

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

米云川^{1,2,3}, 杜斌^{1,2,3,4}, 夏建峰^{1,2,3}, 王枫^{1,2,3}, 周骞^{1,2,3,4}, 黄太平^{1,2,3,4},
胡清华^{1,2,3}

(1. 云南省地质调查院(云南省地质科学研究所), 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. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093)

摘要: 羊场超大型磷矿床是新近勘查发现的大埋深全隐伏浅海相碳酸盐岩型层状磷块岩矿床, 赋矿地层为下寒武统梅树村组(ϵ_1ms), 目前对其沉积环境和富集成矿机制认识薄弱。本文在代表性钻孔岩芯系统观测的基础上, 利用沉积(微)相分析、矿物学及矿物化学示踪等手段, 重点解析梅树村组各岩性段的岩石矿物(组合)特征、沉积(微)相类型及其时空分布规律, 查明沉积环境演化, 探究磷质来源、迁移及富集机制, 建立其成矿模式。对比分析表明, 赋矿地层垂向上表现出海侵-海退序列的近岸潮坪相沉积环境, 识别出潮上坪、潮间坪和潮下坪3个亚相6种微相, 潮上坪分为潮上滩、潮上灰坪, 潮间坪分为潮间灰坪、潮间滩、风暴流, 潮下坪发育低能潮下坪; 潮间坪中的高能潮间滩是最有利的磷块岩形成环境, 长期保持的浅水环境下多期次潮汐、波浪反复作用, 利于富磷粒屑的簸选富集与再造, 从而形成矿区北西侧矿层富厚、南东侧渐趋薄贫的磷块岩矿床。由此, 羊场磷矿床的成矿作用可分为3个阶段: 初始堆积沉淀成矿阶段(上升洋流携带的磷质来源)、生物化学凝聚沉淀与加积异化成矿阶段(微生物分解、转化及复合作用驱动的迁移与富集成矿)、簸选富集与再富集成矿阶段(多期次波浪、潮汐作用驱动的沉淀再次富集成矿)。这为矿区及外围地区找矿勘查提供了重要依据。

关键词: 梅树村组; 羊场背斜; 沉积环境演化; 成矿机制; 磷块岩矿床; 羊场磷矿; 镇雄地区; 滇东北

中图分类号: P619.21⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2024)05-1099-20

Sedimentary environment and enrichment mineralization mechanism of the Lower Cambrian Meishucun Formation in the Yangchang phosphate deposit of Zhenxiong area, Northeastern Yunnan

MI Yun-chuan^{1,2,3}, DU Bin^{1,2,3,4}, XIA Jian-feng^{1,2,3}, WANG Feng^{1,2,3}, ZHOU Qian^{1,2,3,4}, HUANG Tai-ping^{1,2,3,4},
and HU Qing-hua^{1,2,3}

(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. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: The Yangchang phosphate deposit is a large-buried shallow marine carbonate stratified phosphorite deposit discovered in the Meishucun Formation (ϵ_1ms) of the Lower Cambrian recently. The understanding of its sedimentary environment and enrichment mechanism is still limited. Representative borehole cores were selected to carry out systematic sedimentary facies cataloguing. By means of sedimentary (microfacies) analysis, mineralogy

收稿日期: 2024-05-15; 接受日期: 2024-08-08; 编辑: 郝艳丽

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

作者简介: 米云川(1983-), 男, 高级工程师, 从事矿产地质调查工作, E-mail: ygsycm@126.com; 通讯作者: 王枫(1988-), 男, 硕士, 高级工程师, 长期从事水工环地质调查工作, E-mail: 61788412@qq.com。

and mineral chemistry tracing, the characteristics of rock and mineral (assemblage), sedimentary (microfacies) types, sedimentary environment and spatial and temporal distribution of each lithologic section of the Meishucun Formation are analyzed. We also studied the sedimentary environment evolution, the source, migration and enrichment mechanism of phosphorus, and its metallogenic model. The comparative analysis shows that the ore-bearing strata exhibits the nearshore tidal flat facies sedimentary environment with transgression-regressive sequence vertically, 6 microfacies types in 3 subfacies namely supratidal flat, intertidal flat and subtidal flat are identified. Supratidal flat is divided into supratidal flat and supratidal carbonate flat. The intertidal flat is divided into intertidal carbonate flat, intertidal flat and storm current. The subtidal flat developed a low energy subtidal flat. The favorable phosphorus formation environment is the high energy intertidal flat in intertidal flat. Repeated action of tides and waves in the shallow water environment for a long time is conducive to the winnowing, enrichment and reconstruction of phosphorous rich particles, thus forming a phosphorous rock deposit with rich and thick beds in the northwest and poor and thin beds in the southeast of the mining area. To sum up, the ore forming process of the Yangchang phosphate deposit can be divided into three stages, namely: ① initial accumulation and precipitation mineralization stage (phosphorus source carried by upwelling ocean current); ② biochemical deposition and accretion mineralization stage (migration and enrichment driven by microbial decomposition, transformation and compound); ③ winnowing enrichment and re-enrichment mineralization stage (precipitation and enrichment driven by multi-stage wave and tidal action). This new points provides an important basis for prospecting and exploration in the mining area and peripheral areas.

Key words: Meishucun Formation; Yangchang anticlinal; sedimentary environment evolution; metallogenic model; phosphorite deposit; Yangchang phosphate deposit; Zhenxiang area; Northeast Yunnan

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

当前,隐伏磷矿资源的勘查评价存在一些制约性难题,主要体现在对隐伏富磷矿体空间就位机制,尤其是富磷矿沉积的古地理格局和古环境空间变化等关键问题认识不足,难以有效指导后续找矿勘查评价。前期施工钻孔验证与以往工作成果综合分析显示,羊场地区下寒武统梅树村组海相碳酸盐岩富含磷,是羊场磷矿床的含磷岩系。该含磷岩系由含磷白云岩、磷质岩、磷块岩、硅质岩组成,形成于碳酸盐台地干热潮坪环境(潮间-潮下带)(杨志鲜等, 2016)。空间上,自北西往南东方向,该含磷岩系呈现海水逐渐变深但矿化变弱特征,且矿体厚度具有从聚磷盆地中心向周边变薄之趋势(米云川等, 2021)。已有众多学者从磷的来源、成矿时代、成矿作用、成矿模式等方面对羊场磷块岩矿床的形成与富集规律开展了大量研究并取得了不同认识(杨志鲜等, 2016; 米云川等, 2021),但对梅树村组含磷岩系、磷块岩矿物、矿石类型及矿床地质特征、成磷期岩相古地理和构造环境开展系统性的研究工作相对欠缺,导致对磷的物质来源、迁移、沉淀和磷块岩的形成、富集机理及矿床成因等认识存在分歧,影响着区域找矿突破。

本文在前期勘查和研究成果基础上,选取已施工的代表性钻孔岩芯开展详细编录,开展沉积(微)相分析、矿物学及矿物化学分析,结合野外地质调查研究成果,深入研究赋矿层位各岩性段的岩石矿物(组合)特征,划分沉积(微)相类型,分析沉积环境与其时空分布规律,探讨含磷岩系沉积环境演化及磷质来源、迁移过程和富集机制。该研究可为羊场磷矿区及外围找矿勘查工作部署提供支撑依据。

1 地质背景

羊场磷矿床位于云南省镇雄县,产于被巧家-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1a),属于硝滩-羊场聚磷盆地的镇雄-威信成磷区(图1c)。大地构造位置上,该磷矿处于滇东被动陆缘(杨志鲜等, 2016)。区域上,在上扬子古陆块龙门山断裂、丽江-木里断裂以及红河断裂之东侧广泛分布有下寒武统含磷岩系梅树村组。西自华坪,南抵沾益,北至永善一带,该套含磷岩系中均有磷块岩产出,但达工业品位的磷块岩矿床主要分布于滇中

