

云南省磷矿成矿规律及找矿方向

董涛^{1,2,3,4}, 杜斌^{1,2,3,4}, 王枫^{1,2,3}, 杨淑胜^{1,2,3}, 黄太平^{1,2,3,4}, 米云川^{1,2,3},
段召艳^{1,2,3}, 周骞^{1,2,3,4}

(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. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093)

摘要: 磷矿是重要的战略矿产资源,其保障程度事关国家资源能源和粮食安全,云南省磷矿资源在全国占有重要地位,具有分布集中、矿床类型简单、大中型矿床多、矿石质量好、易开采等特点。随着近年镇雄羊场磷矿取得找矿重大突破,云南省磷矿成为矿床研究热点之一。本文系统梳理了云南省磷矿矿床类型、资源储量等,选取不同类型的典型矿床进行了详细解剖,从时空分布特征、含矿岩系特征等方面系统总结了成矿规律,在羊场磷矿床研究基础上完善了云南省沉积型磷矿成矿模式,结合潜力评价工作成果,圈定了8处重点找矿远景区,为云南省磷矿今后的找矿工作提供了方向。

关键词: 磷矿; 成矿规律; 找矿方向; 云南省

中图分类号: P619.21⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2024)05-1157-18

Metallogenic regularity and prospecting direction of phosphate ore in Yunnan Province

DONG Tao^{1,2,3,4}, DU Bin^{1,2,3,4}, WANG Feng^{1,2,3}, YANG Shu-sheng^{1,2,3}, HUANG Tai-ping^{1,2,3,4},
MI Yun-chuan^{1,2,3}, DUAN Zhao-yan^{1,2,3} and ZHOU Qian^{1,2,3,4}

(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: Phosphate ore is an important strategic mineral resource, and its guarantee degree is related to national resources, energy and food security. Phosphate ore resources in Yunnan Province occupy an important position in the country, with the characteristics of concentrated distribution, simple deposit types, large and medium-sized deposit are abundant, good ore quality and easy mining. With the major breakthrough in mineral prospecting of the Yangchang phosphate deposit in Zhenxiong area in recent years, phosphate ore in Yunnan Province has become one of the hot spots in mineral deposit research. This paper systematically sorted out the types and resource reserves of phosphate ore deposits in Yunnan Province, selected typical deposits of different deposit types for detailed dissections, systematically summarized the metallogenic laws from the aspects of spatial and temporal distribution charac-

收稿日期: 2024-05-20; 接受日期: 2024-08-10; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 云南省自然资源厅项目(云自然资财[2022]25号, SJ[2024]KY003); 云南省地勘基金项目(D202001, K202101, K202301, Y202301)

作者简介: 董涛(1983-), 男, 正高级工程师, 从事地质找矿及成矿规律研究, E-mail: 20974687@qq.com。

teristics, ore-bearing rock series characteristics, etc., improved the sedimentary phosphate ore mineralization model in Yunnan Province on the basis of the Yangchang phosphate deposit research, and combined with the results of potential evaluation, delineated 8 key prospecting potential areas. It provides the direction for phosphate rock prospecting in Yunnan Province in the future.

Key words: phosphate ore; metallogenic regularity; prospecting direction; Yunnan Province

Fund support: Project of Department of Natural Resources of Yunnan Province ([2022]25, SJ[2024]KY003); Yunnan Geological Exploration Fund Project (D202001, D202101, K202301, Y202301)

