

云南省寻甸县没租哨磷矿床“三位一体”成矿特征与勘查技术

刘明勇¹, 程迁群¹, 郑晓军², 张金学^{1*}, 王林贵³, 肖太友¹, 王德君¹, 张贵平¹

¹云南省有色地质局三一〇队, 云南 大理

²云南省有色地质局科技与对外合作处, 云南 昆明

³中化云龙有限公司, 云南 昆明

收稿日期: 2024年7月22日; 录用日期: 2024年9月6日; 发布日期: 2024年9月18日

摘要

寻甸没租哨大型磷矿床的勘探发现与近年业界新突破的“云南省镇雄县羊场-芒部地区磷矿”超大型矿床共同进一步验证了区域磷矿带向NE延展的分布规律, 为区域寻找隐伏磷矿床呈现了空间和方向。本文运用“勘查区找矿预测理论与方法”进行典型矿床研究。从北至南形成硝滩-羊场、九龙-会泽、昆明-华宁三大聚磷盆地典型矿床, 分别以镇雄县羊场磷矿、寻甸县没租哨磷矿、晋宁县昆阳磷矿为代表, 从成矿地质体、成矿构造系统与成矿结构面, 以及成矿作用特征标志“三位一体”进行对比研究。以早寒武世含磷岩系为成矿地质体, 以中宜村段碳酸盐岩、硅质岩及磷块岩含磷岩系为主要成矿构造岩性岩相界面, 梳理沉积成矿作用特征标志, 建立“三位一体”地质模型。总结形成了快速找矿技术方法: “沉积盆地建造(成磷盆地)+ 层位+ 岩性界面(标志层)+ 磷矿层+ 钻探”。

关键词

勘查技术, “三位一体”成矿特征, 磷矿床, 寻甸没租哨

The “Three-in-One” Metallogenic Characteristics and Exploration Technology of Mozushao Phosphorus Deposit in Xundian County, Yunnan Province

Mingyong Liu¹, Qianqun Cheng¹, Xiaojun Zheng², Jinxue Zhang^{1*}, Lingui Wang³, Taiyou Xiao¹, Dejun Wang¹, Guiping Zhang¹

¹The Geological Team No.310, Yunnan Provincial Bureau of Non-Ferrous Geology, Dali Yunnan

*通讯作者。

文章引用: 刘明勇, 程迁群, 郑晓军, 张金学, 王林贵, 肖太友, 王德君, 张贵平. 云南省寻甸县没租哨磷矿床“三位一体”成矿特征与勘查技术[J]. 地球科学前沿, 2024, 14(9): 1223-1236. DOI: 10.12677/ag.2024.149113

²Yunnan Provincial Bureau of Non-Ferrous Geology Science and Technology and External Cooperation, Kunming Yunnan

³Zhonghua Yunlong Co., Ltd., Kunming Yunnan

Received: Jul. 22nd, 2024; accepted: Sep. 6th, 2024; published: Sep. 18th, 2024

Abstract

The exploration and discovery of the Xundian Mozushao large-scale phosphorus deposit and the new breakthrough in the industry in recent years, the super-large phosphorus deposit in the Yangchang-Mangbu area of Zhenxiong County, Yunnan Province, have further verified the distribution law of the regional phosphorus belt extending to NE, and presented the space and direction for the regional search for concealed phosphorus deposits. In this paper, the theory and method of prospecting prediction in exploration area are used to study typical deposits. From north to south, three typical deposits of phosphate-accumulating basins, Xiaotan-Yangchang, Jiulong-Huize and Kunming-Huaning, are formed. The Yangchang phosphate deposit in Zhenxiong County, the Mozushao phosphate deposit in Xundian County and the Kunyang phosphate deposit in Jinning County are taken as the representatives. The ore-forming geological body, ore-forming structural system and ore-forming structural plane, as well as the “three-in-one” of ore-forming characteristics are compared and studied. Taking the Early Cambrian phosphorus-bearing rock series as the metallogenic geological body, and the carbonate rock, siliceous rock and phosphorus-bearing rock series of Zhongyicun section as the main metallogenic structural lithology and lithofacies interface, the characteristics of sedimentary mineralization are sorted out, and the “three-in-one” geological model is established. A rapid prospecting technology method was summarized “sedimentary basin formation (phosphorus-forming basin) + horizon + lithologic interface (marker layer) + phosphate rock layer + drilling”.

Keywords

Exploration Technology, “Three-in-One” Mineralization Characteristics, Phosphate Deposits, Xundian Mozushao

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

早寒武世初期的磷块岩层位具全球对比意义，亦是云南主要磷矿资源类型。本文依托《云南省寻甸县没租哨磷矿勘探》项目，累计探获 I+II+III 品级矿石量大于 9 千万吨，勘查程度达勘探；寻甸没租哨大型磷矿床的勘探发现属已开采矿山没租哨磷矿采矿权外围潜力区找矿的突破，与近年业界新突破的“云南省镇雄县羊场-芒部地区磷矿”超大型矿床共同进一步验证了区域磷矿带向 NE 延展的分布规律，为区域找矿方法的选择增添实证和提供参考依据。勘查区内勘查历程呈现了由找露头矿到找深部隐伏盲矿体的找矿不断深入勘探过程。前人对云南东部早寒武世梅树村阶梅树村组(渔户村组)沉积型磷矿床从成矿地质体地层、矿物岩石学、岩相古地理、矿产的富集机理与开发利用等方面作了较为系统的研究。总体上，从成矿地质体、成矿构造和成矿结构面、成矿作用特征“三位一体”的角度研究本区磷矿的成矿规律和控矿因素等相对欠缺。通过系统收集和分析前人研究成果，通过类比分析法，针对沉积型磷矿床

构建成矿地质体、成矿构造和成矿结构面、成矿作用特征“三位一体”地质模型，以早寒武世含磷岩系为成矿地质体，以中宜村段碳酸盐岩、硅质岩及磷块岩含磷岩系为主要成矿构造岩性岩相界面，梳理沉积成矿作用特征标志为主要矛盾开展勘查工作，总结找矿标志，对下一步区域隐伏矿体找矿具有新的启示和实践意义。