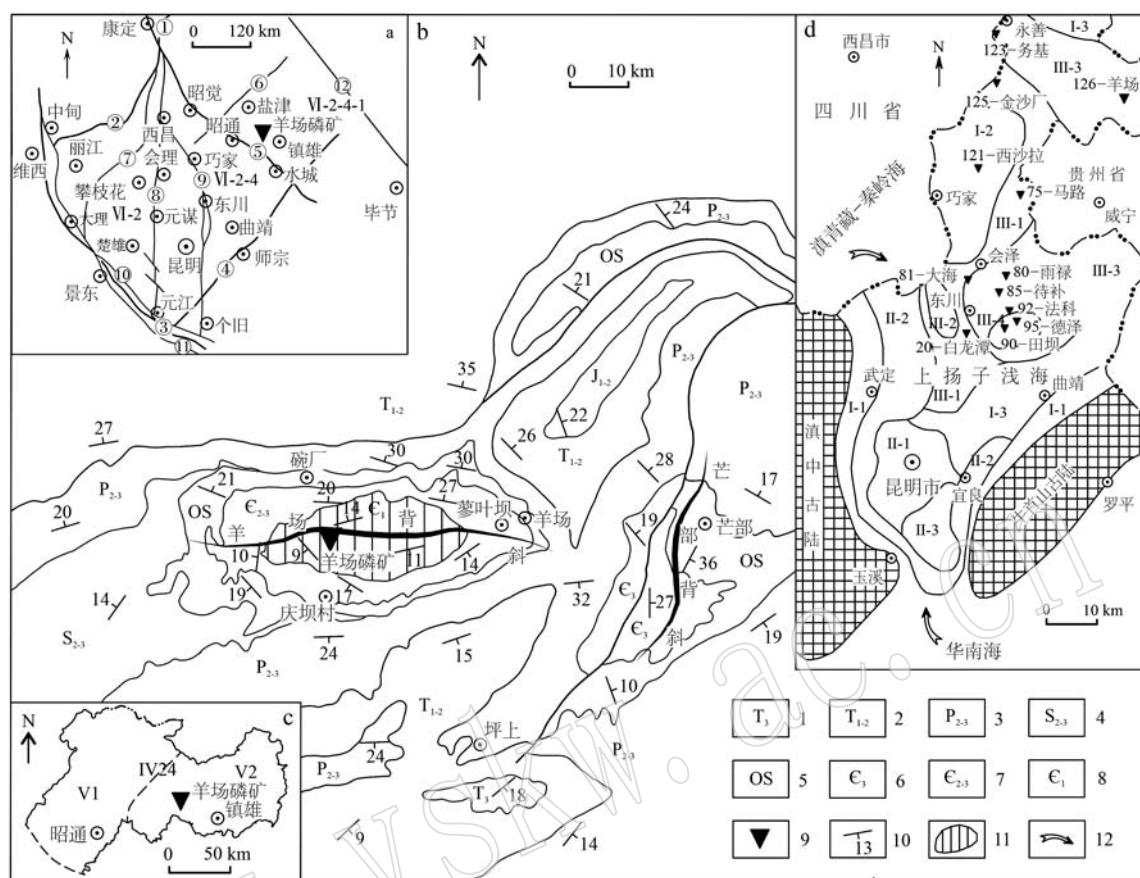


图1 云南镇雄地区羊场磷矿区大地构造位置图(a)、矿区区域地质图(b)、矿区成矿区带划分图(c)和下寒武统磷矿岩相古地理图(d) [据米云川等(2021)修编]

Fig. 1 Tectonic map(a), regional geological map(b), classification map of mineralization zones(c) and paleogeography map of Lower Cambrian phosphate(d) 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—滇东被动陆棚; VI-2-4-1—昭通陆棚; IV 24—镇雄-巧家-会泽(断褶带) Pb-Zn-Ag-Fe-REE-Al-P-煤-煤层气成矿带; 1—上三叠统; 2—下-中三叠统; 3—中-上二叠统; 4—中-上志留统; 5—奥陶系-志留系; 6—上寒武统; 7—中-上寒武统; 8—下寒武统; 9—隐伏磷矿; 10—地层产状; 11—下寒武统分布范围; 12—海流方向; 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; 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

VI-2—Upper Yangtze block; VI-2-4—East Yunnan passive continental margin; VI-2-4-1—Zhaotong continental shelf; IV 24—Zhenxiong-Qiaojia-Huize(fault-fold belt) Pb-Zn-Ag-Fe-REE-Al-P-coal-CBM metallogenic belt; 1—Upper Triassic; 2—Lower-Middle Triassic; 3—Middle-Upper Permian; 4—Middle-Upper Silurian; 5—Ordovician-Silurian; 6—Upper Cambrian; 7— Middle-Upper Cambrian; 8—Lower Cambrian; 9—concealed phosphorite deposit; 10—stratum occurrence; 11—Lower Cambrian; 12—oceanic current direction; 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-Lüzhijiang Fault; ⑨—Xiaojiang Fault; ⑩—Honghe Fault; ⑪—Jiujia-Anning Fault; ⑫—Bijie-Dafang Fault; 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

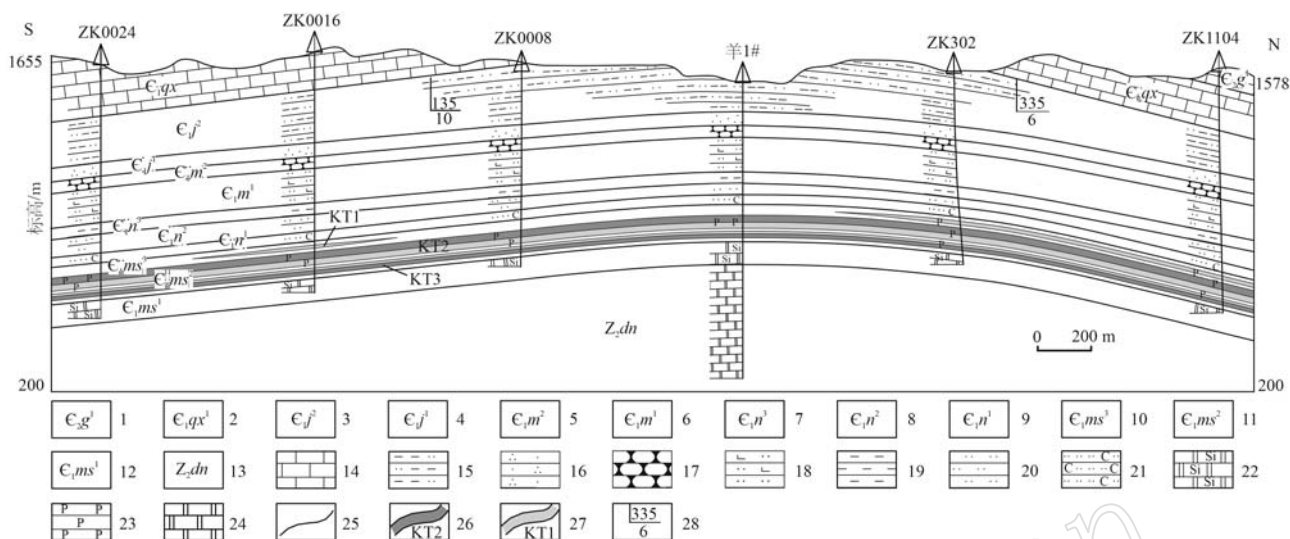


图3 羊场磷矿隐伏矿体0勘探线剖面图

Fig. 3 Cross sections(0) of the concealed ore bodies of the Yangchang phosphate deposit

1—高台组一段; 2—清虚洞组; 3—金顶山组二段; 4—金顶山组一段; 5—明心寺组二段; 6—明心寺组一段; 7—牛蹄塘组三段; 8—牛蹄塘组二段; 9—牛蹄塘组一段; 10—梅树村组三段; 11—梅树村组二段; 12—梅树村组一段; 13—灯影组; 14—灰岩; 15—粉砂质泥岩; 16—石英砂岩; 17—瘤状灰岩; 18—钙质粉砂岩; 19—泥岩; 20—粉砂岩; 21—炭质粉砂岩; 22—硅质白云岩; 23—磷块岩; 24—白云岩; 25—地层界线; 26—工业磷矿体; 27—低品位磷矿体; 28—地层产状

1—first member of Gaotai Formation; 2—Qingxudong Formation; 3—second member of Jindingshan Formation; 4—first member of Jindingshan Formation; 5—second member of Mingxinsi Formation; 6—first member of Mingxinsi Formation; 7—third member of Niutitang Formation; 8—second member of Niutitang Formation; 9—first member of Niutitang Formation; 10—third member of Meishucun Formation; 11—second member of Meishucun Formation; 12—first member of Meishucun Formation; 13—Dengying Formation; 14—limestone; 15—silty mudstone; 16—quartz sandstone; 17—nodular limestone; 18—calcareous siltstone; 19—mudstone; 20—siltstone; 21—calcareous siltstone; 22—siliceous dolomite; 23—phosphorite; 24—dolomite; 25—geological boundary; 26—industrial phosphate body; 27—low-grade phosphate body; 28—stratum occurrence

主,下部以贫矿(Ⅲ品级矿、低品位矿)为主,局部见Ⅱ品级矿;中下部见一层厚约5.0 m无矿夹层,据此将KT2和KT3矿层隔开。根据磷矿化情况将其划分为2个聚磷期(矿层)和1个间歇期(夹层),从下向上划分为3个岩性层(图5),分述如下:

① 第1层($\epsilon_{1ms^{2-1}}$): KT3矿体赋存层位,岩性为深灰色、灰色薄-中层状、条纹(带)状白云质砂屑磷块岩、砂屑白云岩,含磷质硅质白云岩、硅质岩等。砂屑磷块岩一般呈条纹状、条带状分布。一般为Ⅲ品级矿,局部见Ⅱ品级矿,上部见一层厚约5.0 m低品位矿石。工业矿体厚度1.61~13.27 m,平均7.68 m, P_2O_5 品位15.00%~30.24%,平均17.51%。

② 第2层($\epsilon_{1ms^{2-2}}$): 即无矿夹层,为KT3与KT2矿体(层)之间夹层,岩性为灰色、深灰色含磷质砂屑白云岩、硅质白云岩、含磷灰质白云岩等, P_2O_5 品位5.0%~10.0%。厚3.00~13.14 m,平均5.50 m。

③ 第3层($\epsilon_{1ms^{2-3}}$): KT2矿体赋存层位,岩性为深灰色致密块状、厚层状、厚条带状白云石化泥晶

砂屑磷块岩、豆粒磷块岩,局部为鲕粒磷块岩,胶磷矿砂屑含量约50.0%~80.0%。上部以Ⅱ品级矿为主,常夹两层Ⅰ品级矿,中下部以Ⅲ品级矿为主,夹一层Ⅱ品级矿。工业矿体厚度16.84~41.75 m,平均29.38 m, P_2O_5 品位15.02%~35.69%,平均24.18%。

