

· 磷矿成矿作用及找矿方向 ·

亚洲最大规模隐伏单体富磷矿床羊场磷矿深部找矿突破及其意义

杨淑胜^{1,2,3}, 王路^{1,2,3}, 王云晓⁴, 米云川^{1,2,3}, 董涛^{1,2,3,5}, 黄太平^{1,2,3,5},
王枫^{1,2,3}, 余中明⁴, 段文婷⁴

(1. 云南省地质调查院(云南省地质科学研究院), 云南昆明 650216; 2. 自然资源部三江成矿作用及资源勘查利用重点实验室, 云南昆明 650051; 3. 云南省三江成矿作用及资源勘查利用重点实验室, 云南昆明 650051; 4. 云南省地质勘查基金管理中心, 云南昆明 650224; 5. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南昆明 650093)

摘要: 羊场磷矿床位于镇雄县城西北部, 地处碗厂镇庆坝村-盐源镇(羊场)廖叶坝村一带。矿床具有资源储量大、矿石品质优、资源分布集中的特点, 为目前亚洲最大规模隐伏单体富磷矿床, 位居全球第5位。矿床成因类型为赋存于下寒武统梅树村组(ϵ_1ms)的浅海相沉积型磷块岩矿床, 矿体呈层状隐伏于羊场背斜, 总体上矿体由东往西, 矿化有变富趋势。目前, 羊场磷矿取得了深部找矿重大突破, 揭露3层磷矿体, 在祝家厂、冯家沟和庆坝村3个普查区累计探获磷矿石推断资源量 I + II + III 品级矿石量 27.00×10^8 t, 平均厚度 36.77 m, P_2O_5 平均品位 22.94%, 磷矿潜在资源 132.0×10^8 t, 有效提升了我国磷矿资源接续能力, 实现我国紧缺战略性矿产深部找矿突破, 潜在经济价值和社会效益巨大。通过项目成果系统总结早寒武世梅树村期磷矿床的形成机理及富集规律, 建立了一套有效的深部磷矿找矿技术体系, 有助于进一步完善和丰富早寒武世磷矿的成矿理论, 对滇东北地区隐伏磷矿床的勘探和开发具有重要的指导意义。羊场超大型磷矿的发现, 实现深部隐伏磷矿找矿技术重大突破, 大幅扩大云南省磷矿保有资源量, 为加强重要能源矿产资源增储上产、做实做大云南省资源经济、打造千亿级全国重要磷化工产业基地奠定了坚实的资源基础, 为维护能源资源安全和粮食安全“国之大者”提供了坚强的资源保障。

关键词: 梅树村组; 羊场背斜; 隐伏单体富磷矿床; 羊场磷矿; 云南镇雄; 亚洲

中图分类号: P619.21+3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2024)05-1073-13

Breakthrough in deep ore prospecting of Yangchang phosphate deposit, the largest concealed monomer phosphorus-rich deposit in Asia, and its significance

YANG Shu-sheng^{1,2,3}, WANG Lu^{1,2,3}, WANG Yun-xiao⁴, MI Yun-chuan^{1,2,3}, DONG Tao^{1,2,3,5}, HUANG Tai-ping^{1,2,3,5},
WANG Feng^{1,2,3}, SHE Zhong-ming⁴ and DUAN Wen-ting⁴,

(1. Yunnan Institute of Geological Survey (Yunnan Institute of Geological Sciences), Kunming 650216, China; 2. Key Laboratory of Sanjiang Metallogeny and Resources Exploration and Utilization, Ministry of Natural Resources, Kunming 650051, China; 3. Yunnan Key Laboratory of Sanjiang Metallogeny and Resources Exploration and Utilization, Kunming 650051, China; 4. Yunnan Geological Survey Foundation Management Center, Kunming 650224, China; 5. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: The Yangchang phosphate deposit in the northwest Zhenxiong County is located at the area of Qingba Village in Wanchang Town to Liaoyeba Village in Yanyuan Town (also called Yangchang). The deposit has the characteristics of large reserves of resources, excellent ore quality and concentrated distribution of resources, and is currently the largest concealed monomeric phosphorus-rich deposit in Asia, ranking fifth in the world. The genetic

收稿日期: 2024-05-12; 接受日期: 2024-08-13; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 云南省地质勘查基金项目(D202001, K202101, Y202301, K202301)

作者简介: 杨淑胜(1974-), 男, 正高级工程师, 主要从事矿产勘查工作, E-mail: 3171261161@qq.com; 通讯作者: 王云晓(1972-), 女, 学士, 主要从事地质经济工作, E-mail: ygsycm@126.com。

type of the deposit is the shallow marine sedimentary type phosphorite deposit in the Lower Cambrian Meishucun Formation (ϵ_1ms). The ore body is stratified and concealed in the Yangchang anticline. Generally, the ore body develop from east to west, and the mineralization tends to be richer. To date, the Yangchang phosphate deposit has made a major breakthrough in deep mining, revealing 3 layers of phosphorite depositions, and the inferred phosphorus ore resources of grade I + II + III have been discovered in 3 survey areas (Zhujiachang, Fengjiagou and Qingba Village) has a cumulative mineral thickness of 36.77 m and an average P_2O_5 grade of 22.94%. The potential phosphorite resources estimated as 132.0×10^8 t, which effectively improves the capacity of phosphorus resources in the country, achieves the deep prospecting breakthrough of strategic minerals in short supply in the country, and has huge potential economic value and social benefits. In this paper, the formation mechanism and enrichment of the early Cambrian Meishucun phosphorus deposit is summarized systematically through the prospecting project results, and an effective deep phosphorite prospecting technology is established, which is helpful to further improve the ore-forming theory of early Cambrian phosphorus deposit, and with important guiding significance for the exploration and development of concealed phosphorus deposits in northeast Yunnan. The discovery of the super large phosphorus deposit in Yangchang has achieved a major breakthrough in deep concealed phosphorus deposit prospecting technology, greatly expanded the amount of phosphorus resources available in Yunnan Province, and laid a solid resource foundation for strengthening the storage and production of important energy and mineral resources, punning the resource economy of Yunnan Province, and building a national important phosphorus chemical industry base of 100 billion. It also provides a strong resource guarantee for the maintenance of energy and resources security of the nation.

Key words: Meishucun Formation; Yangchang anticlinal; concealed monomeric phosphorus-rich deposit; Yangchang phosphate deposit; Zhenxiong, Yunnan; Asia

Fund support: Geological Exploration Fund Project of Yunnan Province (D202001, K202101, Y202301, K202301)

磷是我国新一轮找矿突破战略行动确定的战略性矿产,随着磷在新能源领域的应用,未来需求将进一步加大。当前,我国众多大型磷矿床尤其是地表或近表矿出现勘查开发殆尽现象,急需找寻新的磷矿资源接续区,以保障我国磷矿资源的稳定供给。磷矿是可用尽且不可再生的世界级稀缺资源,作为重要的基础原材料,需求量逐年上升,大规模隐伏富磷矿床的新发现和勘查难度在增大,亟须理论技术创新,随着全球对战略性关键矿产资源的掌控需求,矿产资源供需格局加快重塑。近年来,羊场磷矿取得了深部找矿重大突破,有效提升了我国磷矿资源接续能力,为维护能源资源安全和粮食安全“国之大者”提供了坚强的资源保障。

当今,世界各国围绕战略性矿产资源的竞争日趋激烈,全球矿业市场供需格局在不断深度调整,尤其是战略性矿产资源的安全供给是国家经济安全的重要保障,实施矿产资源的优化配置已是全球共识。磷矿主要应用于新能源、新材料等战略性新兴产业及农业、化工、国防等领域,具有不可替代的战略地位。全球磷矿石分布不均匀,主要集中于摩洛哥、中

国等国家(陈喜峰等, 2021)。根据自然资源部 2023 年统计并发布的数据显示,截至 2022 年底,全球磷矿石储量 720×10^8 t, 中国磷矿储量 36.9×10^8 t, 占全球比例 5.12%, 位居全球第 2 位, 云南省磷矿储量 13.35×10^8 t, 占全国比例 36.18%, 位居全国第 1 位。新发现的羊场超大型磷矿潜在资源 132.41×10^8 t, 占全球比例 18.39%, 位居全球第 5 位。