2. 区域地质背景

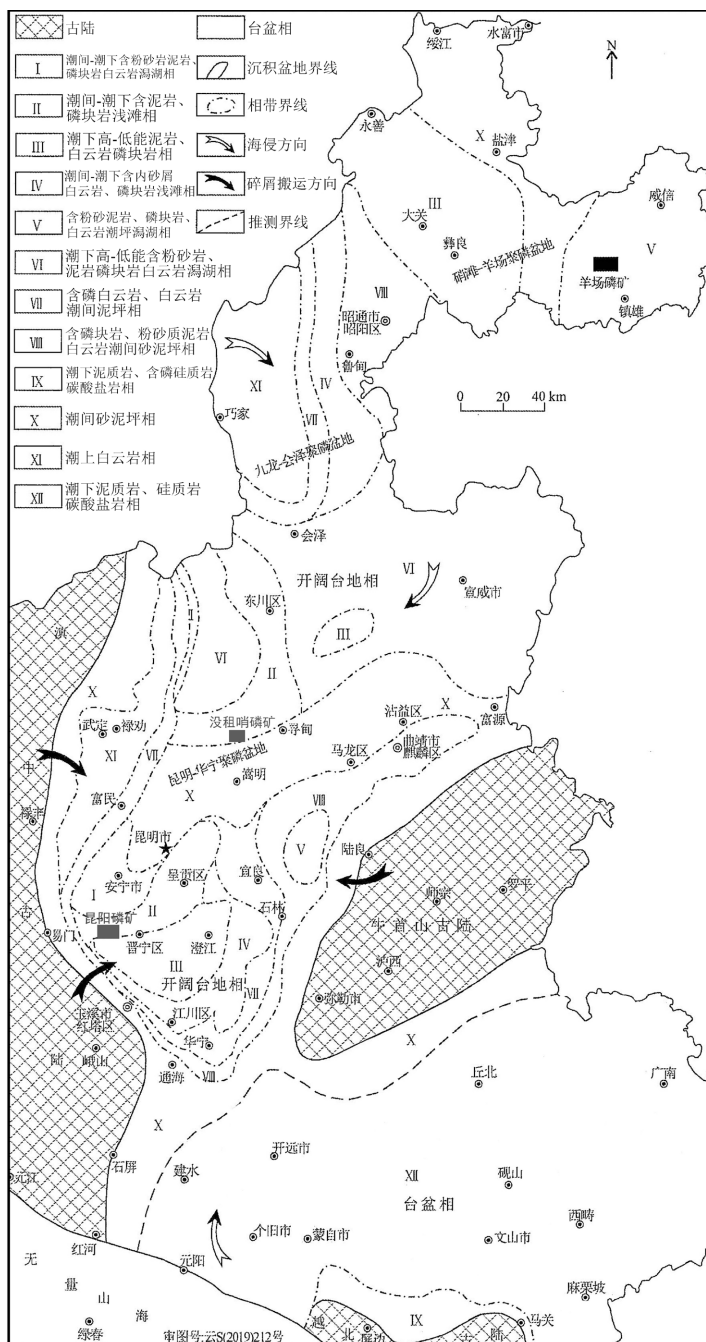


Figure 1. Lithofacies palaeogeographic map of Middle Yicun stage of early Cambrian in eastern Yunnan (adapted from reference [1])

图 1. 滇东早寒武世中宜村期岩相古地理图(据文献[1])

云南东部处在自晚震旦世以来形成的上扬子浅水碳酸盐岩台地之西部，其北面有康定古陆，东部有牛首山古陆，南西部有滇中古陆分别与华南海、滇西海及滇青藏-秦岭海阻隔，组成了既与广海相通、又有较大阻挡的较为闭塞的海湾环境[2]。勘查区大地构造位置上处于扬子准地台(I)滇东台褶带(I3)昆明台褶带(I13)嵩明台凹(I1-13)东部，为普渡河大断裂与小江深断裂带所夹持地带，属褶皱基底上的长期拗陷区，位于华宁陆表海 IV 级构造单元，东川-易门(基底隆起) Fe-Cu-Pb-Zn-Ti-Sn-Al-W-Mn-磷-硫-重晶石-盐类 IV 级矿带，区域上属于早寒武世川滇成矿带的一部分。该磷矿带南起云南省华宁，经昆阳、海口、尖山、安宁、会泽、雷波、马边、峨眉、绵竹一直延伸到陕西宁强一带，向东延至贵州省全县的打麻厂，全长约 1300 km [3]。

早寒武世梅树村成磷期，南北向古断裂控制着古地理的基本格局，西昌-易门断裂与滇中古陆东缘边界基本吻合，普渡河、小江断裂影响相带环境的分布。由于普渡河断裂与小江断裂夹持地带的均匀下降，加之近东西向的巧家-五星、嵩明水下隆起的影响，产生“二隆三洼”的古地理、古构造格局，从北至南形成硝滩-羊场、九龙-会泽、昆明-华宁三大聚磷盆地，相应划分为绥江-永善-昭通、镇雄-威信、巧家-会泽-武定、安宁-华宁-曲靖四大成磷区(图 1)。其中，巧家-会泽-武定成磷区，北至巧家-五星水下隆起带，南到嵩明水下隆起带，西为滇中古陆，东是广海。寻甸没租哨(先锋)磷矿带即位于聚磷盆地南端位于寻甸县西部，处于南北向小江深大断裂带西侧、近东西向先锋断裂两盘，从北东到南西依次分布摆宁、没租哨(先锋)、大转湾及腮磷矿[2]。

3. 矿区地质特征

区域上含磷岩系下寒武统渔户村组(梅树村组)一般可划分为下段小歪头山段碎屑岩及硅质岩、中段中谊村段含磷碳酸盐岩、硅质岩及磷块岩，以及上段大海段碎屑岩、碳酸盐岩及硅质条带或结核 3 个岩性段，寒武系沉积基底为上震旦统灯影组砂泥质建造和碳酸盐建造。下寒武统筇竹寺组粘土岩碎屑岩建造，含磷岩系顶板，实际是一个完整的沉积旋回，含磷岩系作为这个旋回的一部分(表 1)。本文采用现在勘探资料的划分方案，与区域上对比，矿区梅树村阶渔户村组三段地层均存在，大海段在矿区进一步划为二个岩性段，其下部($\epsilon_1 y^3$)为灰岩段，中上部($\epsilon_1 y^4$)为粉砂岩段。矿区出露地层由老至新有上震旦统灯影组(Zbdn)，下寒武统渔户村组($\epsilon_1 y$)、筇竹寺组($\epsilon_1 q$)、沧浪铺组($\epsilon_1 c$)、龙王庙组($\epsilon_1 l$)及第四系(Q)。

渔户村组($\epsilon_1 y$)分布于勘查南部及南东，为灰-深灰色泥质粉砂岩、含磷白云岩、磷块岩、白云岩夹黑色炭质粘土，厚 167.05~221.27 m，为矿区含磷地层。根据岩性及含矿性从下到上分为四段：

第一段($\epsilon_1 y^1$)：浅灰色中层状微至细晶白云岩及含磷白云岩，夹硅质条带。厚 7.13~17.56 m。

第二段($\epsilon_1 y^2$)：含磷岩段，根据岩性及含矿性分为三个亚段。第一亚段($\epsilon_1 y^{2-1}$)为磷块岩段，为角砾状磷块岩、鲕粒状磷块岩、砂屑磷块岩、致密块状磷块岩、条带状磷块岩，厚 1.80~17.34 m，与第一段($\epsilon_1 y^1$)为平行不整合接触，矿层直接底板为厚 0.2 m 的褐色锰土或风化灰岩。第二亚段($\epsilon_1 y^{2-2}$)为白云岩段，为浅灰至灰色中层状微至细晶白云岩及含磷白云岩，厚 0~18.40 m，与第一亚段($\epsilon_1 y^{2-1}$)的界线依据为以 P_2O_5 含量低于边界品位为该亚段，反之为($\epsilon_1 y^{2-1}$)。该层较为稳定，一般 P_2O_5 含量低于边界品位；第三亚段($\epsilon_1 y^{2-3}$)为上含磷岩段，为灰色粘土质粉砂岩、粘土岩、含磷粉砂岩、含磷白云岩，夹磷块岩薄层，局部地段富集成矿。经济价值不太大。厚 3~16 m。

第三段($\epsilon_1 y^3$)：灰至深灰色粘土质粉砂岩，粉砂岩，局部夹白云岩薄层。厚 3~26 m。

第四段($\epsilon_1 y^4$)：灰-深灰色粘土质粉砂岩夹灰色粘土岩。顶、底为炭质粘土岩，并作为该段标志层。厚 97~161 m。

Table 1. Division of regional lower Cambrian phosphorus-bearing rock series [2]**表 1.** 区域下寒武统含磷岩系划分[2]

| 地层划分 | | 中国矿产地质云南卷化工矿产(2020) | | 罗惠麟等(1982) | | 本次勘探 | |
|------|------|---------------------|-------|------------|-------|------|----------------------|
| 统 | 阶 | 组 | 段 | 组 | 段 | 组 | 段 |
| 下寒武统 | 筇竹寺阶 | 筇竹寺组 | 玉案山段 | 筇竹寺组 | 玉案山段 | 筇竹寺组 | $\epsilon_1 q$ |
| | | | 八道湾段 | | 八道湾段 | | |
| | 梅树村阶 | 梅树村组 | 大海段 | 渔户村组 | 大海段 | 渔户村组 | 第四段 $\epsilon_1 y^4$ |
| | | | 中谊村段 | | 中谊村段 | | 第三段 $\epsilon_1 y^3$ |
| 上震旦统 | 灯影阶 | 灯影组 | 小歪头山段 | 灯影组 | 小歪头山段 | 灯影组 | 第二段 $\epsilon_1 y^2$ |
| | | | 白岩哨段 | | 白岩哨段 | | 第一段 $\epsilon_1 y^1$ |
| | | | 旧城段 | | 旧城段 | | Zbdn |