(3) 梅树村组三段(ϵ_{1ms^3})

该岩性段为矿区主磷矿层(KT2)的顶板,厚度7.33~26.16 m,仅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。岩性为深灰色、灰色薄-中层状砂屑灰质白云岩、砂屑白云岩、含磷质砂屑灰岩等,零星发育白云质、灰质砂屑磷块岩,岩石中磷质砂屑稀疏分布, P_2O_5 含量5.0%~10.0%。底部见一层厚约10.0~20.0 cm风暴角砾岩,角砾成分为含磷白云岩或磷块岩,呈次棱角状,局部竹叶状,角砾长轴方向与地层产状近平行或呈小角度相交。该砾岩层可作为 ϵ_{1ms^3} 与 ϵ_{1ms^2} 分界标志层。从时间上反映出该砾岩层出现后,岩石中钙质组

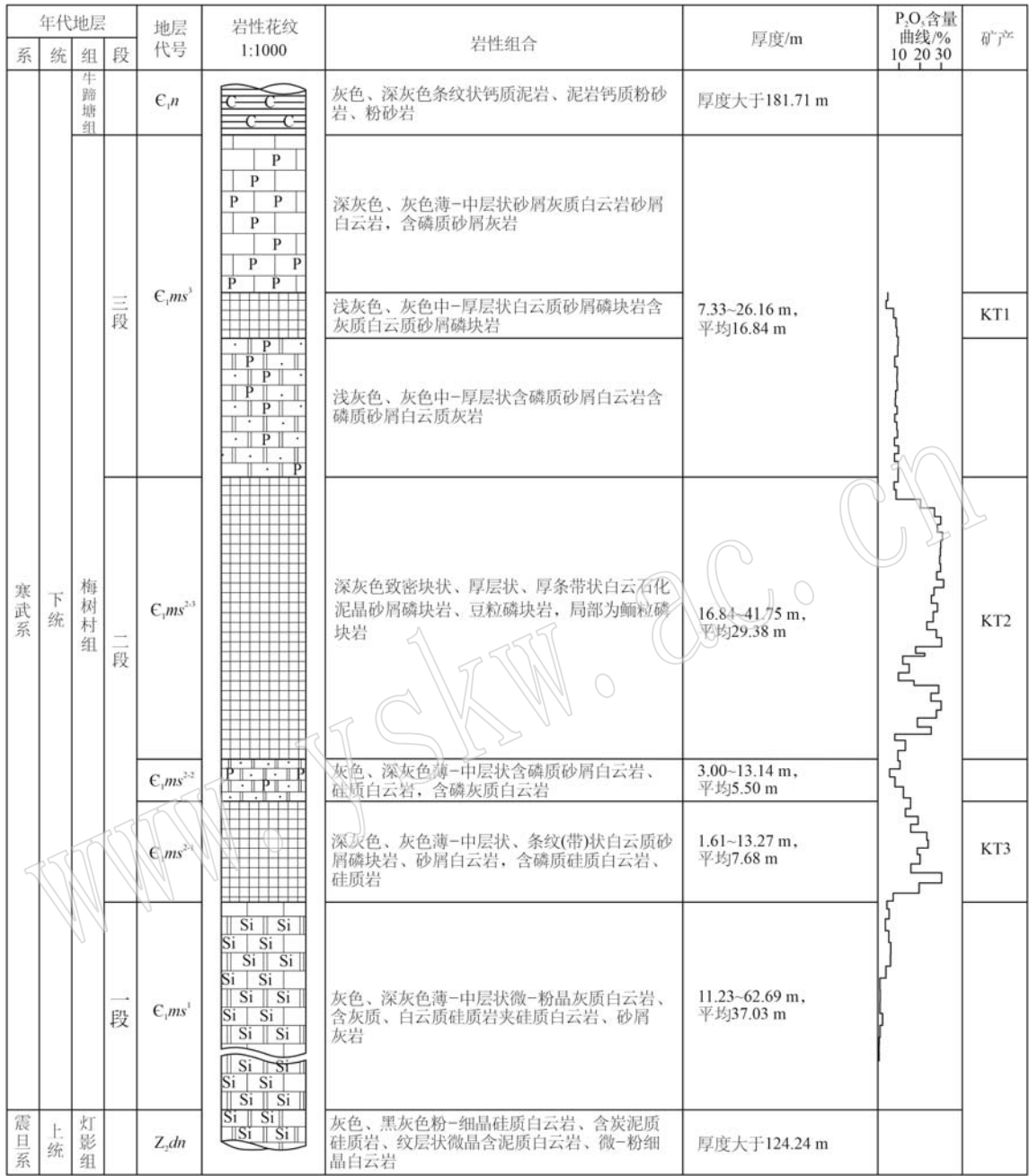


图 4 羊场磷矿含磷岩系柱状图

Fig. 4 Histogram of phosphorus bearing rock series of the Yangchang phosphate deposit

分明显增加,磷质含量则相继减少,磷矿化减弱,矿石类型由混合型变为碳酸盐型。根据磷矿化情况划分为 3 个岩性层:

① 下部为 KT1 矿体底板,以底部砾岩标志层为底界,厚度变化大(0.94~13.94 m),局部缺失。岩性为浅灰色、灰色中-厚层状含磷质砂屑白云岩、含磷质砂屑白云质灰岩, P_2O_5 含量 5.0%~10.0%,平均 9.31%。该层在 0-7 线背斜北翼富集成Ⅲ品级

矿,其他地段局部富集为低品位矿,零星分布。

② 中部为 KT1 矿体赋存层位,岩性为浅灰色、灰色中-厚层状白云质砂屑磷块岩、含灰质白云质砂屑磷块岩,以低品位矿为主,局部富集为Ⅲ品级矿,连续性较差。常见一层厚约 4.79 m 的低品位矿体,零星分布, P_2O_5 品位 12.08%~14.09%,平均 12.82%。仅在 ZK1525 钻孔揭露到Ⅲ品级矿,厚度 9.96 m, P_2O_5 平均品位 17.09%。

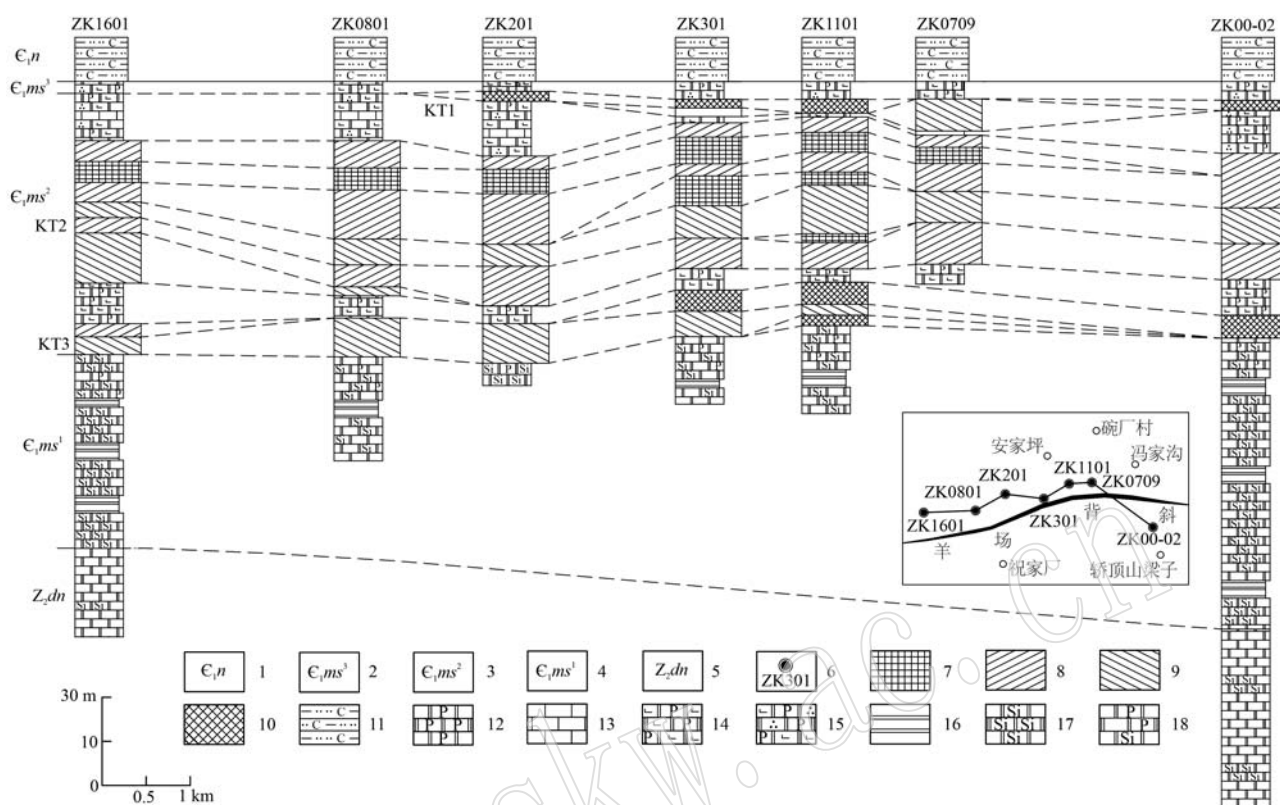


图5 羊场磷矿含磷岩系岩性柱状对比图

Fig. 5 Comparison of lithological columns of phosphorus bearing rock series in Yangchang phosphorus deposit