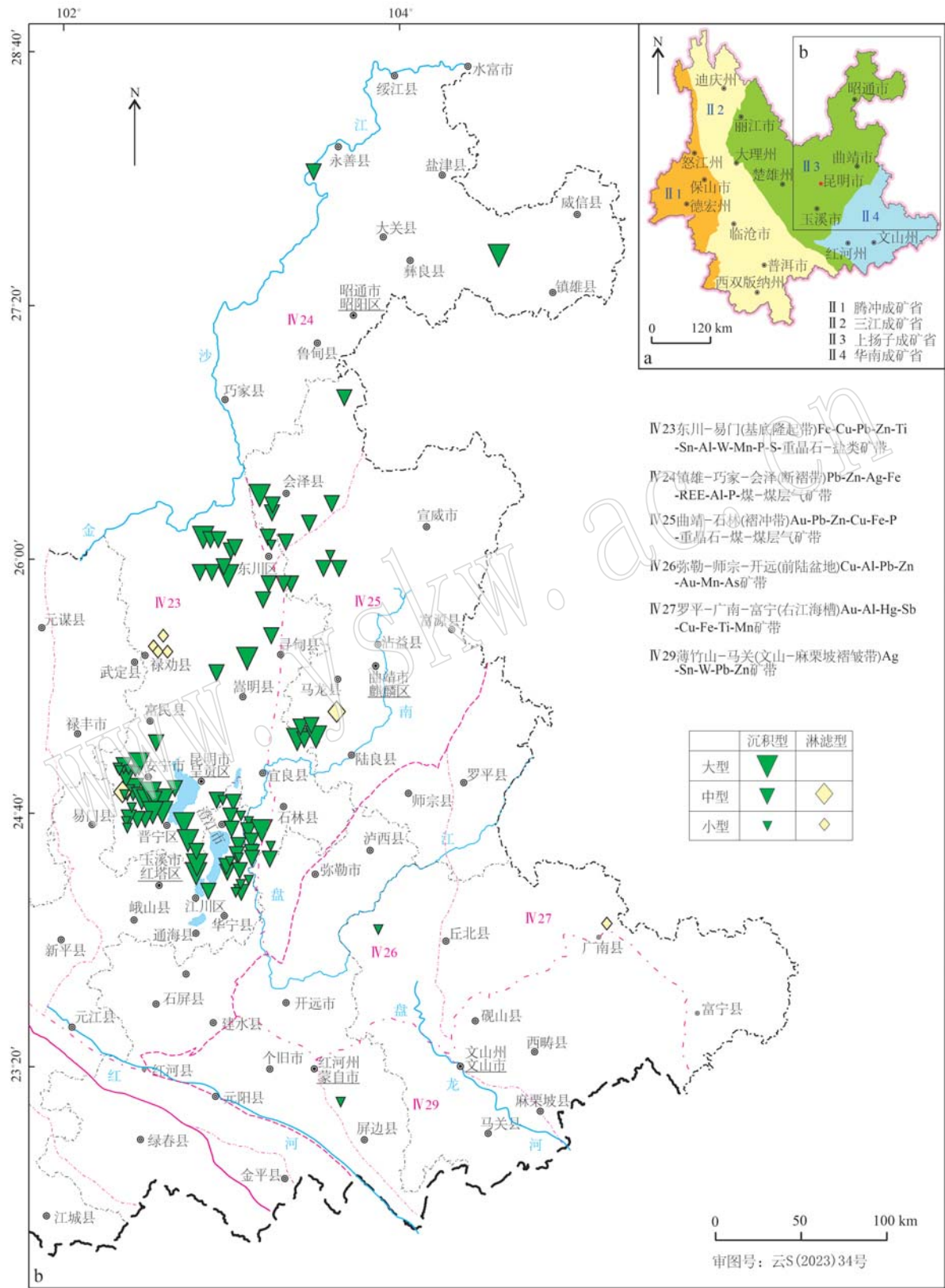
磷矿是极其重要的战略矿产资源,且是一种不可再生的资源,在农业及许多工业应用中至关重要,其保障程度事关国家资源能源和粮食安全。截至2022年底,中国查明磷矿储量36.90亿吨(据2023中国统计年鉴),居世界第2位,但储量及平均品位均远低于世界第一的摩洛哥(储量为500亿吨, P_2O_5 平均品位>33%),具有分布极不平衡、贫矿多、富矿少、难采选矿多、易采选矿少的特点(刘建雄,2009;孙小虹等,2015;李维等,2015;吴发富等,2021)。中国是世界上磷矿资源生产和消费的大国,受益于新能源等下游领域需求旺盛,近年来中国磷矿石产量稳居世界第1位。国家统计局数据显示,2022年中国磷矿石产量1.05亿吨,以不到全球5%的矿产储量供应了全球40%以上的产量需求,储采比低,磷矿石开采过度(崔荣国等,2019;王文浩等,2024),导致现有磷矿资源的动态保障年限显著下降。因此持续开展磷矿的成矿规律研究和找矿勘查,提高资源保障程度,是今后长时期内重要的任务。

