu, Z. T., et al., 2025. The evolution process of sedimentary environment of the phosphorite orebodies within the Lower Cambrian Gezhongwu Formation in the Zhijin phosphorite deposit, Guizhou Province. *Acta Mineralogica Sinica*, 45(03): 400-410(in Chinese with English abstract). doi:10.3724/j.1000-4734.2025.45.037e
- Jin, Z. K., Shi, L., Gao, B. S., et al., 2013. Carbonate Facies and Facies Models. *Acta Sedimentologica Sinica*, 31(06): 965-979(in Chinese with English abstract). doi:10.14027/j.cnki.cjxb.2013.06.002
- Jones B, Manning D A C., 1994. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones. *Chemical Geology*, 111(1/2/3/4): 111-129. doi:10.1016/0009-2541(94)90085-x
- Li, R., Wang, Y. X., Wang, Z. C., et al., 2023. Geological characteristics of the southern segment of the Late Sinian–Early Cambrian Deyang–Anyue rift trough in Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 50(02): 285-296(in Chinese with English abstract). doi:10.11698/PED.20220764
- Li, T., Zhu, G., Z, Y., et al., 2025. Phosphorus Cycling and Phosphorus Speciation Application in Reconstruction of Paleo-Marine

Environmet. Earth Science, 50(01): 246-268(in Chinese with English abstract). doi:10.3799/dqkx.2023.202

- Li, X. D., Yang, M., Wei, Z. Y., 2025. Deep-water traction current deposits of the Cambrian Meishucun Formation in Well ZK0816, Yangchang phosphate ore area of northeastern Yunnan Province. *Journal of Palaeogeography*, 27(04): 853-869(in Chinese with English abstract). doi:10.7605/gdxb.2025.025
- Li, Z. Q., Liu, J., Li, Y., et al., 2015. Formation and evolution of Weiyuan-Anyue extension-erosion groove in Sinian system, Sichuan Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 42(01): 26-33(in Chinese with English abstract). doi:10.11698/PED.20220764
- Li, Z. X., Bogdanova, S. V., Collins, A. S., et al., 2008. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: a synthesis. *Precambrian research*, 160(1-2): 179-210. doi:10.1016/j.precamres.2009.01.012
- Liu, W. J., Zhou, Y. L., Mi, Y. C., et al., 2024. Inorganic and organic carbon isotopes from Early Cambrian Yangchang phosphate deposit in Zhenxiong County, Yunnan Province. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 43(05): 1086-1098(in Chinese with English abstract). doi:10.20086/j.cnki.yskw.2024.0502
- Liu, Z. R. R., Zhou, M. F., 2020. Early Cambrian ocean mixing recorded by phosphorite successions in the Nanhua Basin, South China. *Precambrian Research*, 349: 105414. doi:10.1016/j.precamres.2019.105414
- Lü, J. K., Zhai, S. K., Yu, Z. H., et al., 2021. Application and influence factors of redox-sensitive elements in a sedimentary environment. *e*, 45(12): 108-124(in Chinese with English abstract). doi:10.11759/hyxx20210712002
- Mao, T., 2015. The analysis of forming environment and ore-controlling factors of phosphorous deposits in the bottom of lower Cambrian, Central Guizhou Province. Guizhou University, Guizhou, China (in Chinese with English abstract).