1—牛蹄塘组; 2—梅树村组三段; 3—梅树村组二段; 4—梅树村组一段; 5—灯影组; 6—见矿钻孔及编号; 7—I 品级矿层; 8—II 品级矿层; 9—III 品级矿层; 10—低品位矿层; 11—含炭质泥质粉砂岩; 12—含磷白云岩; 13—灰岩; 14—含磷灰质白云岩; 15—含磷砂屑灰质白云岩; 16—硅质岩; 17—硅质白云岩; 18—含磷硅质白云岩

1—Niutitang Formation; 2—third member of Meishucun Formation; 3—second member of Meishucun Formation; 4—first member of Meishucun Formation; 5—Dengying Formation; 6—discovery drill hole and number.; 7—grade I ore bed; 8—grade II ore bed; 9—grade III ore bed; 10—low-grade ore layer; 11—carbonaceous argillaceous siltstone; 12—phosphorus-bearing dolomite; 13—limestone; 14—phosphorus-bearing limestone dolomite; 15—phosphorus-bearing sandy-lime dolomite; 16—siliceous; 17—siliceous dolomite; 18—phosphorus-bearing siliceous dolomite

③ 上部为 KT1 矿体顶板, 厚度 0.93~11.01 m, 岩性为深灰色、灰色薄-中层状灰质白云岩、白云岩、含磷质砂屑灰岩, 岩石中磷质砂屑稀疏分布。P₂O₅ 含量 5.0%~10.0%, 平均 8.59%。

2.2 矿体特征

2.2.1 矿体形态

羊场磷矿床为大埋深隐伏矿床, 矿体产于羊场复式背斜深部下寒武统梅树村组中, 主磷矿层赋存于梅树村组二段($\epsilon_1 ms^2$)。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°~6°; 倾向与背斜两翼倾向一致, 翼部倾角较陡, 北西翼倾向 290°~330°, 倾角 5°~13°; 南东翼倾向 90°~150°, 倾

角 4°~13°。磷矿体主要产于梅树村组二段中下部, 为多层型, 可分为上、中、下 3 个矿层(KT1、KT2、KT3), 矿层倾角核部较缓, 往两翼产状变陡(图 6)。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, P₂O₅ 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, P₂O₅ 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。

总体上看, 矿体厚度沿走向由西往东变薄, 矿化并有变弱趋势, 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。

矿区共圈出 KT1、KT2 和 KT3 这 3 个矿体。其中,

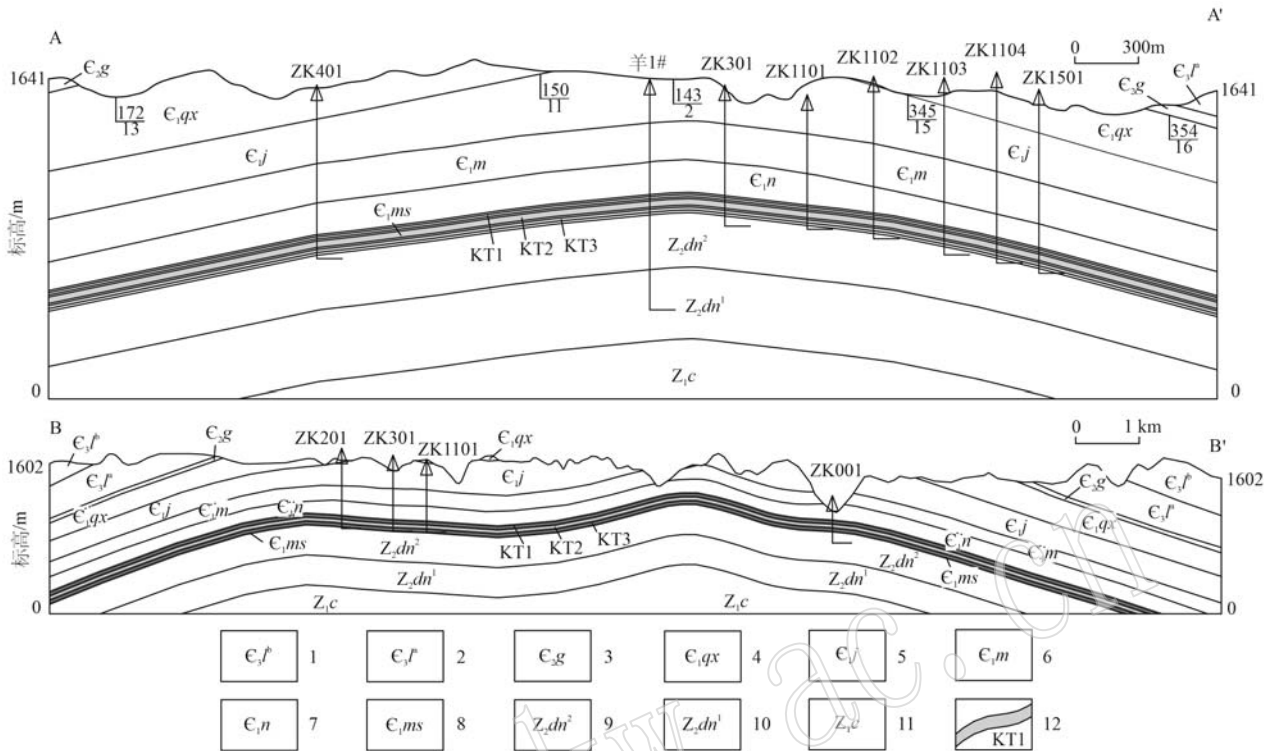


图6 羊场磷矿隐伏矿体 A—A'、B—B' 纵横剖面图[据米云川等(2021) 修编]

Fig. 6 Cross sections(A—A' and B—B') of the concealed ore bodies of the Yangchang phosphate deposit(modified from Mi Yunchuan *et al.*, 2021)

1—娄山关组二段; 2—娄山关组一段; 3—高台组; 4—清虚洞组; 5—金顶山组; 6—明心寺组; 7—牛蹄塘组; 8—梅树村组;
9—灯影组二段; 10—灯影组一段; 11—澄江组; 12—隐伏磷矿体

1—second member of the Loushanguan Formation; 2—first member of the Loushanguan Formation; 3—Gaotai Formation; 4—Qingxudong Formation;
5—Jindingshan Formation; 6—Mingxinsi Formation; 7—Niutitang Formation; 8—Meishucun Formation; 9—second member of the Dengying Formation;
10—first member of the Dengying Formation; 11—Chengjiang Formation; 12—concealed phosphorus deposit

KT2 为主矿体, I-Ⅲ品级矿石均有分布, 上部以Ⅱ品级夹Ⅰ品级矿为主, 下部以Ⅲ品级夹Ⅱ品级矿为主, 矿石品级分布规律为Ⅲ-Ⅱ-I-Ⅱ-I-Ⅲ-Ⅱ-Ⅲ; KT3 为次要矿体, 包含Ⅱ、Ⅲ品级矿石, 以Ⅲ品级矿石为主, Ⅱ品级矿位于底部; KT1 为小矿体, 以低品位矿为主, 局部富集为Ⅲ品级矿, 零星分布。目前钻探控制工业矿(I-Ⅲ品级) 累计厚度 22.94~47.02 m, 平均 35.82m, P_2O_5 平均品位 23.00%, I+Ⅱ品级矿厚度 8.62~23.96 m, 平均 20.38 m, P_2O_5 平均品位 26.71%, 其中 I 品级矿厚度 1.66~9.90 m, 平均 5.03 m, P_2O_5 平均品位 30.59%, Ⅱ品级矿厚度 8.62~23.84 m, 平均 17.32 m, P_2O_5 平均品位 26.05%, Ⅲ品级矿厚度 4.87~24.72 m, 平均 15.44 m, P_2O_5 平均品位 17.73%; 低品位矿厚度 2.92~14.97 m, 平均 6.81 m, P_2O_5 平均品位 13.13%。

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; 化学成分主要为 Ca 及 P, 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; 矿石结构以内碎屑结构为主, 包括粉砂屑、砂屑和砾屑, 局部为凝胶状结构、球粒及团块结构, 少见鲕状结构(图 7d、7e); 构造以致密块状、条带(纹)状构造为主(图 7a、7b、7c); 矿石自然类型主要有致密块状磷块岩、条带(纹)状磷块岩, 工业类型为混合型-碳酸盐型磷, 以混合型为主; 工业矿石品级以 I、Ⅱ品级为主。

2.2.2 空间分布特征

(1) 平面分布特征

平面上矿体分布于羊场背斜核部及两翼祝家厂-冯家沟-庆坝村-柏香坝一带, 目前钻孔控制矿体平面分布范围为: 走向上(东西向)分布于 16 线至 63 线之间, 倾向上(南北向)分布于背斜两翼, 主磷矿层沿走向和倾向均未圈闭, 矿体延伸稳定。沿走向由



图 7 羊场磷矿磷块岩矿石结构特征

Fig. 7 Ore textures and structures of phosphorite from the Yangchang phosphate deposit

a—潮汐层理磷块岩; b—致密块状磷块岩; c—条纹状砂屑磷块岩; d—亮晶鲕粒砂屑磷块岩; e—纹层状亮晶砂屑磷块岩

a—tidal bedded phosphorite; b—dense massive sandstone phosphorite; c—striated sandstone phosphorite;

d—shiny oolitic sandstone phosphorite; e—stratified shiny sandstone phosphorite

西往东,矿化有变弱的趋势,表现为西部 16-0 线矿体总厚度大,Ⅰ、Ⅱ品级矿占比高,特别是 16 线以西矿体仍有变厚变富的趋势;0-63 线矿体总厚度相对减薄,Ⅰ、Ⅱ品级矿占比逐渐降低,且至 7 线、15 线含矿层底部以低品位矿为主。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(图 8、图 9)。