巧家 - 会泽 - 武定成磷区主要褶皱构造有轴向北东 - 南西转近南北的五星背斜, 轴向北东 - 南西的雨碌背斜, 轴向北北东 - 南南西的金牛厂背斜。背斜轴部地层均被剥蚀, 呈负地形, 磷矿体(层)露头沿背斜两翼分布。该成磷区内主要断裂构造有中部南北向小江深大断裂, 西部边缘南北向普渡河深大断裂, 北东 - 南西向会泽绕山分布。马路断裂、待补断裂及寻甸 - 德泽断裂, 另外北西 - 南东、北东 - 南西、东西向众多次级横断层极为发育。断裂构造控制和影响矿区磷矿体(层)的分布, 形成矿带或矿区的自然边界。寻甸先锋磷矿带位于聚磷盆地南端位于寻甸县西部, 处于南北向小江深大断裂带西侧、近东西向先锋断裂两盘[2]。

矿区主构造线方向为近东西向, 晚期发育近南北向构造, 常错断早期近东西向构造。褶皱断裂总体为一不对称的没租哨破背斜构造, 勘查区大部分面积位于没租哨背斜北翼范围, 背斜轴向 70° , 长大于 5 km, 核部宽 1~3 km, 由上震旦统灯影组组成, 被法古断层破坏, 两翼依次为寒武系下统 - 二叠系。北翼地层倾向 $10^\circ\sim 20^\circ$, 倾角 $5^\circ\sim 30^\circ$, 南翼地层倾向 $120^\circ\sim 140^\circ$, 倾角 $25^\circ\sim 40^\circ$, 北东部近背斜倾伏端处断裂较发育。寒武系下统渔户村组(含磷层)环绕背斜核部分布。断裂构造以东西向走向为主, 少量南北向断层切断东西向断裂或被东西向断裂限制, 属晚期断裂。位于勘查区中部的法古断裂(F1)是矿区的主干断层, 该断裂, 由 F1-1、F1-2、F1-3 三条断层组成, 将矿区分割为南北两个矿段, 矿区内出露长 1500 m, 走向近东西, 倾向南, 倾角 $68^\circ\sim 76^\circ$, 断裂带宽 5~20 m, 由糜棱岩、断层角砾岩组成, 北盘为震旦系灯影组至下寒武统筇竹寺组, 南盘为灯影组和渔户村组, 属正断层, 近断裂岩层产状紊乱, 节理裂隙发育, 分枝断裂加持断块内岩石破碎。勘查区内未见岩浆岩出露, 仅在矿区北西和南部外围 3~5 km 外有华力西期基性火山喷发形成的玄武岩。

4. 成矿地质体、成矿结构面和成矿作用特征“三位一体”对比研究

滇东早寒武世梅树村成磷期, 以早寒武世含磷岩系为成矿地质体, 从北至南形成硝滩 - 羊场、九龙 - 会泽、昆明 - 华宁三大聚磷盆地典型矿床分别以镇雄县羊场磷矿、寻甸县没租哨磷矿、晋宁县昆阳磷矿为代表。从成矿地质体、成矿构造系统与成矿结构面, 以及成矿作用特征标志“三位一体”进行对比研究(表 2)。

4.1. 成矿地质体特征

4.1.1. 构造古地理与沉积岩建造

云南东部处在自晚震旦世以来形成的上扬子浅水碳酸盐岩台地之西部, 其北面有康定古陆, 东部有

牛首山古陆，南西部有滇中古陆分别与华南海、滇西海及滇青藏-秦岭海阻隔，组成了既与广海相通，又有较大阻挡的较为闭塞的海湾环境。由于普渡河断裂与小江断裂夹持地带的均匀下降，加之近东西向的巧家-五星、嵩明水下隆起的影响，产生“二隆三洼”的浅海至滨海相碳酸盐岩泥质碎屑岩沉积古地理、古构造格局，早寒武世梅树村成磷期，从北至南形成硝滩-羊场、九龙-会泽、昆明-华宁三大聚磷盆地，处于有利的潮坪相环境、滩后潟湖相和开阔台地相陆表海环境。磷矿体的直接成矿地质体为含矿建造，赋矿层位为下寒武统梅树村阶梅树村组(渔户村组)，早寒武世梅树村期是最主要的成矿期，含磷地层由一套碳酸盐岩、磷块岩及硅质岩组成[2]。是由碎屑岩垫板-碳酸盐岩斜坡-碳酸盐岩台地组成的沉积体系，是扬子地台进入稳定发展时期的典型沉积[1]。其中，潮坪是最常见的碳酸盐岩滨海环境，潮坪沉积环境分潮上带、潮间带和潮下带[4]。本区处于川滇潮坪海湾的次级海湾环境(东川-会泽海湾)，是当时的沉积中心，其周围的潮下浅滩和潮间带下部就成为一次磷质沉积和二次磷矿富集有利部位，成矿条件极佳[5]。

Table 2. Comparison table of “three-in-one” geological model of typical deposits
表 2. 典型矿床“三位一体”地质模型对比表

| 模型要素 | 矿床 | 镇雄县羊场磷矿 | 寻甸县没租哨磷矿 | 晋宁县昆阳磷矿 |
|---------|-------|---|--|---|
| 赋矿层位 | | 下寒武统梅树村阶梅树村组(渔户村组)。 | | |
| 构造古地理类型 | | 云南东部早寒武世梅树村成磷期，“二隆三洼”的古地理、古构造格局，形成浅海至滨海相碳酸盐岩泥质碎屑岩沉积，从北至南形成硝滩-羊场、九龙-会泽、昆明-华宁三大聚磷盆地，处于有利的潮坪相环境、滩后潟湖相和开阔台地相陆表海环境[2]。 | | |
| 沉积岩建造 | | 碳酸盐岩泥质碎屑岩沉积建造中一套含磷岩系中，岩性以含磷灰质白云岩、磷质岩、磷块岩为主，少量含磷硅质白云岩[6]。 | 硅质碳酸盐岩——泥质碎屑岩含磷岩系建造。岩性灰-深灰色泥质粉砂岩、含磷白云岩、磷块岩、白云岩夹黑色炭质粘土。 | 以硅质碳酸盐岩、碎屑岩和硅质岩构成的混合沉积序列。其中的中谊村段磷块岩层假整合于小歪头山组硅质白云岩之上[7]。 |
| 成矿地质体 | 沉积构造 | 磷矿石构造主要有块状构造(富矿石)和条带-条纹状构造，另见少量角砾状构造[8]。下矿层为浅灰色钙质条带状磷块岩，具波状层理[1]。 | 磷矿石主要构造类型为条带状构造及致密块状构造。含矿岩系层理、微层理发育。 | 磷块岩段上矿层发育大型交错层理，偶见微型干裂构造。下矿层下部假整合接触面具明显的叠覆波浪、干涉波痕和干裂构造，中下具中厚层及板状层理，上部具薄板状层理。上下矿层间为灰白色凝灰质黏土岩，具极薄层水平层理[7]。 |
| | 特殊标志层 | 中矿层含灰黑色中薄层状炭质粉晶磷块，下矿层含硅质岩、炭质页岩[1]。梅树村组一段为下磷矿层底板，岩性主要为砂屑灰岩、微-粉晶白云质灰岩、白云岩、硅质岩、炭质页岩等，局部夹黑色条带及断续磷质条带，呈点状、条带状黄铁矿发育[8]。 | 渔户村组第四段($\epsilon_1 y^4$): 灰-深灰色粘土质粉砂岩夹灰色粘土岩，顶、底为炭质粘土岩，为该段标志层。矿层底部有一明显之灰岩、白云质灰岩，矿层直接底板为厚 0.2 m 的褐色锰土或风化灰岩。 | 上矿层顶部上覆黑色页岩层具极薄层状为重要标志层。上下矿层间夹有灰黄色黏土岩层，标志明显。小歪头山段为紫红色-暗绿色含海绿石砂页岩与泥质白云岩互层，底部为砾岩，该段与下伏灯影组呈不整合接触，厚约 4 m [7] [9]。 |
| | 有机质 | 显微呈黑色细小质点，呈不均匀富集在氟磷灰石集合体内，大多数混杂在胶结物中，沿层富集略显弯曲的短条纹。扁平的碳屑则沿层呈定向断续分布[2]。 | | |