- Mi, Y. C., Du, B., Xia, J. F., et al., 2024. Sedimentary environment and enrichment mineralization mechanism of the Lower Cambrian Meishucun Formation in the Yangchang phosphate deposit of Zhenxiong area, Northeastern Yunnan. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 43(05): 1099-1118(in Chinese with English abstract). doi:10.20086/j.cnki.yskw.2024.0503
- Pufahl, P. K., Groat, L. A., 2017. Sedimentary and igneous phosphate deposits: formation and exploration: an invited paper. *Economic Geology*, 112(3): 483-516. doi:10.2113/econgeo.112.3.483
- Russell, A. D., Morford, J. L., 2001. The behavior of redox-sensitive metals across a laminated-massive-laminated transition in Saanich Inlet, British Columbia. *Marine Geology*, 174(1-4): 341-354. doi:10.1016/s0025-3227(00)00159-6
- Shi, L., Feng, Q. L., Shen, J., et al., 2016. Proliferation of shallow-water radiolarians coinciding with enhanced oceanic productivity in reducing conditions during the Middle Permian, South China: Evidence from the Gufeng Formation of western Hubei province. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 444: 1-14. doi:10.1016/j.palaeo.2015.11.031
- Steiner, M., Li, G., Qian, Y., et al., 2007. Neoproterozoic to early Cambrian small shelly fossil assemblages and a revised biostratigraphic correlation of the Yangtze Platform (China). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 254(1-2): 67-99. doi:10.1016/j.palaeo.2007.03.046
- Teng, G. E., Liu, W. H., Xu, W. C., et al, 2004. The Discussion on Anoxic Environments and Its Geochemical Identifying Indices. *Acta Sedimentologica Sinica*, (02): 365-372(in Chinese with English abstract).
- Wang, Y., Xiong, X. X., 2023. Phosphate Ore Series, Metallogenic Regularity, and Prospecting Direction in China. *Acta Geoscientica Sinica*, 44(04): 625-634(in Chinese with English abstract). doi:10.3975/cagsb.2022.111501
- Wei, H. Y., 2012. Productivity and redox proxies of palaeo-oceans: An overview of elementary geochemistry. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 32(02): 76-88(in Chinese with English abstract).
- Wen, H., Fan, H., Zhang, Y., et al., 2015. Reconstruction of early Cambrian ocean chemistry from Mo isotopes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 164: 1-16. doi:10.46427/gold2024.21573
- Wright, J., Schrader, H., Holser, W.T., 1987. Paleoredox variations in ancient oceans recorded by rare earth elements in fossil apatite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51(3): 631-644. doi:10.1016/0198-0254(87)90207-x
- Xing, J. Q., Zhang, Z. Z., Xian, H. Y., et al., 2022. Enrichment Mechanism, Occurrence State and Availability of REEs in the Zhijian Phosphorite Deposit, Guizhou, China. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 41(03): 505-516+463-464(in Chinese with English abstract). doi:10.19658/j.issn.1007-2802.2022.41.032
- Xing, J., Jiang, Y., Xian, H., et al., 2024. Rare earth element enrichment in sedimentary phosphorites formed during the Precambrian-

- Cambrian transition, Southwest China. *Geoscience Frontiers*, 15(2): 101766. doi:10.1016/j.gsf.2023.101766
- Yang, H. Y., Zhao, Z. F., Wang, T., et al., 2025. A preliminary study of the rare earth element enrichment characteristics and ore formation environment of the Early Cambrian Yangchang phosphorite deposit in the northeastern Yunnan. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 1-20(in Chinese with English abstract). doi:10.3724/j.issn.1007-2802.20240178
- Yang, H., Xiao, J., Xia, Y., et al., 2021. Phosphorite generative processes around the Precambrian-Cambrian boundary in South China: An integrated study of Mo and phosphate O isotopic compositions. *Geoscience Frontiers*, 12(5): 101187. doi:10.1016/j.gsf.2021.101187
- Yang, H., Xiao, J., Xia, Y., et al., 2022. Diagenesis of Ediacaran-early Cambrian phosphorite: Comparisons with recent phosphate sediments based on LA-ICP-MS and EMPA. *Ore Geology Reviews*, 144: 104813. doi:10.1016/j.oregeorev.2022.104813