羊场磷矿位于镇雄县城北西方向,地处碗厂镇庆坝村-盐源镇(羊场)蓼叶坝村一带,为早寒武世梅树村期浅海相沉积型层状磷块岩矿床,矿体赋存于梅树村组碳酸盐岩含磷岩系中;沉积环境为浅海碳酸盐台地干热潮坪环境,沉积相为潮上-潮间间歇高能富白云岩、磷块岩相(杨志鲜等, 2016; 米云川等, 2021),由北西往南东海水逐渐变深,矿化变弱,矿体从聚磷盆地中心向周边有变薄趋势;含矿建造主要为含磷白云岩、磷质岩、磷块岩、硅质岩建造(米云川等, 2021)。

早寒武世梅树村期,该地区磷矿的形成与岩相古地理位置相关(戈宏儒等, 1983; 夏学惠等, 1989),在海侵背景下接受沉积,形成由含磷白云岩、

磷块岩、硅质岩等组成的含磷建造(金振奎等, 2013; 王鹏万等, 2016; 梁永忠等, 2018; 张君等, 2018; 杨豫川等, 2019; 夏亮亮等, 2022)。由于该地区处于低纬度热带信风区, 受海侵及上升洋流作用使梅树村期成为主要成磷时期, 形成重要的磷矿成矿带(刘发禄等, 1985; 邓小林等, 2007, 2009; 岳维好等, 2012; 李佐强等, 2023)。该地区磷矿床类型主要为浅海相沉积型磷块岩矿床, 赋矿地层梅树村组为一套浅海碳酸盐和磷酸盐沉积, 岩性主要为灰岩、白云岩、内碎屑磷块岩、硅质岩等(陈志明等, 1987; 曾允孚等, 1987, 1994; 骆学全, 1993; 刘永先等, 1994; 周传明等, 1997; 东野脉兴, 2001; 杨帆等, 2011; 李皎等, 2014; 王聚杰等, 2015; 米云川等, 2021; 刘建清等, 2022)。早寒武世梅树村期, 磷质来源丰富, 在物理、化学和生物作用下, 其古构造、古地理、古气候条件易形成大型磷矿带和聚集区(牟南等, 2005; 王登芳等, 2016; 李佐强等, 2023)。磷矿层呈层状、似层状产出, 磷矿石自然类型主要为致密块状、条带(纹)状磷块岩, 矿石结构以内碎屑结构为主, 少量为凝胶状结构, 内碎屑以磷质砂、砾屑为主, 少量鲕屑、团粒, 砂、砾屑含量越高, 矿石品位越富。因此, 该地区磷矿石品位与沉积环境相关(杨杰东等, 1989; 杨海英等, 2020; 米云川等, 2021)。

羊场磷矿床具有资源储量大、矿石品质优、资源分布集中的特点, 为目前亚洲最大规模隐伏单体富磷矿床。羊场超大型隐伏磷矿的发现, 实现了深部隐伏磷矿找矿技术重大突破, 大幅扩大云南省磷矿保有资源量, 为加强重要能源矿产资源增储上产、做实做大云南省资源经济、打造千亿级全国重要磷化工产业基地奠定了坚实的资源基础, 有效助推乌蒙山特困地区区域经济发展, 并成为乌蒙山区脱贫攻坚与区域发展的有力推手和技术支撑, 对维护国家经济安全和推动云南经济高质量发展, 具有十分重要的意义。

1 矿床发现及评价过程

羊场磷矿最早于1978年由云南地矿局第八地质队在滇东北地区开展钾盐普查时发现, 2007~2010年, 由云南省地质调查局承担云南省矿产资源潜力评价工作, 在开展云南省磷矿资源潜力评价时, 以“羊1井”钻孔成果为基础, 对该地区磷矿进行了资

源潜力预测, 2018年, 成都地质调查中心在羊场地区开展了磷矿调查评价工作。2013年以来, 云南省地质调查院在该地区分4个阶段开展磷矿勘查评价工作。

2013~2016年, 云南省地质调查院在云南乌蒙山区开展优势矿产资源调查评价, 综合分析区域内典型矿床成矿地质体特征、成矿构造与成矿作用特征基础上, 构建矿集区“三位一体”找矿预测地质模型, 解决了该地区制约找矿的关键地质科学问题, 进一步打开了区域找矿空间。

2017~2019年, 云南省地质调查院在羊场磷矿及其周边地区开展1:5万矿产地质调查工作, 通过资源潜力评价, 圈定羊场磷矿A类找矿靶区, 预测羊场磷矿区埋深1500m以浅, 潜在磷矿资源达 132.0×10^8 t, 其中埋深1000m以浅, 潜在磷矿资源 103.0×10^8 t, 显示该地区具备寻找超大型磷矿的资源潜力。

2020~2022年, 云南省地质调查院在羊场磷矿区西段祝家厂、冯家沟和庆坝村3个普查区开展磷矿勘查工作, 经过钻探施工验证, 首次采用天然场音频大地电磁法剖面进行勘查, 创新性采用三维矿体定位模型, 结合综合地质要素法开展隐伏磷矿资源潜力预测, 探获I+II+III品级磷矿石推断资源量 27.00×10^8 t。

2023~2025年, 基于以往矿区勘查成果, 继续对羊场磷矿区东段高寨、蓼叶坝、柏香坝3个普查区开展磷矿普查工作, 系统查明矿体特征和资源状况, 预期提交磷矿石推断资源量 25.0×10^8 t。通过项目实施系统总结早寒武世梅树村期磷矿床的形成机理及富集规律, 构建羊场磷矿床成矿模式, 确定有效的沉积学勘查指标体系, 为后续磷矿勘查提供指导。

2 成矿地质环境

2.1 大地构造及古地理

矿床位处滇东被动陆缘(VI-2-4)-昭通陆棚(VI-2-4-1), 属滇东北早寒武世“二隆三洼”古地理格局之硝滩-羊场聚磷盆地东段, 夹持于巧家-莲峰断裂、康定-彝良-水城断裂、弥勒-师宗-水城断裂及紫云-大方-毕节断裂圈闭的菱形夹块中(图1b)。成矿区带所属硝滩-羊场聚磷盆地东段磷矿田(V2)的镇雄-威信成磷区(图1c), 后期上覆沉积物过厚, 磷矿体隐伏于地下深部, 地表未出露(米云川等, 2021)。区域内矿产以沉积矿产为主, 磷矿为优势矿

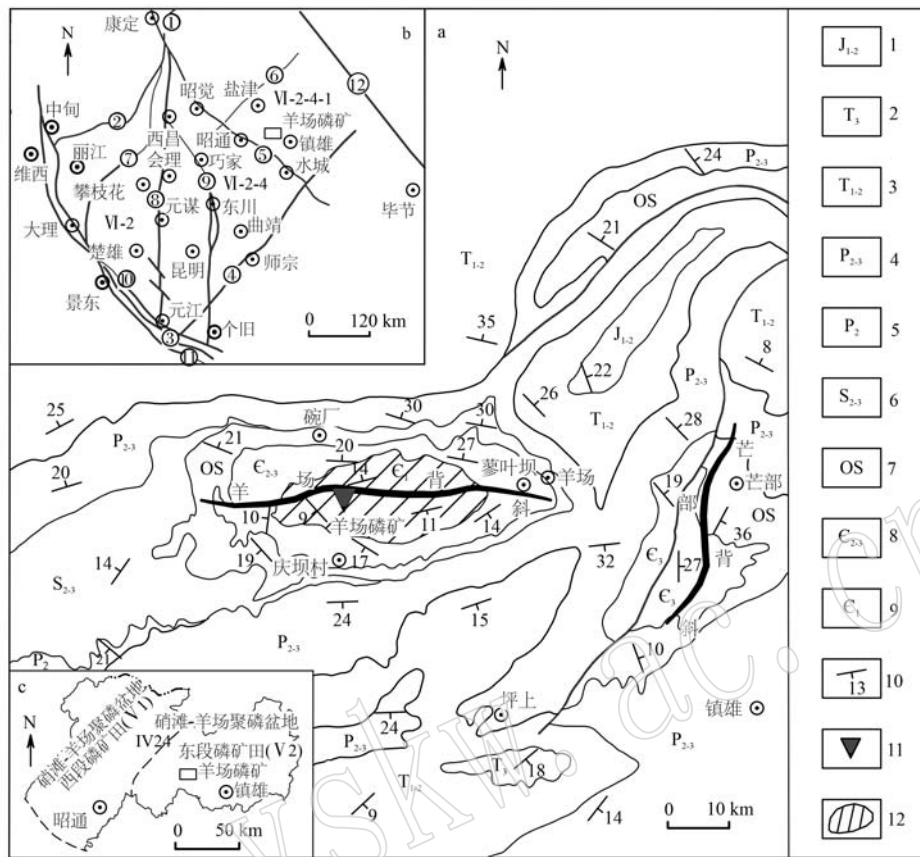


图1 云南镇雄地区羊场磷矿矿区区域地质图[据米云川等(2021)修编]