磷矿为云南省的优势矿产,其勘查开发和研究起步较早。1949年前中国地质学家就对云南昆明磷矿及嵩明、呈贡、澄江地区的磷矿开展过地质调查;新中国成立后,多支专业地质队伍陆续对昆明、东川、会泽、永善地区早寒武世沉积型磷矿、云南广南地区中泥盆世沉积型磷矿、新生代淋滤残积型磷矿进行了勘查评价,为云南省磷化工大省奠定了资源基础;20世纪七八十年代完成了云南省早寒武世沉积型磷矿成矿区划及远景调查,2007~2013年完成了云南省磷矿资源潜力评价,2014~2020年完成了中国矿产地质志云南卷·化工矿产,系统总结了云南磷矿成矿规律及找矿方向(杨志鲜等,2016;岳维好等,2020)。国内众多学者对云南典型磷矿床开展了成矿地质特征、地球化学、沉积环境、矿床成因及成矿模式等方面的研究(曾允孚等,1987;沈丽娟等,1989;陈启良等,2017;严清高等,2018;梁永忠等,2018;孟永龙,2018;肖喆等,2019;陈瑞红等,2021;米云川等,2021;夏亮亮等,2022;岳维

好等,2022;贺天全等,2022;秦欢,2022;秦欢等,2022),并系统研究了云南省磷块岩的沉积环境、成矿机制及成矿规律(陈志明等,1987;曾允孚等,1989;东野脉兴,2001;邓小林等,2009;夏学惠等,2011;薛天星等,2011;韩豫川等,2012;岳维好等,2012,2020;杨志鲜等,2016;熊先孝等,2019;王莹等,2022,2023;王文浩等,2024),取得了大量研究成果。随着镇雄羊场磷矿找矿取得重大突破,2020~2023年羊场磷矿区新探获磷矿石资源量超过40亿吨,使云南省磷矿也成为矿床研究及找矿勘查热点之一。本文依托承担的云南省矿产资源国情调查和羊场磷矿勘查项目成果,系统梳理了云南省磷矿矿床类型、资源储量等,详细解剖了典型沉积型磷块岩及风化淋滤型磷矿床,从时空分布特征、含矿岩系特征系统总结了云南省磷矿成矿规律,在羊场磷矿床研究基础上完善了云南省沉积型磷矿成矿模式,结合潜力评价成果,探讨了云南省磷矿的找矿方向,为云南省今后的磷矿找矿勘查部署提供思路。

1 云南省磷矿资源概况

截止到2023年底,云南省已发现磷矿区101个(图1),其中大型21个、中型54个、小型26个(图2a),查明资源储量居全国第1位,具有分布集中、矿床类型简单、大中型矿床多、矿石质量好、易开采等特点,主要分布在昆明、玉溪、曲靖及昭通等市。矿床类型划分为沉积型磷块岩、风化淋滤型及洞穴堆积型3种类型(杨志鲜等,2016;岳维好等,2020),其中下寒武统梅树村组海相沉积型磷块岩矿床是云南省最主要的磷矿床类型,查明资源量超过全省总量的99%;风化淋滤型磷矿床(点)少,矿床规模以中小型为主,具有品位高、好开采、易利用的特点;洞穴堆积型磷矿目前发现均为矿(化)点,规模小,不具有工业意义。