(2) 垂向分布特征

矿区含磷层垂向上由上至下划分为矿层顶板(局部富集为 KT1)、KT2 矿体、夹层、KT3 矿体、矿层底板(图 4),磷矿体为致密块状、条纹(带)状砂屑磷块岩、白云质或灰质磷块岩,颜色呈深灰色、灰黑色,3 个矿体垂向上独立近平行产出,矿体间夹层易识别,颜色偏浅,呈灰色、浅灰色,岩性为含磷质白云岩

KT3 矿体在 0 线以西以Ⅲ品级矿为主,0 线以东则以低品位矿为主。

3 含磷岩系沉积相类型及其特征

羊场磷矿床位于硝滩-羊场聚磷盆地东段,后期上覆沉积物过厚,磷矿体隐伏于地下深部,地表未出露。根据区域古地理的特点,结合矿区梅树村组含磷岩系厚度的变化及相带展布,认为早寒武世梅树村期,浅海广布,羊场矿区位于康滇古陆(北西)、滇中古陆(南西)和牛首山古陆(南东)之间川滇黔碳

酸盐台地,仅南东方向开阔,并与广海相连。受基底地形影响,加之各地沉降补偿不一,控制了区内磷块岩的沉积环境,沉积环境的不同致使区内磷块岩矿床的地质特征随所在位置变化而异。因而,根据岩石结构-成因类型、沉积构造特征等,分析认为梅树村组属碳酸盐台地沉积体系潮坪沉积相,进一步识别出潮上坪、潮间坪和潮下坪 3 个亚相 6 种微相,潮上坪分为潮上滩、潮上灰坪,潮间坪分为潮间灰坪、潮间滩、风暴流,潮下坪发育低能潮下坪(图 10、图 11),垂向上表现出海侵-海退沉积演化序列。其相带特征如下:

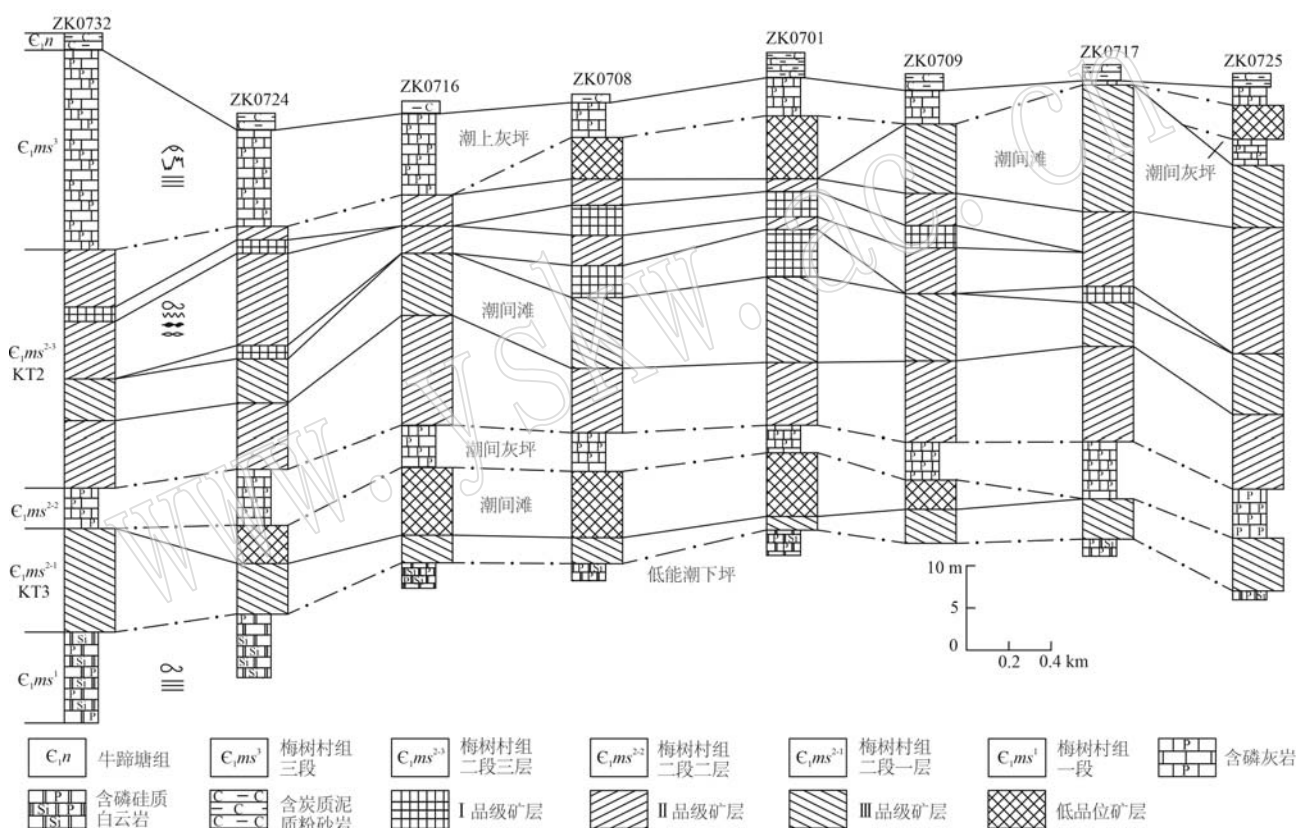


图 10 羊场磷矿含磷岩系沉积相带横向划分对比图

Fig. 10 Comparison diagram of lateral division of sedimentary facies zones of phosphorus bearing rock series in Yangchang phosphate deposit

3.1 潮上坪

位于平均高潮线与最大高潮线之间,受风暴浪和潮汐水流作用所致,长期处于暴露状态,可进一步划分为潮上灰坪、潮上滩 2 个微相。

(1) 潮上灰坪

岩石类型为浅灰色、灰色中-厚层状含磷质砂屑白云岩、含磷质砂屑白云质灰岩,可见齿状石膏溶孔、鸟眼构造,部分透镜状石膏条带及缝合线构造,

发育水平层理(图 12a、12b),处于低能环境。

(2) 潮上滩

岩石类型为浅灰色、灰色中-厚层状白云质砂屑磷块岩、含灰质白云质砾屑砂屑磷块岩。砾屑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形成大量快速堆积(图 12c),处于高能环境。

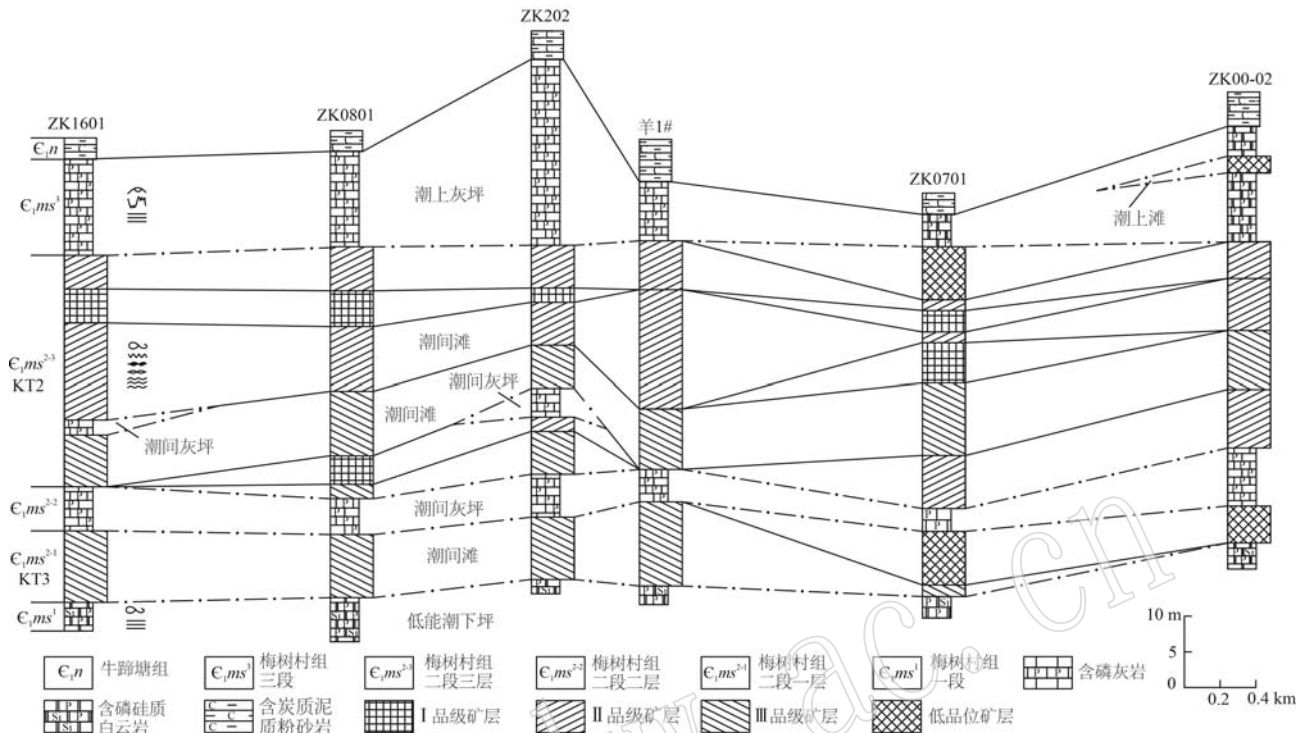


图 11 羊场磷矿含磷岩系沉积相带纵向划分对比图

Fig. 11 Comparison diagram of vertical division of sedimentary facies zones of phosphorus bearing rock series in Yangchang phosphate deposit