续表

| | | | |
|--------------|---|--|--|
| 构造背景 | 早寒武世梅树村成磷期, 南北向古断裂控制着古地理的基本格局, 西侧西昌 - 易门断裂与滇中古陆东缘边界基本吻合, 普渡河、小江断裂影响相带环境的分布, 形成矿带或矿区的自然边界。 | | |
| 成矿构造环境 | 浅水陆棚 - 潮坪环境[8]。 | 有障壁陆表海, 进一步分为潮坪相带, 开阔台地相带和闭塞台地相带[10]。 | 浅海浪基面以上的陆源坳、台地、浅海盆地等环境[3]。 |
| 成矿构造与成矿结构面特征 | 区内磷矿体主要受 EW 向展布的羊场背斜控制, 区内长大于 21 km, 宽 14 km, 分布面积达 20 km ² 。具有顶平翼陡的特征, 两翼基本对称, 核部地层倾角较缓, 一般为 5°~13°, 翼部地倾角 20°~30° [6]。 | 处于普渡河大断裂与小江深断裂带所夹持地带, 勘查区主要位于轴向 70°的没租哨背斜北翼, 轴长大于 8 km, 核部宽 1~3 km。北翼地层倾向 10°~20°, 倾角 5°~30°, 南翼地层倾向 120°~140°, 倾角 25°~40°。 | 矿床位于 EW 香条冲背斜南翼东段, 总体上构成一单斜构造, 地层倾向为 160°~200°, 略呈舒缓波状变化, 倾角多为 14°~16° [3]。 |
| 沉积成矿作用岩性岩相界面 | 沉积构造系统以岩相古地理构造为主, 主要成矿构造岩性岩相界面为中宜村段碳酸盐岩、硅质岩及磷块岩含磷岩系。 | | |
| 成矿期古生物岩性岩相界面 | 生物碎屑磷块岩。 | | |
| 矿体 | 梅树村组厚为 55 m~128 m, 可分为下、中、上 3 个矿体(层), 厚 1.47 m~11.5 m, 全部为隐伏矿体。其中中、上层品质较优, P ₂ O ₅ 平均品位 25.88% [1] [8]。 | 渔户村组厚 112.43 m~168.22 m, 梅树村组厚为 114.54 m~174.37 m, 划分为上下 2 层工业磷矿体, 厚 0.60~8.22 m, P ₂ O ₅ 平均品位 25.33%。 | 厚 0.21 m~13.37 m, P ₂ O ₅ 平均品位 25.96% [2]。 |
| 成矿年龄 | 对昆阳磷矿梅树村组石岩头段黑色页岩(上矿层顶板)开展 Re-Os 等时线年龄为 521.9 ± 5.4 Ma [7]。利用高精度离子探针技术, 对昆阳磷矿中宜村段两层磷块岩层之间的凝灰岩层定年, 获得了 SIMS 锆石 U-Pb 年龄为 535 ± 1.7 Ma [9]。 | | |
| 成矿作用特征标志 | 矿石矿物为氟磷灰石(胶磷矿)、结晶磷灰石、碳磷灰石, 脉石矿物以钙质、白云石为主, 次为方解石、石英、玉髓、炭质、黄铁矿、生物碎屑。矿石结构主要为自形 - 半自形结构、凝胶砂屑结构及交代结构。 | 矿石矿物主要为胶磷矿, 含少量次生磷铝石、银星石, 脉石矿物主要为白云石, 次为硅质(石英)、粘土矿物、碳质物、黄铁矿及陆源碎屑物(主要是粉石英颗粒)。矿石结构以砂屑结构、粒屑结构为主, 次有鲕状结构、团粒结构、土状结构及胶状集合体结构。 | 矿石矿物主要为胶磷矿, 次为微至细晶磷灰石, 脉石矿物主要有白云石及少量陆源碎屑。矿石结构有砾状结构、粒屑结构、状结构、生物碎屑结构及凝胶状结构。 |
| 矿石地球化学特征 | w(P ₂ O ₅) 34.84%, w(SiO ₂) 10.55%, w(Al ₂ O ₃) 0.36%, w(CaO) 43.45%, w(MgO) 1.56%, w(MnO) 0.13%, 镁铝含量比值 m = 540.55 | w(P ₂ O ₅) 23.11%, w(SiO ₂) 6.09%, w(Al ₂ O ₃) 0.97%, w(CaO) 43.45%, w(MgO) 6.07%, w(MnO) 0.26%, 镁铝含量比值 m = 625.70 | w(P ₂ O ₅) 29.32%, w(SiO ₂) 12.17%, w(Al ₂ O ₃) 1.51%, w(CaO) 43.59%, w(MgO) 2.27%, w(MnO) 0.057%, 镁铝含量比值 m = 418.47 |
| 矿源 | 含磷的陆源碎屑和富含磷质的海洋生物 | | |
| 矿体(带)规模 | 超大型 | 大型 | 超大型 |

硝滩-羊场聚磷盆地以羊场磷矿为代表,磷矿体赋存于下寒武统梅树村组碳酸盐岩泥质碎屑岩沉积建造中部的一套含磷岩系中,岩性以含磷灰质白云岩、磷质岩、磷块岩为主,少量含磷硅质白云岩。其中,梅树村组上段为含磷灰质白云岩;中矿层含灰黑色中薄层状炭质粉晶磷块,下矿层含硅质岩、炭质页岩。梅树村组下段为下磷矿层底板,岩性主要为砂屑灰岩、微-粉晶白云质灰岩、白云岩、硅质岩、炭质页岩等,局部夹黑色硅质条带及断续磷质条带,星点状、条带状黄铁矿发育[1][6]。

九龙-会泽聚磷盆地以寻甸县没租哨磷矿为代表,磷矿体赋存于下寒武统渔户村组硅质碳酸盐岩-泥质碎屑岩含磷岩系建造中。岩性为灰-深灰色泥质粉砂岩、含磷白云岩、磷块岩、白云岩夹黑色炭质粘土。渔户村组第四段($\epsilon_1 y^4$):灰-深灰色粘土质粉砂岩夹灰色粘土岩,顶、底为炭质粘土岩,为该段标志层之一;渔户村组第二段($\epsilon_1 y^2$)含深灰-灰黑色条带条纹状白云质磷岩段,在颜色及岩性上明显区别于含磷层位上下段,较为醒目,可作为寻找磷矿层的层位标志。矿区为单一矿层(上矿层),矿层底部有一明显的沉积间断面,与下伏地层为 $\epsilon_1 y^1$ 之灰岩、白云质灰岩呈平行不整合接触,矿层直接底板为厚 0.2 m 的褐色锰土或风化灰岩。没租哨勘查区整个含磷段($\epsilon_1 y^2$)为一个完整的沉积旋回。矿层底板为潮间-潮上带含磷砾屑灰岩,矿层与底板岩石有沉积间断。下部 1~3 层为一个海进半旋回序列:底部 1 层为潮间高能带生物骨粒磷块岩,2~3 层为潮间-潮下间歇高能带条带状、层纹状鲕粒、砂屑磷块岩;上部 4~5 层为一个海退半旋回序列:4 层为潮间带间歇高能环境形成的条带状含核形石磷块岩,顶部第 5 层为潮间上部高能带环境形成的核形藻磷块岩。矿层顶板为潮上带层纹藻灰岩。这表明本区磷块岩矿床主要形成于潮间-潮下间歇高能环境中[11]。