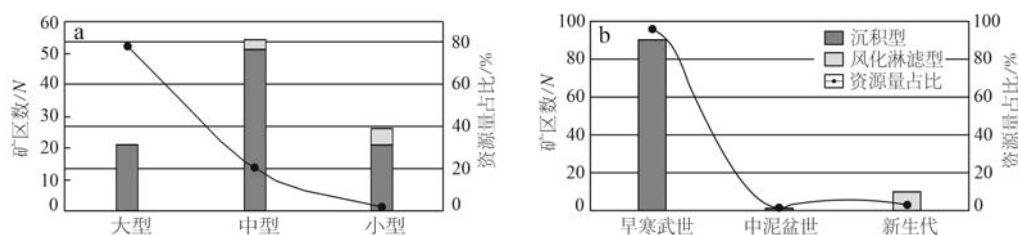


图2 云南省磷矿矿床类型统计图(a)和成矿时代分布统计图(b)

Fig. 2 Statistical map of phosphate deposit types (a) and metallogenic epoch distribution (b) in Yunnan Province

2 典型矿床特征

2.1 镇雄羊场沉积型磷矿

羊场磷矿位于昭通市镇雄县碗厂镇、盐源镇,为一隐伏超大型沉积型磷块岩矿床。矿区地表主要出露地层为下寒武统牛蹄塘组、明心寺组、金顶山组、清虚洞组碎屑岩夹碳酸盐岩建造,中寒武统高台组碳酸盐岩-碎屑岩建造,上寒武统娄山关组碳酸盐岩夹碎屑岩建造(图3a)。

矿区的赋矿层位为下寒武统梅树村组,隐伏于地表400 m以下,自下而上可划分为3个岩性段:一段为灰-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、砂屑灰岩,厚43.94~65.96 m,为下磷矿层(KT3)底板;二段为深灰色-灰黑色薄-中厚层状磷块岩、砂屑磷块岩、致密块状、条带状磷块岩,厚度35.84~75.33 m,为矿区磷矿的主要赋存层位,相当于滇东地区梅树村组中谊村段;三段为深灰色、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(质)岩,局部地段富集成低品位矿体(KT1),厚度3.65~28.85 m,为矿区主磷矿层(KT2)直接顶板。

矿区内主要发育东西向羊场背斜和北东向的小规模断裂构造,未见岩浆岩出露。区内岩石变质作用较弱,围岩蚀变与上部的铅锌矿化关系密切,主要有白云石化、方解石化、重晶石化、硅化、萤石化、黄(褐)铁矿化、弱铜矿化;磷矿层蚀变弱,普遍发育同期沉积黄铁矿,呈自形粒状、稀疏浸染状、顺层细脉状分布于磷块岩中。

羊场磷矿矿体呈隐伏状,埋深大于430 m,呈层状沿羊场背斜核部及两翼顺层产出,走向近东西向,与背斜轴向一致,走向控制长13 km,倾向与背斜两翼倾向一致,北翼向北倾,南翼向南倾,倾向控制宽

6 km。矿体产状与地层产状基本一致,背斜核部倾角 $2^{\circ}\sim 6^{\circ}$,翼部倾角一般 $8^{\circ}\sim 14^{\circ}$ 。矿区圈定3条矿体,呈独立平行产出,由上至下编号为KT1、KT2、KT3(图3b、3c),其中KT2为主矿体,矿层一般为深灰-灰黑色条带状、条纹状、块状砂屑磷块岩、白云质或灰质磷块岩,矿层间夹灰-浅灰色含磷质白云岩或灰质白云岩。控制工业矿体累计厚度22.94~47.70 m,平均36.77 m, P_2O_5 平均品位23.18%(表1)。矿石矿物主要为胶磷矿(微晶碳氟磷灰石组成),脉石矿物主要有方解石、白云石、黏土矿物、石英和少量黄铁矿等。矿石结构以砂屑结构为主,次为球粒、砾屑结构;矿石构造主要为致密块状构造和条纹条带状构造(图4)。矿床成因为早寒武世海相沉积型磷块岩磷矿床(米云川等,2021)。