3.2 潮间坪

位于平均高潮线与平均低潮线之间,受海水涨潮、退潮影响,处于淹没状态,水动力条件较强,可进一步划分为风暴流、潮间滩、潮间灰坪 3 个微相,以高能环境中潮间滩为主。

(1) 风暴流: 岩石类型为灰色、深灰色灰质含磷砾屑砾岩、含磷砾屑磷质岩,局部可见破碎的磷质砾屑。常见冲刷面、正粒序层理,指示间歇性受风暴水流冲刷作用(图 12d、12e),处于高能环境。

(2) 潮间滩: 岩石类型为深灰色致密块状、厚层状、厚条带状白云石化泥晶砂屑磷块岩、豆粒磷块岩,局部为鲕粒磷块岩。砂屑磷质条带与含磷白云石条带互层(图 12i),发育波状层理、脉状层理,处于高-中能环境。

(3) 潮间灰坪: 岩石类型为深灰色、灰色薄-中层状、条纹(带)状白云质砂屑磷块岩、砂屑白云岩、含磷质灰质白云岩。砂屑磷块岩呈条纹状、条带状分布,冲刷作用频繁,微波状层理、脉状层理发育(图 12f、12g、12h),处于中-低能环境。

3.3 潮下坪

位于平均低潮线与最低低潮线之间,长期处于水下。

低能潮下坪: 岩石类型为灰色、深灰色薄-中层状微-粉晶灰质白云岩、含灰质、白云质硅质岩夹硅质白云岩、灰岩,偶见炭质页岩。岩石中见(弱)水平层理(图 12j),零星发育冲刷面,浅黄色黄铁矿呈星点状、团块状、细脉状分布,处于低能环境。

初步判定其成磷环境为潮坪沉积相,其中潮间坪中高能水动力的潮间滩是最有利于磷块岩的形成,从岩相组合来看,由盆地边缘至盆地中心一般逐渐由碳酸盐、磷酸盐、碳酸盐相区→磷酸盐、碳酸盐、磷酸盐相区→碳酸盐、硅酸盐相区;从矿石的结构、构造及岩相组合来看都反映了沉积韵律的多期性。通过沉积相环境分析,长期保持有利的浅水环境,由于多期次潮汐、波浪和风暴等动力反复作用使先沉积的半固结凝胶状磷质颗粒遭到破碎、搬运、磨蚀、簸选、再沉积富集,其沉积、胶结环境不断变化,形成



图 12 羊场磷矿含磷岩系沉积构造图

Fig. 12 Sedimentary structure map of phosphorus-bearing rock series in Yangchang phosphate deposit

a—缝合线构造; b—水平层理; c—风暴角砾岩; d—冲刷面; e—正粒序层理; f—条纹(带)状磷块岩; g—透镜状层理; h—波状层理;
i—砂屑磷质条带与含磷白云石条带互层

a—stylolite structure; b—horizontal bedding; c—rubble rock originated from storm; d—erosion surface; e—graded bedding; f—banded phosphorite;
g—lenticular bedding; h—wavy bedding; i—interlayering of sandstone phosphorus bands and dolomite bands

多种结构类型(粉砂屑-砂屑-砾屑-凝胶状)磷质(块)岩。

4 沉积环境演化

早寒武世梅树村早期,羊场磷矿床位于康滇古陆(北西)、滇中古陆(南西)和牛首山古陆(南东)之间川滇黔碳酸盐台地,仅南东方向开阔,并与广海相

连,通过沉积相环境分析,其成磷环境为近海岸的潮坪相带,梅树村组以潮间坪沉积为主(图 13),其中潮间坪中高能水动力的潮间滩是最有利于磷块岩的形成。从磷质(块)岩结构、构造及岩相组合来看反映了沉积韵律的多期性,由下至上划分为 3 个沉积旋回,反映了水体深-浅→浅-深-浅→深-浅-深的过程,其层序体系域厚度结构显示为 TST<<HST,表明早寒武世梅树村期海平面变化总体处于长期下降时

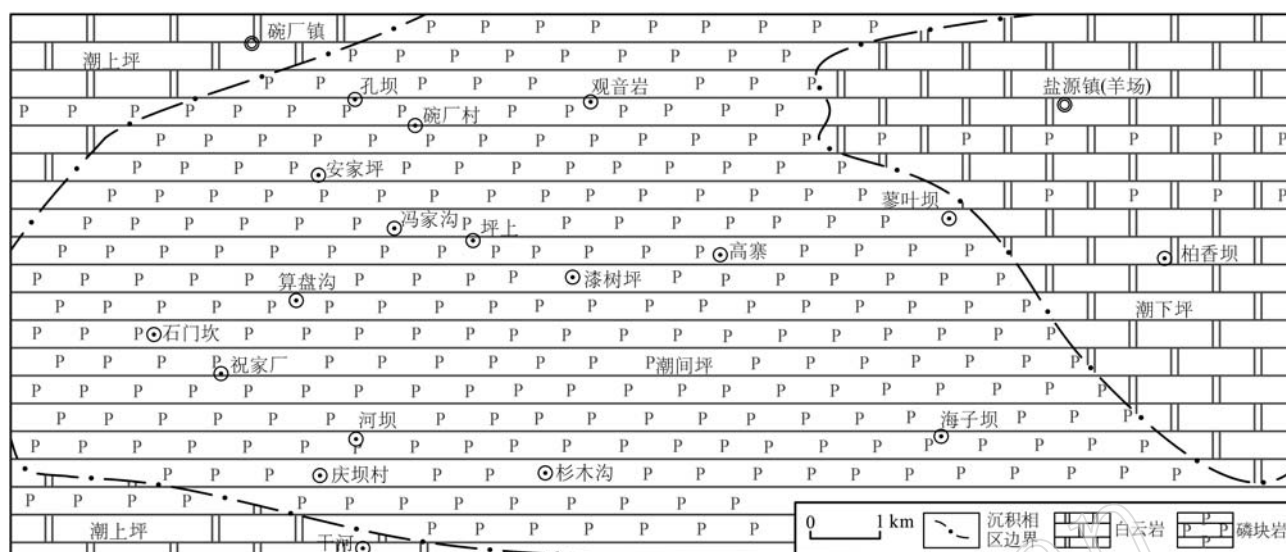


图 13 羊场磷矿区早寒武世梅树村组岩相古地理分区图

Fig. 13 Sedimentary facies and palaeogeographic partition map of the Meishueun Formation during the Early Cambrian in Yangchang phosphate deposit

期,垂向上表现为海侵-海退沉积旋回特征(图 14)。

4.1 梅树村组一段($\epsilon_1 ms^1$)

梅树村组早期,底部岩性以灰黑色含炭硅质白云岩为主,见一层厚约 4.0 m 炭质页岩,常见硅质岩夹层,且硅质白云岩较普遍,岩石中见(弱)水平层理,零星发育冲刷面,反映该区梅树村组早期在灯影组碳酸盐岩之上发生过一次快速海侵,向上水体有变浅的趋势,但仍可见代表深水沉积环境的硅质岩发育。因此, $\epsilon_1 ms^1$ 属于潮下带(低能)沉积环境。

4.2 梅树村组二段($\epsilon_1 ms^2$)

梅树村组中期,岩性主要为深灰色、灰黑色薄-中厚层状、致密块状、条(纹)带状砂屑磷块岩,磷矿层由多层深色致密状磷块岩与浅色白云质、灰质磷块岩沉积旋回组成,在每个旋回上部或顶部为角砾状、致密块状磷块岩或厚条带状磷块岩,通常形成 I 品级矿体。旋回底部常为白云质、灰质磷块岩,磷矿化较弱,说明 $\epsilon_1 ms^2$ 主体处于水体较浅的潮间带高能环境。根据其沉积特征,划分为 3 个阶段:

(1) 第 1 层($\epsilon_1 ms^{2-1}$):KT3 矿体赋存层位,磷块岩呈条(纹)带状顺层分布,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,相对海平面有所下降,以潮间灰坪为主。

(2) 第 2 层($\epsilon_1 ms^{2-2}$):KT3 与 KT2 矿体(层)之

间夹层,为含磷质白云岩、硅质白云岩等,偶见磷质与硅质透镜体及磷质纹层,发育水平层理,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,以潮间灰坪为主。

(3) 第 3 层($\epsilon_1 ms^{2-3}$):KT2 矿体赋存层位,以粒屑磷块岩为主,发育波状层理、脉状层理,且含磷颗粒(砂砾屑)显著增大,含矿层单层厚度明显变厚,表明水动力条件较无矿夹层明显增强,以高能环境的潮间滩为主。

4.3 梅树村组三段($\epsilon_1 ms^3$)