昆明-华宁磷盆地以晋宁昆阳磷矿为代表,磷矿体赋存于下寒武统梅树村组,以硅质碳酸盐岩、碎屑岩和硅质岩构成的混合沉积序列。其中的中谊村段磷块岩层假整合于小歪头山组硅质白云岩之上,具明显的冲刷面。分为 2 个矿层,上下矿层间夹有灰黄色黏土岩层,标志明显;上矿层下部为硅质白云质条带磷块岩,中部为粒屑磷块岩,发育大型交错层理,顶部为白云质磷块岩,上覆黑色页岩层具极薄层状为重要标志层。小歪头山段为紫红色-暗绿色含海绿石砂页岩与泥质白云岩互层,底部为砾岩,该段与下伏灯影组呈不整合接触,厚约 4 m [7][9]。昆明坳陷南段早寒武世早期为一海湾泻湖潮坪沉积体系[12]。

通过对比羊场磷矿区中谊村段含磷岩系与上覆大海段和下伏小歪头山段均呈整合接触[6],而其南西部的寻甸县没租哨磷矿和晋宁县昆阳磷矿大海段与下伏小歪头山段地层存在沉积间断。

4.1.2. 沉积构造

区域上含磷碳酸盐岩建造层理类型复杂,有波状、透镜状层理及冲刷槽,亦见脉状、鱼骨状层理及板状交错层理,为波浪、潮汐作用均较强烈的高能滩坝环境[8]。梅树村期是生物演化的重要时期,在梅树村组地层内发育大量种类不一的小壳化石、软舌螺、腕足类、管壳类以及虫迹化石等,并沉积了一套与生物作用相关的磷块岩层[7]。

羊场磷矿区矿石构造主要有块状构造(富矿石)和条带-条纹状构造(由白云石、硅质矿物组成的浅色条纹条带分布于深色的磷质基底中或由深色的磷质矿物组成条纹条带分布于浅色白云石、硅质矿物基底中,单个条带厚一般 1 cm~3 cm) [8]。下矿层产于中谊村段下部灰色-深灰色、薄-中层状粉-微晶砂屑灰岩、微-粉晶白云质灰岩、白云岩、硅质岩、炭质页岩中,矿石为浅灰色钙质条带状磷块岩,具波状层理[1]。

没租哨磷矿区矿石主要构造类型为条带状构造及致密状构造。纵向上,矿石类型由下至上为泥质条带状磷块岩、泥质条纹状磷块岩、白云质条带状磷块岩、致密块状磷块岩沉积序列;横向上,矿石类型从西到东由白云质条带状磷块岩、致密块状磷块岩-泥质条带状磷块岩、泥质条纹状磷块岩、白云质条

带状磷块岩、致密块状磷块岩-泥质条纹状磷块岩、白云质条带状磷块岩、致密块状磷块岩沉积序列变化。台隆区沉积各种砂质、泥质白云岩,在台隆与台凹交界处的斜坡主要沉积白云质条带状、致密块状磷块岩,台凹内从下至上沉积序列为白云岩-泥质条带状磷块岩-泥质条纹状磷块岩-白云质条带状磷块岩-致密块状磷块岩-白云岩夹磷块岩条带。

晋宁昆阳磷矿区磷块岩段上矿层下部为硅质白云质条带磷块岩,中部为粒屑磷块岩,发育大型交错层理。顶部为白云质磷块岩,偶见微型干裂构造,向上白云质组分增多,同时扫描电镜下见石盐晶体,反映逐渐变浅的泻湖沉积环境。上覆黑色页岩层具极薄层状,粒度由下至上呈细-粗-细多个韵律旋回。磷块岩段下矿层下部与下伏小歪头山组呈假整合接触,接触面具明显的叠覆波痕、干涉波痕和干裂构造,表明水动力较强,水位频繁变化和间歇性暴露等特征;下矿层中下部为中粒砂屑磷块岩,为亮晶磷灰石和白云石胶结,具中厚层及板状层理,含丰富的小壳化石,反映水平面有所变深;下矿层上部主要为灰白色硅质白云质条带磷块岩,具薄板状层理,与中部比较,小壳化石减少,其上为灰白色凝灰质黏土岩,具极薄层水平层理,表明水动力很弱,为深水沉积环境[7]。

从北东到南西对比镇雄县羊场磷矿、寻甸县没租哨磷矿和晋宁县昆阳磷矿三个矿床含磷岩系所含炭质层的产出存在差异,没租哨磷矿和昆阳磷矿含磷岩系炭质层主要产出在矿层顶部,羊场磷矿的中下两个矿层以及矿层底板均存在炭质层。

4.2. 成矿构造与成矿结构面特征

4.2.1. 古构造特征

晋宁运动奠定了扬子地区的基本格架,早震旦世前,元江-红河岩石圈断裂等深大断裂的活动,使扬子地台整体上升,转入地台发育阶段。震旦纪和寒武纪,扬子地台进入稳定发展时期,扬子地台周边深大断裂的活动及扬子地台内部大断裂的活动,使地台内部形成数个隆起和断陷,各类磷块岩都形成于陆架区域的沉积盆地中。震旦纪哀牢山以西的大洋,属于板块俯冲带的残余海,海水沿哀牢山南北进入扬子陆块,故震旦纪及早寒武世的海侵来自北西方向和南东方向,这是早寒武世磷块岩主要形成于云南东部的区域性背景。早寒武世梅树村成磷期,南北向古断裂控制着古地理的基本格局,西侧西昌-易门断裂与滇中古陆东缘边界基本吻合,普渡河、小江断裂影响相带环境的分布,形成矿带或矿区的自然边界。沉积构造系统以岩相古地理构造为主,主要成矿构造岩性岩相界面为中宜村段碳酸盐岩、硅质岩及磷块岩含磷岩系。

4.2.2. 勘查区次生构造对含磷岩系的保存和出露的控制作用

勘查区次生构造对含磷岩系的保存和出露起控制作用,以羊场磷矿、没租哨磷矿和昆阳磷矿为例,3个矿床的形态及分布均受背斜控制。

1) 羊场磷矿区内磷矿体主要受EW向展布的羊场背斜控制,区内长大于21 km,宽14 km,分布面积达20 km²。具有顶平翼陡的特征,两翼基本对称,核部地层倾角较缓,一般为5°~13°,翼部地倾角20°~30° [6]。

2) 没租哨磷矿处于普渡河大断裂与小江深断裂带所夹持地带,勘查区主要位于轴向70°的没租哨背斜北翼,轴长大于8 km,核部宽1~3 km。北翼地层倾向10°~20°,倾角5°~30°,南翼地层倾向120°~140°,倾角25°~40°。

3) 昆阳磷矿区矿体分布于EW向条冲背斜南翼东段,总体上构成一单斜构造,地层倾向为160°~200°,略呈舒缓波状变化,倾角多为14°~16° [3]。

4.2.3. 特殊岩性层标志

常见特殊岩性层包括硅质岩层膏盐层、生物礁,潟湖堤构造、地下水锋面、紫色岩层和绿色岩层转

换面, 常见炭质、含零星沉积黄铁矿、零星沥青等。具有显著的氧化还原或酸碱转换物理化学界面[13]。磷块岩中常见的原生沉积构造如交错层理、波状层理、透镜状层理、压扁层理、人字形层理、冲蚀构造、削顶波痕以及鸟眼构造、泥裂构造、竹叶状砾屑、粒序层理等, 都显示出浅水高能沉积区的特点, 都应位于浪基面以上。磷块岩本身及其顶底板旁层中还经常出现叠层石或叠层石礁, 说明磷块岩沉积时水深当不过 30~50 m 左右[5]。