Fig. 1 Regional geological map of the Yangchang phosphate deposit in the Zhenxiong area, Yunnan(modified from Mi Yunchuan *et al.*, 2021)

VI-2—上扬子古陆块; VI-2-4—滇东被动陆缘; VI-2-4-1—昭通陆棚; IV24—镇雄-巧家-会泽(断褶带)Pb-Zn-Ag-Fe-REE-Al-P-煤-煤层气成矿带; 1—下-中侏罗统; 2—上三叠统; 3—下-中三叠统; 4—中-上二叠统; 5—中二叠统; 6—中-上志留统; 7—奥陶系-志留系; 8—中-上寒武统; 9—下寒武统; 10—地层产状; 11—隐伏磷矿; 12—下寒武统分布范围; ①—龙门山断裂; ②—小金河—中甸断裂; ③—哀牢山断裂; ④—弥勒—师宗—水城断裂; ⑤—康定—彝良—水城断裂; ⑥—巧家—莲峰断裂; ⑦—箐河—程海断裂; ⑧—安宁河—绿汁江断裂; ⑨—小江断裂; ⑩—红河断裂; ⑪—九甲—安宁断裂; ⑫—毕节—大方断裂

VI-2—Upper Yangtze block; VI-2-4—East Yunnan passive continental margin; VI-2-4-1—Zhaotong continental shelf; IV24—Zhenxiong-Qiaojia-Huize(fault-fold belt) Pb-Zn-Ag-Fe-REE-Al-P-coal-CBM metallogenic belt; 1—Lower-Middle Jurassic; 2—Upper Triassic; 3—Lower-Middle Triassic; 4—Middle-Upper Permian; 5—Middle Permian; 6—Middle-Upper Silurian; 7—Ordovician-Silurian; 8—Middle-Upper Cambrian; 9—Lower Cambrian; 10—stratum occurrence; 11—concealed phosphorite deposit; 12—Lower Cambrian; ①—Longmenshan Fault; ②—Xiaojinhe-Zhongdian Fault; ③—Ailaoshan Fault; ④—Mile-Shizong-Shuicheng Fault; ⑤—Kangding-Yiliang-Shuicheng Fault; ⑥—Qiaojia-Lianfeng Fault; ⑦—Qinghe-Chenghai Fault; ⑧—Anninghe-Lvzhijiang Fault; ⑨—Xiaojiang Fault; ⑩—Honghe Fault; ⑪—Jiujia-Anning Fault; ⑫—Bijie-Dafang Fault

产(图1a)。

扬子地台早寒武世磷块岩分布于西缘之龙门山断裂、丽江—木里断裂以及红河断裂之东侧,但主要矿床均分布于滇中古陆与牛首山古陆间之昆明凹陷、滇东台陷内(图2b)(杨志鲜等, 2016)。早寒武世时期,由于当时地壳活动导致壳下物质上升,磷质汇集于大洋深部,形成洋底富磷海水,其在一定的纬度部位由洋流携带并上翻于大陆边缘的浅海区域,在其适合的古地理环境中沉积形成磷块岩矿床(杨志鲜等, 2016; 米云川等, 2021)。

通过沉积相环境分析,成磷环境为潮坪相带(图2a),潮间坪中高能水动力潮间滩是最有利于磷块岩形成、长期保持有利的浅水环境,由于潮汐、波浪的反复作用,使磷颗粒簸选富集,易形成较富厚的大型磷块岩矿床。

2.2 成矿构造

矿区构造主要为轴向近东西向羊场背斜,磷矿体隐伏于背斜核部,断裂较不发育,局部见北东走向的小规模陡倾张性裂隙(图3a)。地表未出露梅树村组(ϵ_1ms)和灯影组(Z_2dn),仅在钻孔中揭露到,其

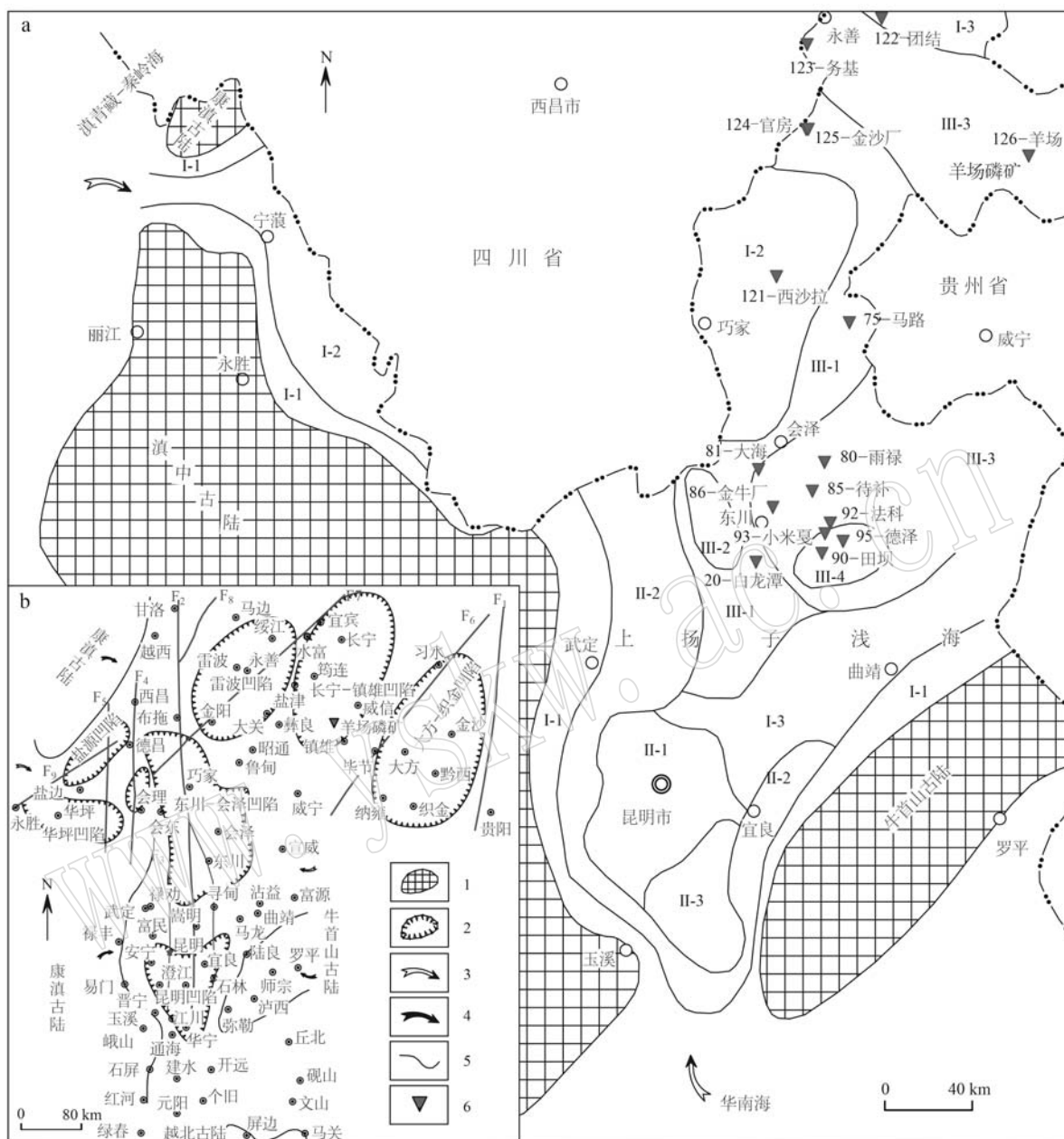


图2 下寒武统磷矿沉积岩相及古地理图[据杨志鲜等(2016)、米云川等(2021)修编]