梅树村组晚期,岩性主要为含磷质白云岩、白云质灰岩,局部磷质砂屑稀疏分布而富集形成 KT1 矿体,说明 $\epsilon_1 ms^3$ 主要处于水体较浅的潮上带高能环境。根据其沉积特征,划分为 3 个阶段:

① 为 KT1 矿体底板,为含磷质白云岩、白云质灰岩,发育水平层理,表明水动力条件较弱,以低能环境的潮上灰坪为主。

② 为 KT1 矿体赋存层位,磷块岩局部富集为 III 品级矿,磷质条(纹)带顺层断续分布,发育冲刷面、正粒序层理,反映受风暴浪和潮汐水流的作用,表明水动力条件较强,以高能环境的潮上滩为主。

③ 为 KT1 矿体顶板,为灰质白云岩、含磷质灰岩,见少量磷质砂屑稀疏分布,表明水动力条件较弱,以低能环境的潮上灰坪为主。

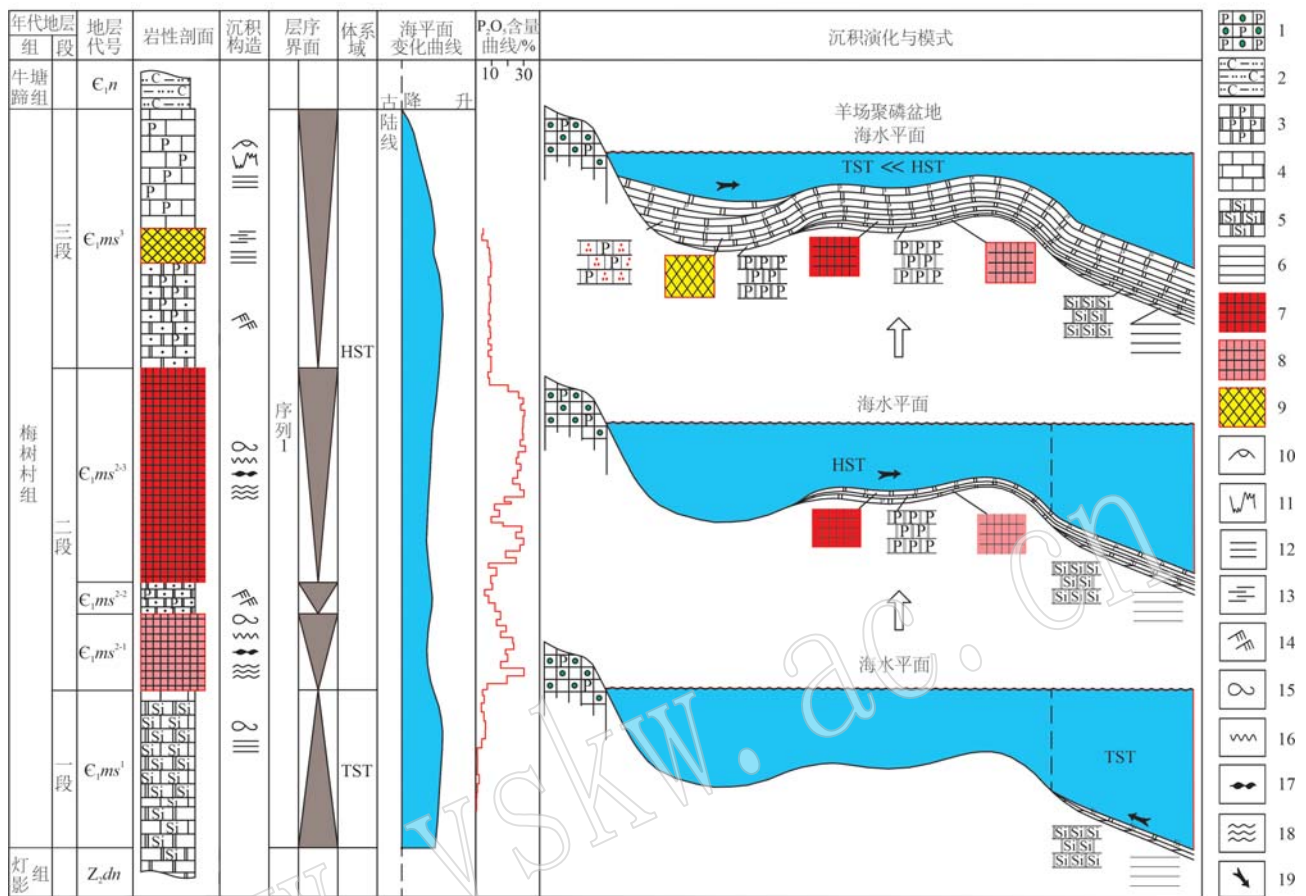


图 14 羊场磷矿含磷岩系沉积演化过程图

Fig. 14 Sedimentary evolution process diagram of phosphorus bearing rock series in Yangchang phosphate deposit

1—含磷基底岩系; 2—含炭质泥质粉砂岩; 3—含磷白云岩; 4—灰岩; 5—硅质白云岩; 6—硅质岩; 7—Ⅱ品级矿层; 8—Ⅲ品级矿层; 9—低品位矿层; 10—鸟眼构造; 11—缝合线; 12—水平层理; 13—平行层理; 14—沙纹层理; 15—条带; 16—条纹; 17—脉状层理; 18—波状层理; 19—洋流方向

1—phosphorus-bearing basement rock series; 2—carbonaceous argillaceous siltstone; 3—phosphorus-bearing dolomite; 4—limestone; 5—siliceous dolomite; 6—siliceous rock; 7—grade II ore bed; 8—grade III ore bed; 9—low-grade ore layer; 10—bird-eye structure; 11—stylolite structure; 12—horizontal bedding; 13—parallel bedding; 14—ripple lamination; 15—banded structure; 16—stripe structure; 17—flaser bedding; 18—wavy bedding; 19—direction of oceanic current

5 磷矿富集机制分析

羊场聚磷盆地早寒武世梅树村期处在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,磷酸盐堆集由贫到富,形成大量磷酸盐类的堆积是在潮上-潮间高能相带沉积环境中,海水中磷质沉积后形成半固结状态磷质沉积物,部分再次经海水的冲刷、搬运重新胶结,从而形成磷块岩。该区磷矿的初次沉积与再次富集均与古构造控制的古地理位置

相关(戈宏儒等, 1983),受川滇坳陷中深大断裂控制了成磷盆地的形成、演化和磷富集,其沉积相带呈南北向延伸、东西向成行排列(刘宝珺等, 1987; 王聚杰等, 2015)。在康滇古构造隆起带和川黔碳酸盐浅水台地之间存在着受南北向古断裂(小江断裂带等)控制的相对凹陷带(川滇潮坪海湾)(陈志明等, 1987; 周传明等, 1997)。上扬子地区在海侵背景下接受沉积,形成由碳酸盐岩、磷块岩、硅质岩组成的缓坡,由西南古陆向东为近岸潮坪→具障壁滩的浅水缓坡(含磷酸盐、碳酸盐缓坡)→深水缓坡(含磷硅质岩缓坡),直入陆坡深水盆地(邓小林等, 2007; 金振奎等, 2013; 李皎等, 2014; 王鹏万等,

2016; 张君等, 2018; 杨豫川等, 2019)。赋矿地层梅树村组为一套浅海碳酸盐和磷酸盐沉积, 岩性主要为白云岩、硅质白云岩、内碎屑磷块岩, 少量硅质岩和灰岩等。早寒武世梅树村期, 由于该地区处于低纬度热带信风区, 磷质来源丰富, 海侵及上升洋流作用促使梅树村期成为重要的成磷期, 构成大型磷矿带和磷矿聚集区(骆学全, 1993; 牟南等, 2005; 岳维好等, 2012; 王登芳等, 2016; 李佐强等, 2023)。磷块岩与白云岩共生, 表明它们都是低纬度半干旱气候的产物(刘发禄, 1985; 邓小林等, 2007, 2009)。磷块岩矿床多形成于地台边缘的活动带, 为海湾潮坪环境(曾允孚等, 1994; 刘建清等, 2022), 其中潮间坪中高能水动力的潮间滩是最有利于磷块岩的形成。

早寒武世初期是磷质富集时期, 古陆上的风化壳通过地表径流向海水中不断运移磷质, 使海水中的磷酸盐达到一定的浓度, 在相对稳定的海洋环境中使磷酸盐发生沉淀和堆积; 另外, 当时地壳活动导致壳下物质上升, 磷质汇集大洋深部, 形成洋底富磷海水。受板块俯冲作用, 在大洋逐渐消失过程中的残余海致使洋流上翻; 当上升的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(杨卫东等, 1990; 米云川等, 2021)。由于大规模海侵和上升洋流以及风暴事件影响, 形成一套主要为灰岩、泥质白云岩、磷质岩和磷块岩的含磷岩组合, 受水动力条件的影响形成厚层状、致密块状、条纹(带)状磷块岩(刘永先等, 1994; 杨帆等, 2011)。磷矿层呈层状、似层状产出, 矿体厚度由中心部位向边缘递减, 直至尖灭, 其主要受沉积时的古地理控制, 古隆起两侧较薄, 沉积盆地中心地带厚度较大, 总体为北西厚南东薄。

早寒武世梅树村期是羊场聚磷盆地微生物繁衍的重要时期, 上升洋流携带富磷海水上涌至浅水透光层为生命活动提供物质来源, 海水藻类生物迅速繁殖, 生物降解、释放磷质进一步增加了海水磷酸盐浓度。由于生物作用在自然环境条件下通过生物的分解、转化对磷的溶解、迁移、富集和叠加改造再沉