4.3. 成矿作用特征标志

4.3.1. 成矿年龄

Zhu *et al.* (2009)利用高精度离子探针技术, 对昆阳磷矿区中谊村段两层磷块岩层之间的凝灰岩层定年, 获得了 SIMS 锆石 U-Pb 年龄为 535 ± 1.7 Ma, 为区域成矿年龄提供了依据[9]。严清高等(2018), 采用热表面电离质谱法 Re-Os 同位素技术获得昆阳磷矿梅树村组石岩头段(上矿层顶板)黑色页岩的等时线年龄为 521.9 ± 54 Ma, 直接限定了昆阳磷矿黑色页岩的沉积时代[7]。

4.3.2. 矿石矿物特征

羊场磷矿区矿石矿物为氟磷灰石(胶磷矿)、结晶磷灰石、碳磷灰石, 脉石矿物以钙质、白云石为主, 次为方解石、石英、玉髓、炭质、黄铁矿、生物碎屑。矿石结构主要为自形-半自形结构、凝胶砂屑结构及交代结构。① 自形-半自形结构: 为矿石的主要结构, 通常矿石中的白云石和方解石具有这种结构。② 凝胶砂屑结构: 为原生富磷矿的主要结构。砂屑含量约 40%, 由砂屑磷灰石、白云石、石英、陆源碎屑物等构成, 呈次圆状、椭圆状, 填隙物以磷灰石凝胶等为主, 少量硅质及微量铁质、有机质作基底式胶结。③ 交代结构: 为原生矿石中的常见结构。常表现为填于白云石颗粒间的氟磷灰石(胶磷矿)局部交代白云石, 亦可见磷质交代生物碎屑, 形成生物碎屑假象结构; 还可见少量成岩期方解石交代氟磷灰石[1]。

没租哨磷矿区矿石矿物主要为胶磷矿, 含少量次生磷铝石、银星石, 脉石矿物主要为白云石, 次为硅质(石英)、粘土矿物、碳质物、黄铁矿及陆源碎屑物(主要是粉石英颗粒)。矿石结构以砂屑结构、粒屑结构为主, 次有鲕状结构、团粒结构、土状结构及胶状集合体结构, 矿石自然类型主要为块状磷块岩、粗条带磷块岩、细条带磷块岩、鲕粒状磷块岩及角砾状磷块。矿石工业类型, I 品级矿石主要为混合型, II、III 品级矿石大部分为碳酸盐型。

昆阳磷矿区矿石矿物主要为胶磷矿, 次为微至细晶磷灰石, 脉石矿物主要有白云石及少量陆源碎屑。矿石结构有砾状结构、粒屑结构、状结构、生物碎屑结构及凝胶状结构。矿石自然类型为白云质磷块岩、条带(纹)状磷块岩、粒屑磷块岩、含硅质条带磷造、条带(纹)状构造及层纹状构造。块岩、砾状磷块岩及生物碎屑磷块岩。矿石工业类型, I 品级矿石大部分为混合型, 浅部风氧化矿为硅质及硅酸盐型; II 品级矿石大部分为碳酸盐型, 浅部风氧化矿为混合型; III 品级矿石为碳酸盐型。

通过对比总结, 区域上早寒武世磷块岩矿床矿石自然类型以云基磷块岩、磷基磷块岩、硅基磷块岩、灰基磷块岩、泥基砂屑磷块岩、粉屑磷块岩为主, 有部分含砂磷块岩、砂质云基磷块岩、磷基砂屑磷块岩。

4.3.3. 矿石地球化学特征

根据羊场磷矿、没租哨磷矿和昆阳磷矿 3 个矿区磷块岩矿石地球化学结果(表 3), 其共同特点是高 CaO、高 P_2O_5 、低 MgO 和 Al_2O_3 , 主要为碳酸盐型磷块岩矿床。沉积岩层中的镁铝含量比值($m = 100 \times W(MgO)/W(Al_2O_3)$)是沉积环境的标志之一, 在由淡水向海水过渡的沉积环境中, m 值随沉积环境中水体的盐度增加而增加; <1 为淡水环境, $1\sim 10$ 为陆海过渡性沉积环境, $10\sim 500$ 为海水沉积环境, >500

为陆表海[2]。没租哨磷矿磷块岩样品镁铝比值 380~938.55，平均值 625.77，与羊场磷矿磷块岩镁铝含量比值 $m = 540.55$ 和昆阳磷矿磷块岩镁铝含量比值 $m = 418.47$ 相接近，其中 MSZ-4 号样为块状生物碎屑磷块岩镁铝比值 380，结合岩性组合分析，显示其形成于滨海到浅海的变化环境，为海相沉积型磷块岩。

Table 3. Comparative table of geochemical analysis of phosphate rock in typical deposits
表 3. 典型矿床磷块岩石地球化学分析对比表

| 样品 编号 | 分析结果(%) | | | | | | | | | | | | 镁铝含 量比值 m | 备注 |
|------------|--------------------------------|-------|-----------------|--------------------------------|------------------|------|-------|-------------------|-------------------------------|------------------|------------------|-------|-----------------|--------------------------|
| | Al ₂ O ₃ | CaO | CO ₂ | Fe ₂ O ₃ | K ₂ O | MgO | MnO | Na ₂ O | P ₂ O ₅ | SiO ₂ | TiO ₂ | 烧失量 | | |
| QFX1 | 1.13 | 43.15 | 12.65 | 1.09 | 0.4 | 5.56 | 0.27 | 0.22 | 25.18 | 6.21 | 0.054 | 13.46 | 492.04 | |
| QFX2 | 1.03 | 43.73 | 13.53 | 1.45 | 0.37 | 6.34 | 0.24 | 0.2 | 24.21 | 5.47 | 0.048 | 14.5 | 615.53 | |
| QFX3 | 0.75 | 6.31 | 14.39 | | 0.22 | 6.31 | | 0.15 | 19.95 | 6.59 | | 15.84 | 841.33 | |
| MSZ-1 | 1.20 | 44.39 | | 0.056 | 0.36 | 6.08 | 0.10 | 0.18 | 22.49 | 7.35 | 0.045 | 14.57 | 506.67 | 没租 哨矿区 (本次) |
| MSZ-2 | 0.83 | 43.37 | | 0.72 | 0.25 | 7.79 | 0.085 | 0.20 | 21.65 | 6.95 | 0.034 | 17.77 | 938.55 | |
| MSZ-3 | 0.68 | 48.63 | | 0.75 | 0.22 | 4.01 | 0.14 | 0.21 | 28.21 | 6.09 | 0.025 | 10.15 | 589.71 | |
| MSZ-4 | 1.10 | 46.74 | | 0.37 | 0.34 | 4.18 | 0.29 | 0.18 | 26.67 | 7.55 | 0.037 | 10.52 | 380.00 | |
| 平均 | 0.97 | 39.47 | 13.52 | 0.74 | 0.33 | 6.07 | 0.26 | 0.19 | 23.11 | 6.09 | 0.05 | 14.60 | 623.40 | |
| Km8 | 4.66 | 36.47 | 3.24 | 3 | 1.98 | 1.21 | 0 | 0.17 | 26.72 | 18.75 | 0.22 | | 25.97 | |
| Km6 | 0.56 | 42.85 | 16.24 | 0.63 | 0.27 | 7.86 | 0.05 | 0.19 | 23.42 | 4.64 | 0.03 | | 1403.57 | |
| Km4 | 0.40 | 47.87 | 9.23 | 0.42 | 0.15 | 3.57 | 0.03 | 0.33 | 31.34 | 3.32 | 0.03 | | 892.50 | 昆阳 磷矿区 磷块岩 [14] |
| H10 | 1.03 | 44.07 | 3.96 | 2.34 | 0.44 | 0.94 | 0.18 | 0.3 | 29.63 | 15.4 | 0.07 | | 91.26 | |
| H9 | 1.29 | 42.74 | 2.63 | 0.59 | 0.33 | 0.22 | 0.06 | 0.31 | 31.18 | 18.07 | 0.06 | | 17.05 | |
| H7 | 0.33 | 45.64 | 5.73 | 0.52 | 0.1 | 1.57 | 0.03 | 0.36 | 31.46 | 11.29 | 0.01 | | 475.76 | |
| H11 | 2.29 | 45.51 | 2.93 | 1.42 | 0.56 | 0.53 | 0.05 | 0.19 | 31.5 | 13.7 | 0.07 | | 23.14 | |
| | 0.31 | 44.07 | | 0.56 | 0.15 | 0.91 | 0.09 | 0.2 | 37.05 | 10.4 | 0.03 | | 293.55 | |
| | 0.32 | 45.01 | | 0.38 | 0.1 | 1.17 | 0.08 | 0.21 | 39.25 | 8.27 | 0.01 | | 365.63 | |
| KT2 磷块岩 | 0.68 | 44.16 | | 1.53 | 0.21 | 1.51 | 0.18 | 0.15 | 27.66 | 9.03 | 0.04 | | 222.06 | 羊场 磷矿区 [6] |
| | 0.16 | 42.9 | | 0.09 | 0.12 | 0.34 | 0.05 | 0.14 | 36.51 | 15.4 | 0.02 | | 212.50 | |
| | 0.2 | 42.07 | | 0.64 | 0.14 | 3.54 | 0.19 | 0.19 | 33.35 | 9.18 | 0.03 | | 1770.00 | |
| | 0.49 | 42.46 | | 0.91 | 0.19 | 1.86 | 0.18 | 0.16 | 35.25 | 10.99 | 0.03 | | 379.59 | |