Fig. 2 Paleogeographic and lithofacies map of Lower Cambrian phosphate deposit(modified from Yang Zhixian *et al.*, 2016; Mi Yunchuan *et al.*, 2021)

1—古陆; 2—凹陷; 3—海流方向; 4—物源方向; 5—沉积相带边界线; 6—磷矿床(点); I—潮坪相; I-1—潮上带含陆源碎屑白云岩相; I-2—上部潮间带含磷块岩砾、砂屑白云岩相; I-3—上部潮间带含磷块岩砂屑粉砂质白云岩相; II—开阔台地相; II-1—下部潮间高能带含白云岩、磷块岩相; II-2—潮间—潮下高能带内砂屑白云岩、磷块岩相; II-3—潮间—潮下间歇高能带含粉砂岩、白云岩、磷块岩相; III—滩后泻湖相; III-1—潮间带白云岩、磷块岩浅滩相; III-2—潮间—潮下带粉砂岩、泥岩、磷块岩、白云岩相; III-3—潮间—潮下间歇高能富白云岩、磷块岩相; III-4—潮下低能带含粉砂硅质岩、磷块岩相

1—ancient land; 2—dents; 3—oceanic current direction; 4—source direction; 5—boundary of sedimentary facies zone; 6—phosphorus deposit (spot); I—tidal-flat facies; I-1—supratidal zone containing terrigenous clastic dolomite facies; I-2—upper intertidal zone containing phosphorus-block gravel and arenaceous dolomite facies; I-3—upper intertidal phosphorus-bearing block arenaceous silty dolomite facies; II—open platform facies; II-1—lower intertidal high energy zone containing dolomite and phosphorite lithofacies; II-2—intertidal and subtidal arenaceous dolomite and phosphorite lithofacies in high energy zone; II-3—intertidal and subtidal intermittent high energy zone containing siltstone, dolomite and phosphorite lithofacies; III—beachfront lagoon facies; III-1—intertidal dolomite and phosphorite shoal facies; III-2—intertidal dolomite, phosphorite shoal facies intertidal-subtidal siltstone, mudstone, phosphorite, dolomite facies; III-3—intertidal and subtidal intermittent high energy dolomite and phosphorus-block lithofacies; III-4—subtidal low energy band containing silty siliceous rocks and phosphorous lithofacies

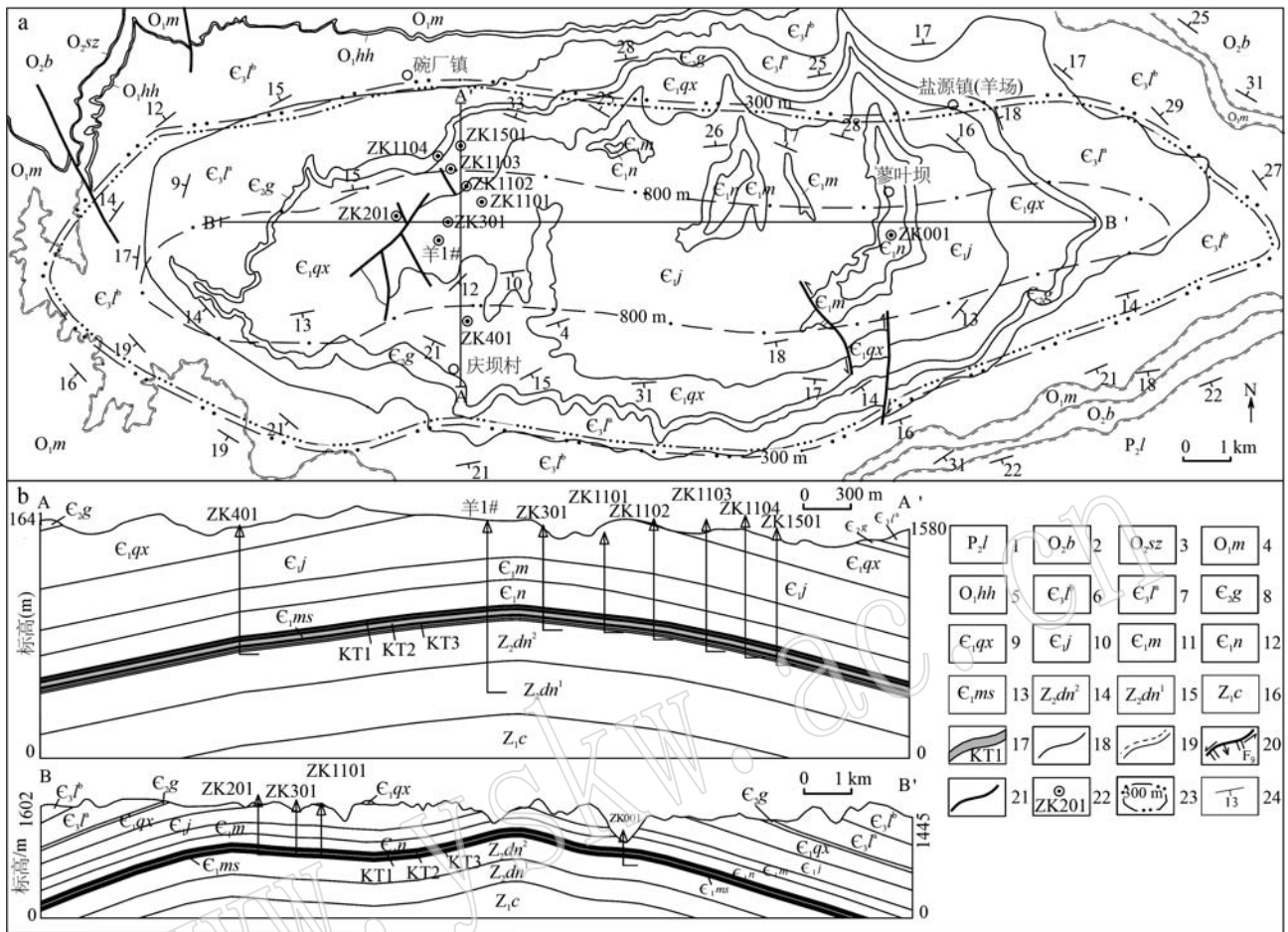


图3 羊场磷矿矿区地质图[据米云川等(2021)修编]

Fig. 3 Geological map of the Yangchang phosphate deposit ore district(modified from Mi Yunchuan *et al.*, 2021)

1—龙潭组; 2—宝塔组; 3—十字铺组; 4—涪潭组; 5—红花园组; 6—娄山关组二段; 7—娄山关组一段; 8—高台组; 9—清虚洞组; 10—金顶山组; 11—明心寺组; 12—牛蹄塘组; 13—梅树村组; 14—灯影组二段; 15—灯影组一段; 16—澄江组; 17—隐伏磷矿体; 18—地质界线; 19—平行不整合界线; 20—正断层及编号; 21—性质不明断层; 22—见矿钻孔及编号; 23—资源量预测边界及高程; 24—地层产状

1—Longtan Formation; 2—Baota Formation; 3—Shizipu Formation; 4—Meitan Formation; 5—Honghuayuan Formation; 6—second member of Loushanguan Formation; 7—first member of Loushanguan Formation; 8—Gaotai Formation; 9—Qingxudong Formation; 10—Jindingshan Formation; 11—Mingxinsi Formation; 12—Niutitang Formation; 13—Meishucun Formation; 14—second member of Dengying Formation; 15—first member of Dengying Formation; 16—Chengjiang Formation; 17—concealed phosphorus deposit; 18—geological boundary; 19—parallel unconformity boundary; 20—normal fault and number; 21—fault with unknown nature; 22—discovery drill hole and number; 23—predicted boundary of resource and elevation; 24—stratum occurrence