2.2 安宁白泥山风化淋滤型磷矿

白泥山磷矿位于安宁市,为近年发现评价的一处中型风化淋滤型磷矿床。矿区地表主要出露新生界第四系残坡积层(含矿层),其次出露上震旦统灯影组白云岩夹黏土岩及条纹条带状磷块岩建造、上震旦统陡山沱组碎屑岩建造、昆阳群美党组板岩-变质砂岩建造。矿区总体位于大龙山背斜东翼,岩层总体为向东缓倾斜;断裂主要为北西向的平移断裂(F_1 、 F_2)及北东向的逆断层(F_3)。区内见晋宁期辉绿岩呈脉状侵入于美党组变质岩中,一般宽数米,长十几至数十米,常成群出现(图5a)。

第四系残坡积层依平缓山包和缓坡大致呈近南北向展布,面积约13 km²,垂厚最大105 m,平均30 m。底板为上震旦统灯影组白云岩建造及陡山沱组碎屑岩建造,往上依次分为半风化层、红土化黏土层、表土层3层。其中,半风化层为主要的赋矿层,呈褐色、黄褐色、土黄色、褐红色、杂色等,由黏土、砂砾(以胶磷矿为主)、磷块岩及白云岩碎块组成,厚度一般为10~30 m,平均22.90 m。红土化黏土层呈砖红色、褐红色,主要由黏土组成,局部含少量砂砾、白