4.4. “三位一体”找矿模型

通过典型矿床“三位一体”地质模型对比表研究，滇东早寒武世梅树村成磷期，从北至南形成硝滩 - 羊场、九龙 - 会泽、昆明 - 华宁三大聚磷盆地“三位一体”地质找矿标志如下(表 4)。

磷矿体的直接成矿地质体为含矿建造，为早寒武世含磷岩系由一套碳酸盐岩、磷块岩及硅质岩组成，主要形成于川滇潮坪海湾的次级海湾环境，矿层主要沉积于潮间 - 潮下间歇高能带环境。主要成矿构造岩性岩相界面为中宜村段碳酸盐岩、硅质岩及磷块岩含磷岩系。在氧化介质中形成的沉积物，以黄色和

红色最为普遍，黑色、灰黑色主要形成于以还原作用为主含有机物的沉积物，以晋宁县昆阳磷矿上矿层顶部上覆黑色页岩层，而在上下矿层间夹有灰黄色黏土岩层，反映磷块岩成矿期处于具有显著的氧化还原转换阶段[4]。区域上磷矿体可分为单层型、双层型和三层型，每个磷层反映一个完整的沉积旋回。灰黄色黏土岩层和黑色炭质层可作为含矿岩系的标志层，泥质条带状磷块岩、泥质条纹状磷块岩、白云质条带状磷块岩为醒目矿层标志。

Table 4. “Three-in-one” geological prospecting model

表 4. “三位一体”地质找矿模型

| 三位一体要素 | | 找矿特征标志 |
|--------------|-------------------|--|
| 成矿地质体 | 赋矿层位 | 下寒武统梅树村阶梅树村组(渔户村组)。 |
| | 构造古地理类型 | 潮坪相环境、滩后潟湖相和开阔台地相陆表海环境。 |
| | 沉积岩建造 | 碳酸盐岩、磷块岩及硅质岩建造，含炭质。 |
| | 沉积构造 | 矿石构造主要有块状构造、条带-条纹状构造，含矿岩系层理、微层理发育。 |
| | 特殊标志层 | 磷块岩矿层中含灰黑色中薄层状炭质粉晶磷块、炭质页岩，局部夹黑色硅质条带及断续磷质条带，星点状、条带状黄铁矿发育。尤其晋宁县昆阳磷矿上矿层顶部上覆黑色页岩层，而在上下矿层间夹有灰黄色黏土岩层，反映成矿处于具有显著的氧化还原转换界面。 |
| | 有机质 | 显微呈黑色细小质点，呈不均匀富集在氟磷灰石集合体内，大多数混杂在胶结物中，沿层富集略显弯曲的短条纹。扁平的碳屑则沿层星定向断续分布。 |
| 成矿构造与成矿结构面特征 | 构造背景 | 早寒武世梅树村成磷期，南北向古断裂控制着古地理的基本格局，西侧西昌-易门断裂与滇中古陆东缘边界基本吻合，普渡河、小江断裂影响相带环境的分布，形成矿带或矿区的自然边界。 |
| | 成矿构造环境 | 有障壁陆表海，进一步分为潮坪相带，开阔台地相带和闭塞台地相带。 |
| | 勘查区次生构造 | 勘查区次生褶皱构造影响矿体的埋深，并控制矿床的形态及分布。 |
| | 沉积成矿作用岩性岩相界面 | 沉积构造系统以岩相古地理构造为主，主要成矿构造岩性岩相界面为中宜村段碳酸盐岩、硅质岩及磷块岩含磷岩系。 |
| 成矿期古生物岩性岩相界面 | 生物碎屑磷块岩 | |
| 成矿作用特征标志 | 矿体 | 梅树村组厚为 55 m~168.22 m，磷矿体可分为单层型、双层型和三层型。 |
| | 成矿年龄 | 对昆阳磷矿梅树村组石岩头段黑色页岩(上矿层顶板)开展 Re-Os 等时线年龄为 521.9 ± 5.4 Ma [7]。利用高精度离子探针技术，对昆阳磷矿中宜村段两层磷块岩层之间的凝灰岩层定年，获得了 SIMS 锆石 U-Pb 年龄为 535 ± 1.7 Ma [9]。 |
| | 矿石矿物特征 | 矿石矿物为氟磷灰石(胶磷矿)、结晶磷灰石、碳磷灰石，脉石矿物以钙质、白云石为主，次为方解石、石英、玉髓、炭质、黄铁矿、生物碎屑。矿石结构主要为自形-半自形结构、生物碎屑结构、凝胶砂屑结构及交代结构。 |
| | 矿石地球化学特征 | 镁铝含量比值 $m = 418.47 \sim 625.70$ |
| 矿源 | 含磷的陆源碎屑和富含磷质的海洋生物 | |
| 矿体(带)规模 | 以大型-超大型为主 | |

5. 成矿机理

本区处于扬子准地台西南边缘,早寒武世处于川滇潮坪海湾的次级海湾环境(东川-会泽海湾),是当时的沉积中心。其周围的潮下浅滩和潮间带下部就成为一次磷质沉积和二次磷矿富集的有力部位,成矿条件极佳[15]。由于区域内有构造隆起和坳陷的存在,构造隆起往往构成古陆或隆起,具备了由于磷酸盐、碳酸盐的补偿性沉积而长期保持了浅水台地环境,因而形成了一些大小不等的含磷台地;而坳陷则构成水体较深的盆地环境,形成一些盆地相沉积,形成深水含磷盆地沉积[5]。早寒武世梅树村阶与筇竹寺阶地层共包括4个由海水震荡运动造成的沉积旋回,每个震荡旋回都由海侵开始,乃至海侵的顶峰,海面相对稳定,沉积速度变慢,形成了胶磷矿硬地,这些硬地胶磷矿在海退过程中被冲刷破坏,又在下一个震荡运动的海侵过程中被簸选和再沉积,从而形成具颗粒结构的磷块岩矿层,这种强海流的冲刷簸选作用是工业磷块岩形成环境的必然因素之一。被强的海流冲刷簸选的胶磷矿颗粒还需要有水流速度的突然减弱才能够沉积下来成为富的矿层,而海湾、湖、台地或水下高地的边缘、水下洼地、岸外沙坝、浅滩、外陆架盆地的向陆侧等成为工业磷块岩形成环境中不可缺少的重要因素,所有这些有利的停积洼陷或捕集场,都必须是在浅海浪基面以上的海域[1]。没租哨磷矿床位于华宁陆表海IV级构造单元,古地理为九龙-会泽、昆明-华宁三大聚磷盆地南端,成矿条件较好。