中梅树村组(ϵ_1ms)是区内磷矿赋存层位。核部地层产状较缓,倾角 $3^{\circ}\sim 10^{\circ}$;翼部地层产状变陡,倾角 $15^{\circ}\sim 43^{\circ}$,两翼基本对称(图3b)。据钻孔揭露情况,断层往深部延伸有限,对矿层影响较小。

2.3 含磷岩系

含磷岩系为下寒武统梅树村组(ϵ_1ms),地表未出露,仅在钻孔中揭露(图3b),厚度70.10~127.91 m,由一套深灰色、灰黑色碳酸盐岩、磷块岩及硅质岩等

组成,其沉积环境为浅海碳酸盐台地干热潮坪环境,沉积相为潮上-潮间带高能富白云岩、磷块岩相(图2a)。

上覆牛蹄塘组(ϵ_1n):灰绿色、深灰色薄-中层状粉砂岩夹灰黑色炭质页岩,底部灰黑色含浅黄色黄铁矿(呈透镜体顺层分布)炭质粉砂岩是磷矿层顶板作为直接找矿标志。厚度大于181.71 m。

含磷层梅树村组(ϵ_1ms):深灰色、灰黑色薄-中

厚层状、致密块状、条纹(带)状含磷白云岩、砾屑砂屑磷块岩、含磷硅质白云岩及含磷硅质岩等是重要的层位找矿标志,厚度 70.10~127.91 m。上部为 KT2 矿体顶板,局部地段零星富集成矿(KT1),以低品位矿为主,零星见Ⅲ品级矿,连续性较差。岩性为灰色、深灰色薄至中层状微-粉晶砂屑灰质白云岩、砂屑白云岩、含磷质砂屑灰岩、含灰质白云质砂屑磷块岩等,黑色磷质砂屑呈条纹、条带稀疏分布;中部为 KT2、KT3 矿体赋存位置,岩性为深灰色、灰黑色薄-中厚层状、致密块状、条纹(带)状含磷白云岩、砾屑砂屑磷块岩等。黑色胶磷矿砂屑相对聚集呈条纹、条带顺层分布,局部见少量砾屑分布,砾屑呈长条状、次棱角状,其成分主要为胶磷矿,黑色胶磷矿条纹、条带与浅色白云石、方解石聚集条带接触面相对平整,少部分波状起伏。浅色白云石、方解石含量增多形成条(纹)带变厚,黑色胶磷矿条(纹)带逐渐变薄;下部为 KT3 矿体底板,岩性为灰色、深灰色薄至中层状微-粉晶灰质白云岩、含磷硅质白云岩、砂屑灰岩及含磷硅质岩,偶见炭质页岩等,局部见黑色硅质条带及稀疏断续磷质条带顺层分布。

下伏灯影组(Z_2dn):灰色、浅灰绿色中至厚层状、条带状微-粉晶白云岩,顶部为深灰色炭质白云岩、含灰质硅质白云岩,厚度大于 124.24 m。

2.4 成矿特征

2.4.1 矿体形态

矿体产于羊场复式背斜深部下寒武统梅树村组中,磷矿层分布面积广,矿化连续性好,主磷矿层赋存于梅树村组二段(ϵ_1ms^2)。矿体呈层状沿背斜核部及两翼近平行顺层产出,矿层、岩层二者产状基本一致,总体走向与背斜轴向一致,呈近东西向,局部为北东-南西向,核部倾角较缓,一般 $2^\circ\sim6^\circ$;倾向与背斜两翼倾向一致,翼部倾角较陡,北西翼倾向 $290^\circ\sim330^\circ$,倾角 $5^\circ\sim13^\circ$,南东翼倾向 $90^\circ\sim150^\circ$,倾角 $4^\circ\sim13^\circ$ 。磷矿体主要产于梅树村组中下部(图 4),根据磷矿层垂向上分布特点,其结构类型划为多层型,可分为上、中、下 3 个矿层(KT1、KT2、KT3),表明磷酸盐聚集的多期性。主矿层为中矿层(KT2)东西向控制长 15.0 km,南北向控制宽 7.5 km,矿体厚度 17.85~43.31 m,平均 32.64 m, P_2O_5 品位 15.78%~25.43%,平均 24.03%,其中 I 级品矿石厚度 1.96~12.80 m,平均 5.47 m, P_2O_5 品位平均 30.72%。目前,钻探控制矿体埋深 424.78~1 051.08 m 不等,分布标高 543.20~1 025.79 m(图 3b)。矿体沿走向由

西往东矿体厚度变薄,矿化有变弱趋势,沿倾向由背斜轴部往南北两翼矿体厚度较稳定,矿化稍有变弱趋势。

2.4.2 矿石组构及矿物成分

矿石中主要组成矿物为胶磷矿,脉石矿物为石英、方解石及白云石等,金属矿物主要为黄铁矿;化学成分主要为 Ca 及 P,含有少量 Si、Mg、S 及 Fe 等元素,P 元素均赋存于胶磷矿内,Ca 元素主要赋存于胶磷矿内,少量赋存于方解石、白云石内,Mg 元素赋存于白云石内,Si 元素主要赋存于石英内,S 元素主要赋存于黄铁矿内;矿石结构以内碎屑(粉屑、砂屑、砾屑)结构为主,局部为凝胶状结构、球粒及团块结构,少见鲕状结构(图 5d、5e);构造以致密块状、条纹(带)状构造为主(图 5a、5b、5c);矿石自然类型主要有致密块状、条纹(带)状磷块岩,工业类型为碳酸盐型、混合型-碳酸盐型、混合型磷矿,以混合型为主;工业矿石品级为 I、II、III 品级,以 I、II 品级为主。

2.5 矿床成因模式

早寒武世梅树村期是磷质富集时期,羊场磷矿位处当时上扬子陆表海西南边缘,其北西、南西、南东三面紧临古陆,来自华南海、滇青藏-秦岭海广海的富磷海水从南东、北西方向侵入硝滩-羊场聚磷盆地,流速由急变缓,由于大规模海侵和上升洋流以及风暴事件影响,上升洋流把富磷的海水带到浅海地带时,由于太阳热能和地球自转引起的地壳上部海水搅动, CO_2 逸出,海水中 P_2O_5 形成过饱和状态,压力降低,温度升高,pH 值增高,磷质因胶体化学、生物化学作用,以胶体-化学形式发生凝聚富集、沉积,使磷以磷酸钙、凝胶状磷块岩等共生沉积的磷质层的形式沉积于浅海地带的边缘上,形成半固结状态磷酸盐沉积物。

早寒武世梅树村期正是羊场聚磷盆地微生物繁衍的重要时期,经过微生物的分解、转化对磷的溶解、迁移、富集和叠加改造再沉积,由化学凝聚和加积作用使半固结的磷酸盐沉积物在波浪和潮汐的作用下遭到破碎、搬运、再沉积而形成物理异化颗粒,使磷以胶体-化学的形式发生凝聚富集复合而成矿。

后期经多期次水流、波浪与潮汐反复作用,使处于半固结状态的磷酸盐沉积物遭到破碎、搬运、磨蚀、再沉积,经过海水的冲刷作用,使磷颗粒簸选富集再次发生沉淀,经压实、固结重新胶结再造成岩成矿,成矿后期受羊场背斜叠加改造,形成北西矿层富厚,南东逐渐变贫薄的海相沉积碳酸盐岩型层状磷