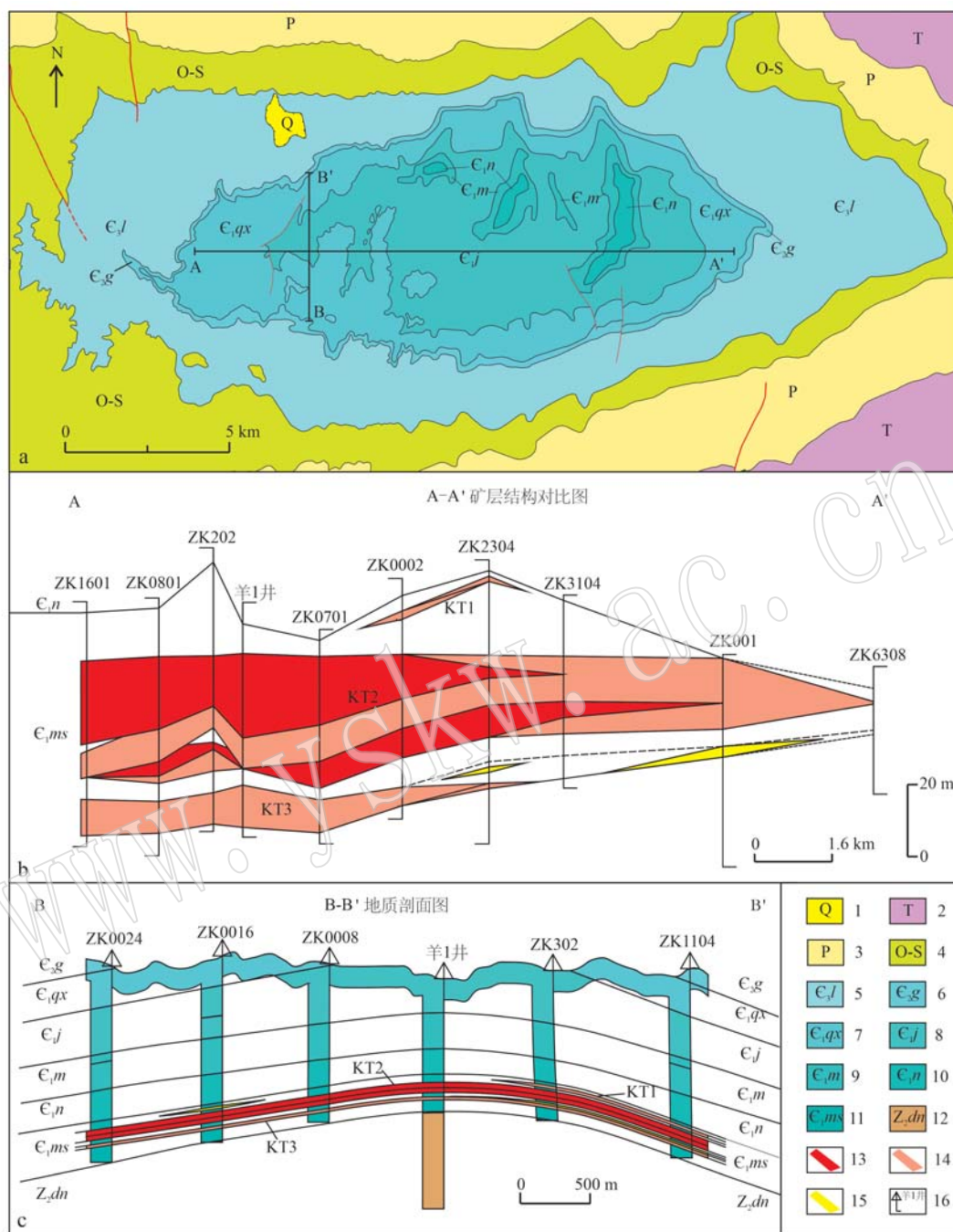


图3 羊场磷矿区地质简图(a)和剖面图(b,c)

Fig.3 Simplified geological map(a) and section map(b,c) of the Yangchang phosphate deposit

1—第四系；2—三叠系；3—二叠系；4—奥陶-志留系；5—上寒武统娄山关组；6—中寒武统高台组；7—下寒武统清虚洞组；8—下寒武统金顶山组；9—下寒武统明心寺组；10—下寒武统牛蹄塘组；11—下寒武统梅树村组；12—上震旦统灯影组；13—I+II品级磷矿层；14—III品级磷矿层；15—低品位磷矿层；16—钻孔及编号

1—Quaternary；2—Triassic；3—Permian；4—Ordovician-Silurian；5—Upper Cambrian Loushanguan Formation；6—Middle Cambrian Gaotai Formation；7—Lower Cambrian Qingxudong Formation；8—Lower Cambrian Jindingshan Formation；9—Lower Cambrian Mingxinsi Formation；10—Lower Cambrian Niutitang Formation；11—Lower Cambrian Meishucun Formation；12—Upper Sinian Dengying Formation；13—I+II grade phosphate rock layer；14—III grade phosphate rock layer；15—low grade phosphate rock layer；16—drill holes and numbers

表 1 羊场磷矿区主要矿体特征一览表

Table 1 characteristics of main ore bodies in Yangchang phosphate deposit

矿体编号	走向	倾向	倾角/(°)	走向延伸/km	倾向延伸/km	平均厚度/m	w(P ₂ O ₅)/%	品级
KT1				3.9	2.5	5.29	18.04	低品位为主, 少量III品级
KT2	近东西	背斜两翼, 北倾、南倾	2~14	13.0	6.0	29.59	24.33	I、II品级占比超过 60%
KT3				13.0	6.0	6.88	18.31	III品级为主