寒武纪,扬子地台的古纬度处于低纬度(南北纬18°之间)热带信风区,磷块岩与白云岩密切共生,表明它们都是低纬度半干旱气候的产物。中国的磷块岩矿床形成于低纬度地区干燥炎热的气候条件。在这种气候条件下,风化作用迟滞,从大陆带入海洋的物质少,沉积速度较慢,而且海水的盐度,特别是浅海陆架地区的海水盐度必然相应较高,会提高其对磷及多种伴生元素,如Fe、Mn、REE和Sr、U等的溶解度[1]。磷块岩矿石的结构由下至上为砾屑结构、粒屑-鲕状结构、粒屑-粉晶结构,表现出明显的下粗上细的结构特征,反映了磷块岩沉积时水动力条件由高能向低能过渡[3]。

6. 勘查技术方法

在区域磷矿带把成矿地质体、成矿结构面和成矿作用特征“三位一体”地质理论方法运用于沉积型磷矿床的勘查实践。

云南东部早寒武世梅树村成磷期,“二隆三洼”的古地理、古构造格局背景,通过类比分析法,针对沉积型磷矿床构建成矿地质体、成矿构造和成矿结构面、成矿作用特征“三位一体”地质理论模型,以早寒武世含磷岩系为成矿地质体,以中宜村段碳酸盐岩、硅质岩及磷块岩含磷岩系为主要成矿构造岩性岩相界面,梳理沉积成矿作用特征标志为主要矛盾开展勘查工作。总结形成了快速找矿技术方法:“沉积盆地建造(成磷盆地)+层位+岩性界面(标志层)+磷矿层+钻探”。明确了磷矿的找矿层位、找矿对象,是一个实践-认识-再实践-再认识的勘查实践过程。

技术方法上以“三位一体”理论为指导构建地质模型,在实践与认识的循环中不断推进认识。形成区域找矿方向:以早寒武世磷块岩矿床为主攻矿床类型,结合早寒武世磷块岩矿床成矿模式,矿床的形成主要受岩相古地理环境的控制勘查区位于东川-易门(基底隆起)Fe-Cu-Pb-Zn-Ti-Sn-Al-W-Mn-磷-硫-重晶石-盐类IV级矿带,与镇雄-巧家-会泽(断褶带)Pb-Zn-Ag-Fe-REE-Al-磷-煤-煤层气矿带呈北东向带状展布。从本期勘查结果来看,勘查区西部磷矿层厚度薄,品位低,局部尖灭不连续而出现天窗,矿区东部矿层厚,品位高。勘查区北部、东部外围赋矿层梅树村组(渔户村组 ϵ_1y)分布完整齐全,具较好的找矿远景,是今后寻找磷矿的主攻方向。针对一些磷矿床(点)分布较多的矿带,以往工作程度又相对较低,实施从地表到深部系统全面普查找矿。

7. 结论

在区域磷矿带把成矿地质体、成矿结构面和成矿作用特征“三位一体”地质理论方法运用于沉积型

磷矿床的勘查实践。结合早寒武世梅树村成磷期，“二隆三洼”的古地理、古构造格局背景，从北至南形成硝滩-羊场、九龙-会泽、昆明-华宁三大聚磷盆地典型矿床分别以镇雄县羊场磷矿、寻甸县没租哨磷矿、晋宁县昆阳磷矿为代表，从成矿地质体、成矿构造系统与成矿结构面，以及成矿作用特征标志“三位一体”进行对比研究，建立“三位一体”地质找矿模型。磷矿体的直接成矿地质体为含矿建造，为早寒武世含磷岩系由一套碳酸盐岩、磷块岩及硅质岩组成，主要形成于川滇潮坪海湾的次级海湾环境，矿层主要沉积于潮间-潮下间歇高能带环境。主要成矿构造岩性岩相界面为中宜村段碳酸盐岩、硅质岩及磷块岩含磷岩系。以晋宁县昆阳磷矿上矿层顶部上覆黑色页岩层，而在上下矿层间夹有灰黄色黏土岩层，反映磷块岩成矿期处于具有显著的氧化还原转换阶段。区域上磷矿体可分为单层型、双层型和三层型，每个磷层反映一个完整的沉积旋回。灰黄色黏土岩层和黑色炭质层可作为含矿岩系的标志层，泥质条带状磷块岩、泥质条纹状磷块岩、白云质条带状磷块岩为醒目矿层标志。

梳理沉积成矿作用特征标志为主要矛盾开展勘查工作。明确了磷矿的找矿层位、找矿对象，解决了找什么、哪里找的问题。总结形成了快速找矿技术方法：“沉积盆地建造(成磷盆地)+层位+岩性界面(标志层)+磷矿层+钻探”。

致 谢

在项目野外工作和综合研究过程中，得益项目组同志的艰辛工作，得到中化云龙有限公司、云南思瑞瑞矿业有限公司，给予了我们较多的支持和帮助，在此表示深深地谢意！在项目野外验收检查以及成果报告的评审过程中得到云南省地质科学研究所、云南省自然资源厅储量处领导专家，深入项目野外勘查一线进行现场检查、野外验收和工作指导，对本项目工作的顺利开展和实施提供了较多的支持和帮助，在此表示衷心的感谢！并对给予转载和引用权的文献资料的所有者表示感谢！

参考文献

- [1] 岳维好, 黄艳华, 刀昕红, 等. 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[J]. 地质通报, 2022, 41(5): 846-856.
- [2] 岳维好, 杨志鲜, 蔡章杨, 等. 中国矿产志. 云南卷. 化工矿产[M]. 北京: 地质出版社, 2020.
- [3] 陈瑞红, 赵锴. 滇东昆阳磷矿成矿物质来源及其沉积环境[J]. 矿产与地质, 2021, 35(1): 70-75, 89.
- [4] 候明才, 李凤杰, 陈安清, 等. 岩相古地理基础和工作方法[M]. 北京: 地质出版社, 2023.
- [5] 邓小林, 姚超美, 王吉平, 等. 扬子地区磷矿成矿规律[J]. 化工矿产地质, 2009, 31(1): 1-12.
- [6] 秦欢, 周骞, 洪托, 等. 云南省镇雄县羊场磷矿地球化学特征及其沉积环境分析[J]. 地质找矿论丛, 2022, 37(3): 259-269.
- [7] 严清高, 李超, 江小均. 滇中昆阳磷矿成矿时代及沉积环境 Re-Os 同位素示踪研究[J]. 2018, 37(4): 462-474.
- [8] 吕俊, 让昊, 郭阳, 等. 云南镇雄县羊场磷矿地质特征及沉积环境浅析[J]. 云南地质, 2021, 41(1): 76-82.
- [9] 徐林刚, Bernd Lehmann, 张锡贵, 等. 云南昆阳磷矿黑色页岩微量元素特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 2014, 30(6): 1817-1827.
- [10] 崔文东, 曾祥谦, 杨泽刚, 等. 云南省寻甸县没租哨磷矿地质特征及成矿规律[J]. 四川地质学报, 2012(S2): 169-173.
- [11] 张贵平, 罗洪昌, 肖亚旭, 等. 云南省寻甸县没租哨磷矿勘探报告[R]. 大理: 云南省有色地质局三一〇队, 2022.
- [12] 曾允孚, 沈丽娟, 何廷贵. 滇东磷块岩的沉积环境和成矿机理[J]. 矿产与地质, 1989, 9(2): 45-59.
- [13] 叶天竺, 吕志成, 庞振山, 等. 勘查区找矿预测理论(总论) [M]. 北京: 地质出版社, 2014.
- [14] 杨帆, 肖荣阁, 夏学惠. 昆阳磷矿沉积环境与矿床地球化学[J]. 地质与勘探, 2011, 47(2): 294-303.
- [15] 邓小林, 姚超美, 江新华, 等. 川西南-滇东北地区磷矿的形成与富集[J]. 化工矿产地质, 2007, 29(3): 139-140.