积(陈其英, 1995); 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, 颗粒以磷质砂、砾屑为主, 少量鲕粒、豆粒和团粒等, 颗粒含量越高, 矿石品位越富。因此, 该区磷矿石品位与沉积环境相关(杨杰东等, 1989; 东野脉兴, 2001; 杨海英等, 2020)。后期经多期次波浪、潮汐和风暴等动力的反复作用使先沉积的半固结凝胶状磷质沉积物遭到破碎、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, 形成砂屑、砾屑磷块岩, 具斜层理、潮汐层理, 反映了潮间带浅水高能成磷环境, 说明矿床是经过一定的物理机械作用富集形成(曾允孚等, 1987; 邓小林等, 2007; 李佐强等, 2023)。由于沉积环境的旋回性变化伴随生物、化学和物理作用的反复进行, 磷酸盐聚集的多期性, 形成矿床具有多层结构, 成矿后受羊场背斜叠加改造, 使磷矿层变富厚, 矿床规模变大。

羊场磷矿成矿模式主要经历初始堆积沉淀成矿阶段(上升洋流携带的磷质来源)→生物化学凝聚沉淀与加积异化成矿阶段(微生物分解、转化及复合作用驱动的迁移与富集成矿)→簸选富集与再富集成矿阶段(多期次波浪、潮汐作用驱动的沉淀再次富集成矿)3个阶段(图15), 具体为:

(1) 早寒武世初期是磷质富集时期, 上升洋流把富磷的海水带到浅海地带时, 温度升高和压力降低, 使磷以磷酸钙的形式沉积于浅海地带的边缘上, 由于大规模海侵和上升洋流以及风暴事件影响, 形成半固结状态磷酸盐沉积物。

(2) 由于生物作用在自然环境条件下通过微生物的分解、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。

(3) 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、南东逐渐变薄贫的海相沉积碳酸盐岩型层状磷块岩矿床。

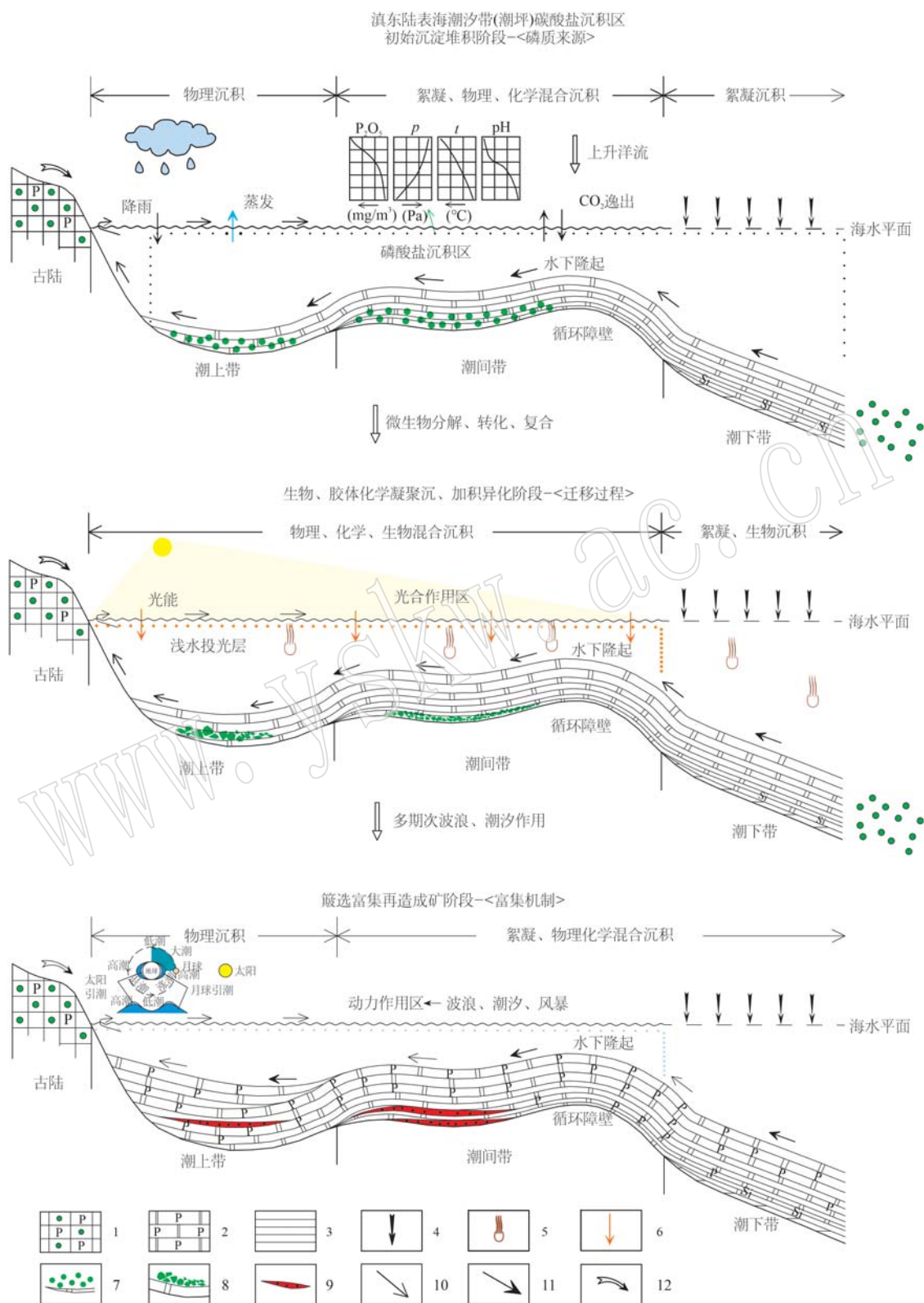


图 15 羊场磷矿床成矿过程及模式图

Fig. 15 Metallogenic process and ore forming model of the Yangchang phosphate deposit

- 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—光合作用方向；7—磷酸盐沉积物；8—半固结状态磷酸盐沉积物；9—砂屑磷块岩；10—洋流方向；11—壳源输入；12—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—direction of photosynthesis; 7—phosphate deposits; 8—semi-consolidated phosphate deposits; 9—sandstone phosphorite; 10—direction of oceanic current; 11—crustally derived input; 12—terrigenous input

6 结论

(1) 梅树村组是羊场磷矿床的赋矿地层, 沉积环境为浅海碳酸盐台地干热潮坪环境, 沉积相为潮上-潮间坪高能富白云岩、磷块岩相, 为一套硅泥质-白云质-磷质岩、磷块岩、硅质白云岩、硅质岩建造。

(2) 梅树村组沉积(微)相主要有潮上坪、潮间坪和潮下坪3个亚相6种微相, 潮上坪分为潮上滩、潮上灰坪, 潮间坪分为潮间灰坪、潮间滩、风暴流, 潮下坪发育低能潮下坪, 垂向上表现出海侵-海退沉积演化序列。其中, 潮间坪中高能水动力的潮间滩是最有利于磷块岩的形成, 长期保持浅水环境下多期次潮汐、波浪反复作用使磷颗粒筛选富集, 是形成富厚的磷块岩矿床的关键。

(3) 羊场磷矿床成矿作用主要经历初始堆积沉淀成矿阶段(上升洋流携带的磷质来源)→生物化学凝聚沉淀与加积异化成矿阶段(微生物分解、转化及复合作用驱动的迁移与富集成矿)→筛选富集与再富集成矿阶段(多期次波浪、潮汐作用驱动的沉淀再次富集成矿)3个阶段, 形成北西矿层富厚、南东逐渐变薄贫的海相沉积碳酸盐岩型层状磷块岩矿床。

致谢 衷心感谢审稿专家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 Qiyang. 1995. Microbiological processes in genesis of phosphorite deposits [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 30(2): 153~158 (in Chinese with English abstract).
- Chen Zhiming and Chen Qiyang. 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).
- Liu Baojun, Xu Xiaosong, Luo Anping, *et al.* 1987. Storm events and phosphate deposition in Cambrian on the western margin of the Yangtze platform, China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 5(3): 28~39, 186 (in Chinese with English abstract).
- Liu Falu, Huang Jufang 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): 1 908~1 922 (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): 17~36 (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 Zhenxiong 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).
- 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*, 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 Weidong and Zeng Yunfu. 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 Yuchuan, Peng Xianghui, Zhang Jun, *et al.* 2019. Sedimentary characteristics and phosphorite mineralization model of maoping formation in Mabian area, Sichuan[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 35(1): 29~36 (in Chinese with English abstract).
- Yang Zhixian, Deng Quanjiang, 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): 1323~1331 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Yunfu, Shen Lijuan, He Tinggui, *et al.* 1994. Sequence stratigraphy analysis of phosphorus-bearing rock series in 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 phosphorite 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]. *Scientia Geologica Sinica*, 32(2): 201~211 (in Chinese).

附中文参考文献

- 陈其英. 1995. 磷块岩形成过程中的生物作用[J]. *地质科学*, 30(2): 153~158.
- 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]. 古地理学报, 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.
- 刘宝珺, 许效松, 罗安屏, 等. 1987. 中国扬子地台西缘寒武纪风暴事件与磷矿沉积[J]. 沉积学报, 5(3): 28~39, 186.
- 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.
- 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.
- 杨志鲜. 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 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.
- 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.