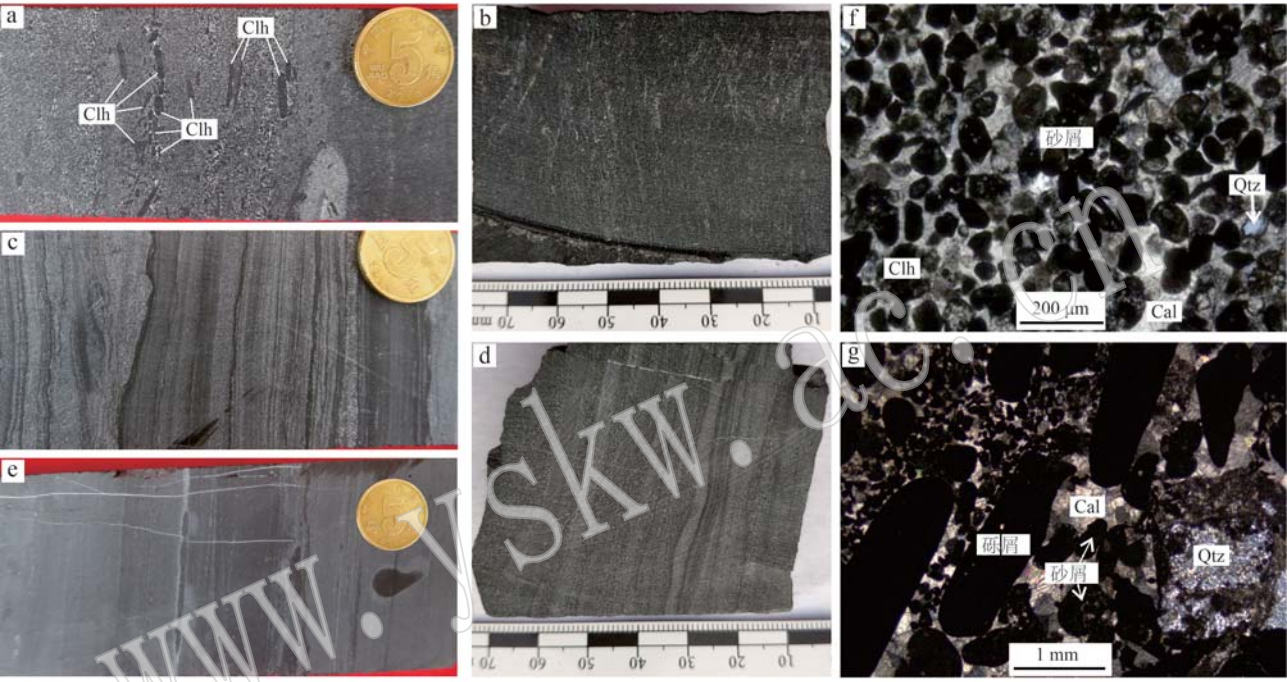


图 4 羊场磷矿区岩矿石宏观及显微特征照片

Fig. 4 Macro and microscopic characteristics of rock ore in Yangchang phosphate deposit

a, b—致密块状磷块岩; c, d—条纹条带状磷块岩; e—矿体底板硅质白云岩; f—矿石砂屑结构, 正交偏光; g—矿石砂砾结构, 单偏光;
Clh—胶磷矿; Cal—方解石; Qtz—石英
a, b—dense massive phosphorite; c, d—striped banded phosphorite; e—orebody floor siliceous dolomite; f—ore sand structure, cross-polarized light; g—ore gravel structure, plane-polarized light; Clh—collophanite; Cal—calcite; Qtz—quartz

云岩、砂泥岩及磷块岩碎块, 厚度一般 5~20 m, 平均 6.66 m。表土层呈黄灰色、深灰色、杂色, 由腐殖土、黏土、砂砾等组成, 局部缺失, 一般厚约 0.5 m。

矿区圈定 1 条工业矿体, 呈似层状赋存于第四系残坡积层的半风化层中(图 5b), 南北向顺山坡展布, 南北长 4 km, 东西宽 1~3 km, 产状与地形基本一致, 总体倾向南东, 倾角 0°~15°。矿体垂厚 1.10~72.79 m, 平均 12.99 m; P₂O₅ 品位 15.23%~38.94%, 平均 22.98%。矿石矿物主要为磷灰石(呈胶磷矿集合体)。矿体底板为上震旦统灯影组白云岩, 顶板为黏土、腐殖土。脉石矿物主要为黏土矿物、石英、玉髓、白云石, 少量海绿石、电气石等。矿

石结构以胶状结构为主。矿石构造主要为土状、砂状、角砾状构造, 次为蜂窝状、皮壳状构造。矿床成因因为新生代风化淋滤型磷矿床(岳维好等, 2020)。

3 成矿规律

3.1 空间分布特征

云南省磷矿分布集中, 主要分布在昆明、玉溪、曲靖及昭通等市, 少量分布在文山州及红河州(图 1b), 属于上扬子(陆块)成矿省(Ⅱ3)和华南成矿省(Ⅱ4)(图 1a)。其中, 沉积型磷块岩矿床分布广泛, 含磷层位为下寒武统梅树村组和中泥盆统榴江组