- Yang, R. D., Mao, T., Chen, J. Y., et al., 2017. A Study on Sedimentary Characteristics of Phosphate Rock at the Bottom of the Cambrian in Central Guizhou Province, China. *Acta Mineralogica Sinica*, 37(04): 448-455(in Chinese with English abstract). doi:10.16461/j.cnki.1000-4734.2017.04.01
- Ye, Y., Wang, H., Wang, X., et al., 2020. Elemental geochemistry of lower Cambrian phosphate nodules in Guizhou Province, South China: An integrated study by LA-ICP-MS mapping and solution ICP-MS. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 538: 109459. doi:10.1016/j.palaeo.2019.109459
- Yu, L. M., Liu, M. X., Dan, Y., et al., 2023. The origin of Ediacaran phosphogenesis event: New insights from Doushantuo Formation in the Danzhai phosphorite deposit, South China. *Ore Geology Reviews*, 152: 105230. doi:10.1016/j.oregeorev.2022.105230
- Yue, W. H., Huang, Y. H., Dao, T. H., 2022. Geological characteristics and resource potential of the super-large high-quality phosphorite deposit of the Yangchang in Zhenxiong County, Yunnan Province, southwestern margin of the Upper Yangtze Block. *Geological Bulletin of China*, 41(05): 846-856(in Chinese with English abstract). doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.05.010
- Zhang, G., Dong, Y., Lai, S., et al., 2004. Mianlüe tectonic zone and Mianlüe suture zone on southern margin of Qinling-Dabie orogenic belt. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 47(4): 300-316. doi:10.1360/02yd0526
- Zhang, H., Fan, H., Wen, H., et al., 2022. Controls of REY enrichment in the early Cambrian phosphorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 324: 117-139. doi:10.1016/j.gca.2022.03.003
- Zhang, S., Luo, B., Wang, Z. C., et al., 2025. Genesis of the Deyang-Anyue intracratonic rift in the Sichuan Basin and its connection with the Proto-Tethys Ocean. *Natural Gas Industry*, 45(02): 37-50(in Chinese with English abstract). doi:10.3787/j.issn.1000-0976.2025.02.004
- Zhang, X., Zhou, X., Hu, D., 2020. High-resolution paired carbon isotopic records from the Meishucun section in South China: Implications for carbon cycling and environmental changes during the Ediacaran-Cambrian transition. *Precambrian Research*, 337: 105561. doi:10.1016/j.precamres.2019.105561
- Zhang, Z., Jiang, Y., Niu, H., et al., 2021. Enrichment of rare earth elements in the early Cambrian Zhijin phosphorite deposit, SW China: Evidence from francolite micro-petrography and geochemistry. *Ore Geology Reviews*, 138: 104342. doi:10.1016/j.oregeorev.2021.104342
- Zhao, G., Cawood, P. A., 2012. Precambrian geology of China. *Precambrian Research*, 222: 13-54. doi:10.1016/j.precamres.2012.09.017
- Zhao, J. H., Zhou, M. F., Yan, D. P., et al., 2011. Reappraisal of the ages of Neoproterozoic strata in South China: no connection with the Grenvillian orogeny. *Geology*, 39(4): 299-302. doi:10.1130/g31701.1
- Zhou, J. G., Shen, A. J., Zhang, J. Y., et al., 2018. Deyang-Anyue Interplatform Rift in Sichuan Basin and Its Direction of Exploration in Sinian. *Marine Origin Petroleum Geology*, 23(02): 1-9(in Chinese with English abstract). doi:10.3969/j.issn.1672-9854.2018.02.001
- Zhu, M., Zhang, J., Yang, A., et al., 2003. Sinian-Cambrian stratigraphic framework for shallow-to deep-water environments of the Yangtze Platform: an integrated approach. *Progress in Natural Science*, 13(12): 951-960. doi:10.1080/10020070312331344710
- Zhu, R. X., Li, X. H., Hou, X. G., et al., 2009. SIMS U-Pb zircon age of a tuff layer in the Meishucun section, Yunnan, southwest China: Constraint on the age of the Precambrian-Cambrian boundary. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 52(9): 1385-1392. doi:10.1007/s11430-009-0152-6
- 樊秋爽, 夏国清, 李高杰, 等, 2022. 古海洋氧化还原条件分析方法与研究进展. *沉积学报*, 40(5): 1151-1171.
- 冯增昭, 2004. 单因素分析多因素综合作图法: 定量岩相古地理重建. *古地理学报*, 6(1): 3-19.