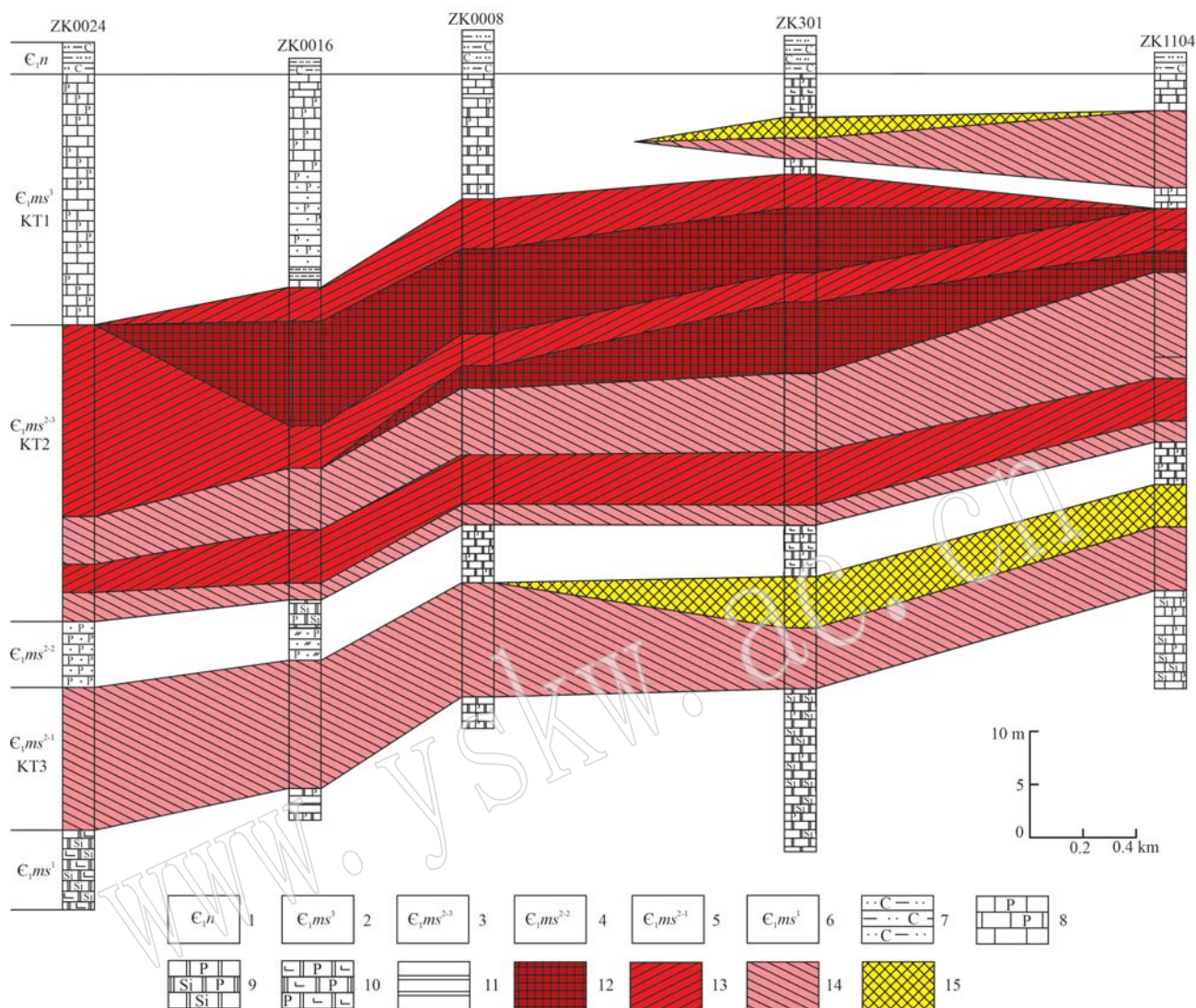


图4 羊场磷矿区0线矿层结构类型垂向对比图

Fig. 4 Vertical Comparison of ore layer structure type of sections(0) in Yangchang phosphate deposit

1—牛蹄塘组; 2—梅树村组三段; 3—梅树村组二段三层; 4—梅树村组二段二层; 5—梅树村组二段一层; 6—梅树村组一段; 7—含炭泥质粉砂岩; 8—含磷灰岩; 9—含磷硅质白云岩; 10—含磷灰质白云岩; 11—硅质岩; 12—I 品级磷矿层; 13—II 品级磷矿层; 14—III 品级磷矿层; 15—低品位磷矿层

1—Niutitang Formation; 2—the third member of Meishucun Formation; 3—the third layer of the second member of Meishucun Formation; 4—the second layer of the second member of Meishucun Formation; 5—the first layer of the second member of Meishucun Formation; 6—the first member of Meishucun Formation; 7—charcoal-bearing siltstone; 8—phosphate-bearing limestone; 9—phosphate-bearing siliceous dolomite; 10—phosphate-bearing calcareous dolomite; 11—siliceous rock; 12—grade I phosphate ore layer; 13—grade II phosphate ore layer; 14—grade III phosphate ore layer; 15—low-grade phosphate ore layer

块岩矿床(图6)。

3 深部找矿突破的意义

羊场磷矿床具有资源储量大、矿石品质优、资源分布集中的特点,矿区及其外围埋深1 000 m 以浅的潜在磷矿资源 103.0×10^8 t,分布面积 120 km²。目

前,经过钻探施工验证的面积为 25.82 km²,外围尚有 94.18 km² 范围未开展勘查工作。通过项目实施有助于进一步完善和丰富早寒武世磷矿的成矿理论,对滇东北地区隐伏磷矿床的勘探和开发具有重要的指导意义。

(1) 羊场聚磷盆地近东西向展布,为台地边缘织金聚磷盆地北西段次级拗陷地,磷矿资源潜力巨

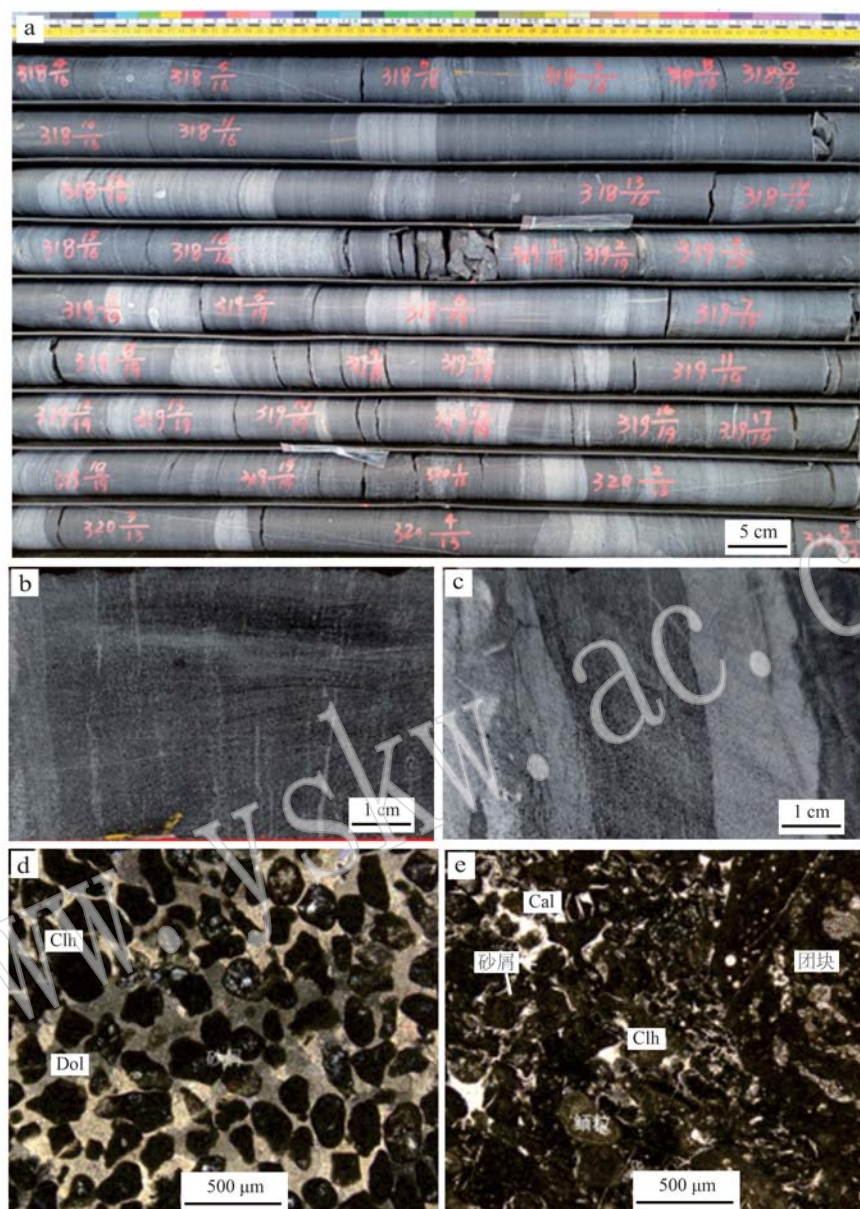


图5 羊场磷矿磷块岩矿石结构构造特征

Fig. 5 Ore textures and structure of phosphorite from the Yangchang phosphate deposit

a—潮汐层理磷块岩; b—灰黑色致密块状砂屑磷块岩; c—灰黑色条纹(带)状砂屑磷块岩; d—砂屑呈次棱角状、

次圆状,由胶磷矿组成; e—粒屑由砂屑、鲕粒及团块组成

a—tidal bedded phosphorite; b—gray black dense massive sand cuttings phosphorite; c—gray black striped banded sand cuttings phosphorite;

d—sand cuttings showing sub-angular and sub-circular, and consist of phosphorite; e—grains consist of sand cuttings oolites and agglomerates

大,经过钻孔施工验证,羊场地区下寒武统梅树村组富含丰富的磷矿,具有良好的找矿前景。通过解析赋矿层位各岩性段岩石矿物(组合)特征、沉积(微)相类型、沉积环境与时空分布规律,重建其古地理环境;查明磷质来源、迁移过程及富集机制,建立矿床成矿模式;确定有效的沉积学勘查指标体系,为后续磷矿勘查提供指导。

(2) 创新性采用“三维矿体定位模型”结合“综合地质要素法”开展隐伏磷矿资源潜力预测,预测羊场磷矿及其外围埋深 1 000 m 以浅潜在磷矿资源 103.0×10^8 t,埋深 1 500 m 以浅潜在磷矿资源 132.0×10^8 t。经过后续钻孔验证,探获资源量与预测情况基本吻合,预测方法可行。

(3) 通过岩芯物性提取与对比研究,多维度地球

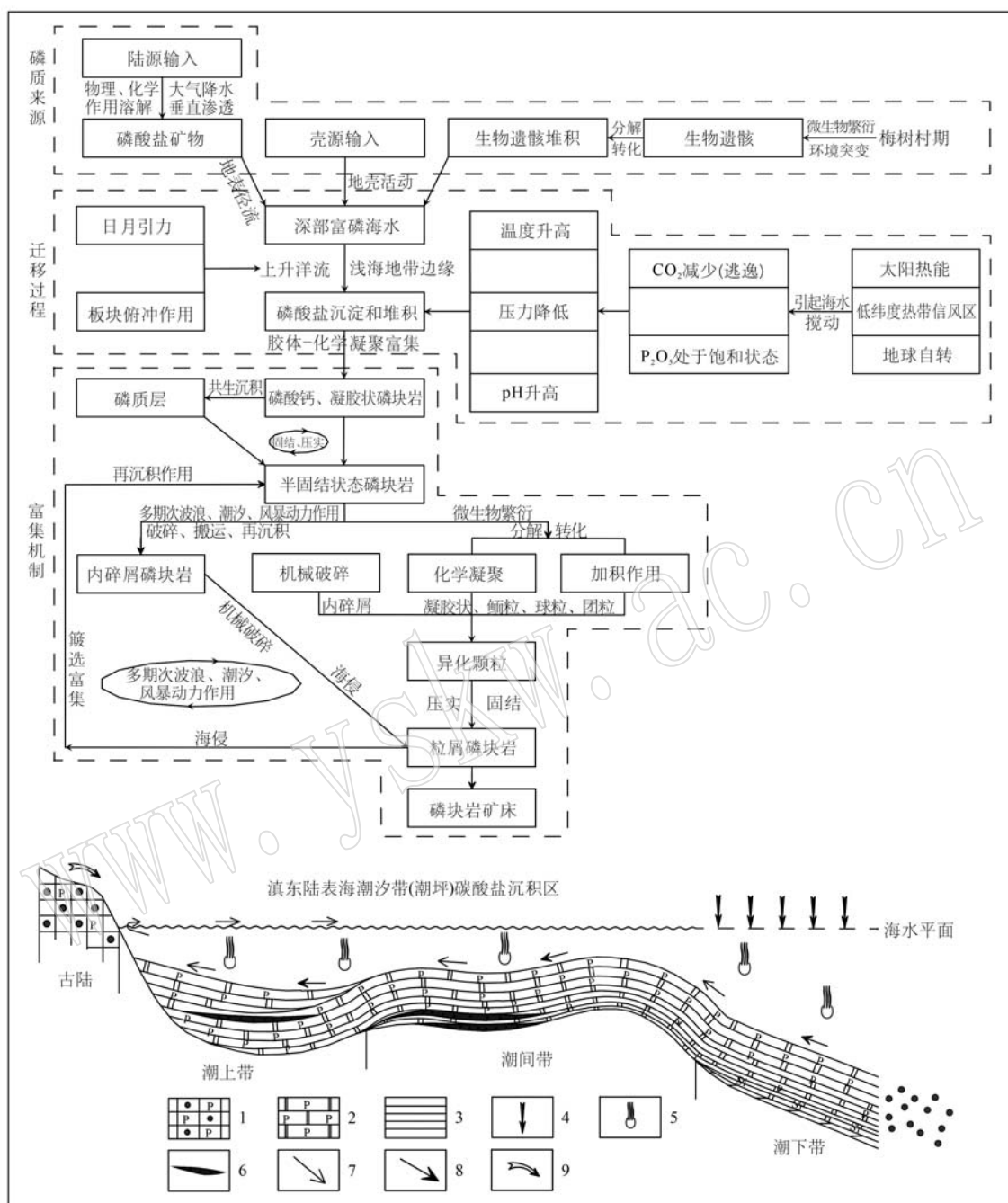


图6 羊场磷矿床成矿过程及模式图[据米云川等(2021)修编]

Fig. 6 Metallogenic process and ore forming model of the Yangchang phosphate deposit(modified from Mi Yunchuan *et al.*, 2021)

1—含磷基底岩系; 2—含磷白云岩; 3—硅质岩; 4—悬浮颗粒沉积方向; 5—浮游生物遗骸沉积; 6—砂屑磷块岩; 7—洋流方向;
8—壳源输入; 9—陆源输入

1—phosphorus bearing basement rock series; 2—phosphorus-bearing dolomite; 3—siliceous rock; 4—direction of suspended particle deposition;
5—plankton remains sediment; 6—sandstone phosphorite; 7—direction of oceanic current; 8—crustally derived input; 9—terrigenous input

物理等技术方法试验,探索针对隐伏磷矿床的科学高效的勘查评价技术体系,形成一套具有推广价值的典型隐伏磷矿集区高效的勘查评价技术体系。根

据该地区磷矿为隐伏矿且埋深大,含磷层富含黄铁矿及炭质等特点,首次采用天然场音频大地电磁法剖面进行勘查,发现了较好的找矿异常,钻探验证效

果良好,推断含磷层梅树村组埋深、断裂构造及含矿层位等变化情况,为深部找矿提供地球物理依据,指导钻探工程布置。经过钻探施工验证,物探推测异常与矿体位置基本吻合,音频大地电磁测深在隐伏磷矿勘查中具有较好的指导意义,可在该地区及邻区后续勘查中加以借鉴。

(4) 依托项目勘查成果,为国家及地方矿产资源规划、产业发展提供了基础资源支撑。项目找矿成果有力推动了后续磷矿勘查工作,矿床的发现和评价为云南省打造千亿级全国重要磷化工产业基地奠定了坚实的资源基础,为国家能源资源安全和粮食安全提供了资源保障,并将进一步促进地方经济及磷化工等产业高质量发展,社会经济意义重大。