- 付景龙, 丁文龙, 曾维特, 等, 2016. 黔西北地区构造对下寒武统页岩气藏保存的影响. 西南石油大学学报(自然科学版), 38(5): 22-32.
- 胡清华, 周寿, 夏建峰, 等, 2024. 滇东北羊场磷矿床成因与找矿前景. 矿床地质, 43(05): 1127-1148.
- 蒋元, 高军波, 路志通, 等, 2025. 贵州织金下寒武统戈仲伍组磷矿床的沉积环境演化过程. 矿物学报, 45(03): 400-410.
- 金振奎, 石良, 高白水, 等, 2013. 碳酸盐岩沉积相及相模式. 沉积学报, 31(06): 965-979.
- 黎荣, 王永骁, 汪泽成, 等, 2023. 四川盆地晚震旦世一早寒武世德阳—安岳裂陷槽南段地质特征. 石油勘探与开发, 50(02): 285-296.
- 李婷婷, 朱光有, 张义杰, 等, 2025. 磷循环及磷组分在古海洋环境重建中的应用. 地球科学, 50(01): 246-268.
- 李向东, 杨敏, 魏泽昶, 2025. 滇东北羊场磷矿区 ZK0816 井寒武系梅树村组深水牵引流沉积. 古地理学报, 27(04): 853-869.
- 李忠权, 刘记, 李应, 等, 2015. 四川盆地震旦系威远—安岳拉张侵蚀槽特征及形成演化. 石油勘探与开发, 42(01): 26-33.
- 刘文杰, 周艳玲, 米云川, 等, 2024. 云南镇雄羊场磷矿早寒武世无机碳、有机碳同位素研究. 岩石矿物学杂志, 43(05): 1086-1098.
- 吕荐阔, 翟世奎, 于增慧, 等, 2021. 氧化还原敏感性元素在沉积环境判别中的应用研究进展. 海洋科学, 45(12): 108-124.
- 毛铁, 2015. 黔中地区寒武系底部成磷环境及成矿控制因素分析. 贵州: 贵州大学.
- 米云川, 杜斌, 夏建峰, 等, 2024. 滇东北镇雄羊场磷矿区下寒武统梅树村组沉积环境及富集成矿机制. 岩石矿物学杂志, 43(05): 1099-1118.
- 腾格尔, 刘文汇, 徐永昌, 等, 2004. 缺氧环境及地球化学判别标志的探讨——以鄂尔多斯盆地为例. 沉积学报, (02): 365-372.
- 王莹, 熊先孝, 2023. 中国磷矿成矿系列、成矿规律与找矿方向. 地球学报, 44(04): 625-634.
- 韦恒叶, 2012. 古海洋生产力与氧化还原指标——元素地球化学综述. 沉积与特提斯地质, 32(02): 76-88.
- 邢介奇, 张泽阳, 鲜海洋, 等, 2022. 贵州织金磷矿稀土富集机制、赋存状态及可利用性. 矿物岩石地球化学通报, 41(03): 505-516+463-464.
- 杨海英, 赵志芳, 王涛, 等, 2025. 滇东北早寒武世羊场磷矿沉积环境及稀土富集特征浅析. 矿物岩石地球化学通报, 1-20.
- 杨瑞东, 毛铁, 陈吉艳, 等, 2017. 黔中寒武系底部磷块岩沉积特征. 矿物学报, 37(04): 448-455.
- 岳维好, 黄艳华, 刀听红, 2022. 上扬子西南缘云南镇雄县羊场超大型优质磷矿地质特征及资源潜力. 地质通报, 41(05): 846-856.
- 张帅, 罗冰, 汪泽成, 等, 2025. 四川盆地德阳—安岳克拉通内裂陷成因及其与原特提斯洋的联系. 天然气工业, 45(02): 37-50.
- 周进高, 沈安江, 张建勇, 等, 2018. 四川盆地德阳—安岳台内裂陷与震旦系勘探方向. 海相油气地质, 23(02): 1-9.