致谢 衷心感谢两位审稿人提出的宝贵意见和编辑老师的帮助,感谢项目组同事在野外工作过程中的支持和帮助。

References

- Chen Xifeng, Yuan Chunhua, Chen Xiufa, *et al.* 2021. World Mineral Fact. Africa [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~614 (in Chinese with English abstract).
- Chen Zhiming and Chen Qiyong. 1987. Paleogeography of Yangzi platform and the characteristics of the phosphorite distribution of early Meishucun stage, early Cambrian[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 22(3): 246~257 (in Chinese with English abstract).
- Deng Xiaolin, Yao Chaomei, Jiang Xinhua, *et al.* 2007. The formation and concentration of the phosphorite between southwest Sichuan Province and northeast Yunnan Province[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 29(3): 139~140 (in Chinese with English abstract).
- Deng Xiaolin, Yao Chaomei, Wang Jiping, *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 Maixing. 2001. Regional ore-forming regulation of phosphorite in Yangtze massif in the times of Doushantuo and Meishucun ages[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 23(4): 193~209 (in Chinese with English abstract).
- Ge Hongru, Luo Chaoshun and Li Ji. 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, 123 (in Chinese with English abstract).
- Jin Zhenkui, Shi Liang, Gao Baishui, *et al.* 2013. Carbonate facies and facies models[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 31(6): 965~979 (in Chinese with English abstract).
- Li Jiao and He Dengfa. 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).
- Li Zuoqiang, Chen Min, Lu Junyong, *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 (in Chinese with English abstract).
- Liang Yongzhong, Su Yuyun, Su Xiuzhu, *et al.* 2018. Modes of occurrence of rare earth elements in Kunyang phosphorite deposit, Yunnan Province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 37(6): 959~966 (in Chinese with English abstract).
- Liu Falu, Huang Julang and Yang Zhenqiang 1985. Characteristics of phosphorites in the early Meishucun stage(early Cambrian) in western Sichuan and their depositional and diagenetic environments[J]. *Geological Review*, 31(2): 149~157, 202~203 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jianqing, He Li, Jiang Yongfu, *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 Yongxian, Ge Dingyi, Zeng Yunfu, *et al.* 1994. The enrichment characteristics of apatite from phosphorites in east Yunnan[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 14(4): 17~34 (in Chinese with English abstract).
- Luo Xuequan. 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 Yunchuan, Huang Taiping, Zhou Qian, *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).
- Mu Nan and Wu Chaodong. 2005. Characteristics and phosphogenesis of phosphorite of the sinian-Cambrian, West Yangtze area[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis*, 41(4): 551~562 (in Chinese with English abstract).

- Wang Dengfang, Mao Tie and 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 Jujie, Zeng Pusheng, Ma Jing, *et al.* 2015. Black rock series and associated minerals: An example of the Yangtze platform[J]. Geology and Exploration, 51(4): 677~689(in Chinese with English abstract).
- Wang Pengwan, Si Chunsong, Zhang Runhe, *et al.* 2016. Characteristic of the Cambrian carbonate paleo-ocean environment in the Dianqianbei depression and its geological significance[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 34(5): 811~818 (in Chinese with English abstract).
- Xia Liangliang, Hao Naixuan, Fan Chenzi, *et al.* 2022. Distribution and occurrence state of rare earth elements in Anning phosphate ore, Yunnan Province[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 41(4): 759~770 (in Chinese with English abstract).
- Xia Xuehui and Huang Qingshan. 1989. Collophane from phosphorites in Dianchi area, Yunnan Province: A mineralogical study[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 8(4): 360~367, 384 (in Chinese with English abstract).
- Yang Fan, Xiao Rongge and Xia Xuehui. 2011. Sedimentary environment and geochemistry of the Kunyang phosphorite deposit in eastern Yunnan Province[J]. Geology and Exploration, 47(2): 294~303 (in Chinese with English abstract).
- Yang Haiying, Xiao Jiafei, Hu Ruizhong, *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 Jiedong and Wang Zongzhe. 1989. Electron microscope study on pebble phosphorites of Meishucun section, Jinning, Yunnan province[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 7(2): 125~129 (in Chinese with English abstract).
- Yang Yuchuan, Peng Xianghui, Zhang Jun, *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).
- Yang Zhixian, Deng Quanjia, Huo Zhengping, *et al.* 2016. Ore Forming Regularity and Resource Potential of Phosphorus Deposits in Yunnan[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~153 (in Chinese with English abstract).
- Yue Weihao, Gao Jianguo, Li Yuncan, *et al.* 2012. Metallogenic characteristics and resource potential estimation of sedimentary type phosphorite deposits in Yunnan Province [J]. Geological Bulletin of China, 31(8): 1 323~1 331(in Chinese with English abstract).
- Zeng Yunfu, Shen Lijuan, He Tinggui, *et al.* 1994. Preliminary analysis of the outcrop sequence stratigraphy for phosphatic series of early Cambrian in eastern Yunnan [J]. Mineralogy and Petrology, 14(3): 43~53 (in Chinese).
- Zeng Yunfu and Yang Weidong. 1987. Mechanism of enrichment of Kunyang and Haikou phospharite deposits, Yunnan China [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 5(3): 19~27, 185 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jun, Zhang Yu, Yang Yuchuan, *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).
- Zhou Chuanming, Zhang Junming, Li Guoxiang, *et al.* 1997. Carbon and oxygen isotopic record of the Early Cambrian from the Xiaotan section, Yunnan, South China [J]. Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica), 32(2): 201~211(in Chinese).

附中文参考文献

- 陈喜峰, 元春华, 陈秀法, 等. 2021. 世界矿情·非洲卷[M]. 北京: 地质出版社, 1~614.
- 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, 22(3): 246~257.
- 邓小林, 姚超美, 江新华, 等. 2007. 川西南—滇东北地区磷矿的形成与富集[J]. 化工矿产地质, 29(3): 139~140.
- 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.
- 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, 123.
- 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]. 古地理论, 16(4): 441~460.
- 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.

- 梁永忠, 苏妤芸, 苏秀珠, 等. 2018. 昆阳磷矿中稀土元素赋存状态研究[J]. 岩石矿物学杂志, 37(6): 959~966.
- 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, 202~203.
- 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.
- 刘永先, 戈定夷, 曾允孚, 等. 1994. 滇东磷块岩矿床中磷灰石的富集特征[J]. 矿物岩石, 14(4): 17~36.
- 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.
- 牟南, 吴朝东. 2005. 上扬子地区震旦—寒武纪磷块岩岩石学特征及成因分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 41(4): 551~562.
- 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.
- 王聚杰, 曾普胜, 麻菁, 等. 2015. 黑色岩系及相关矿产——以扬子地台为例[J]. 地质与勘探, 51(4): 677~689.
- 王鹏万, 斯春松, 张润合, 等. 2016. 滇黔北拗陷寒武系碳酸盐岩古海洋环境特征及地质意义[J]. 沉积学报, 34(5): 811~818.
- 夏亮亮, 郝乃轩, 范晨子, 等. 2022. 云南安宁磷矿中稀土元素分布规律和赋存状态研究[J]. 岩石矿物学杂志, 41(4): 759~770.
- 夏学惠, 黄青山. 1989. 滇池地区沉积磷块岩中胶磷矿矿物学特征及其研究意义[J]. 岩石矿物学杂志, 8(4): 360~367, 384.
- 杨帆, 肖荣阁, 夏学惠. 2011. 昆阳磷矿沉积环境与矿床地球化学[J]. 地质与勘探, 47(2): 294~303.
- 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.
- 杨杰东, 王宗哲. 1989. 云南晋宁梅树村下寒武统砾屑磷块岩的扫描电镜研究[J]. 沉积学报, 7(2): 125~129.
- 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.
- 杨志鲜, 邓泉江, 霍正平, 等. 2016. 云南省磷矿成矿规律及资源潜力[M]. 北京: 地质出版社, 1~153.
- 岳维好, 高建国, 李云灿, 等. 2012. 云南沉积型磷矿成矿特征与资源潜力预测[J]. 地质通报, 31(8): 1323~1331.
- 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.
- 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, 185.
- 张君, 张巧, 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.
- 周传明, 张俊明, 李国祥, 等. 1997. 云南永善肖滩早寒武世早期碳氧同位素记录[J]. 地质科学, 32(2): 201~211.