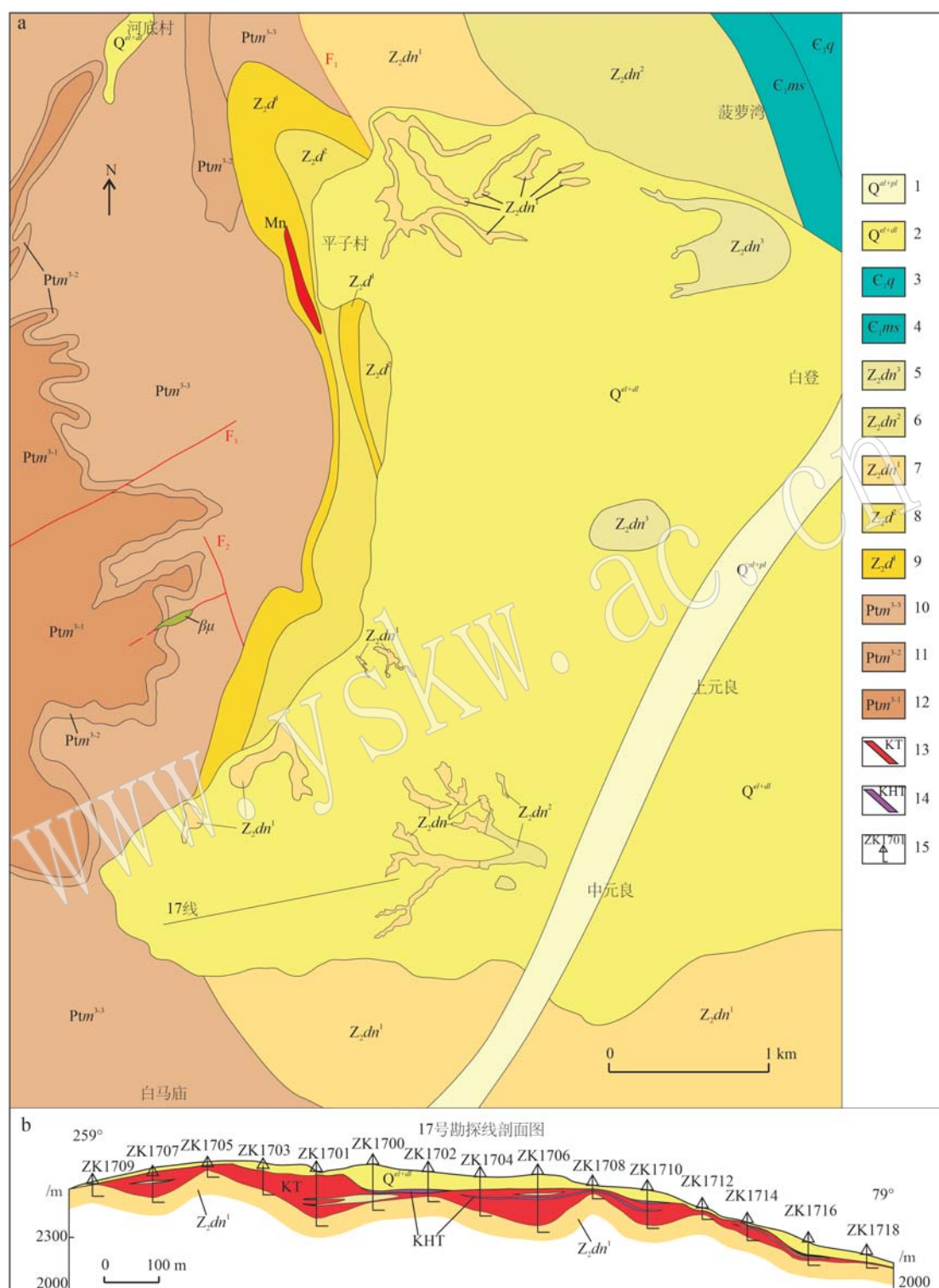


图5 白泥山磷矿区地质简图(a)和剖面图(b)[据岳维好等(2020)修编]

Fig. 5 Simplified geological map(a) and section map(b) of the Bainishan phosphate deposit (after Yue Weihao *et al.*, 2020)
1—洪、冲积层; 2—残坡积层; 3—筇竹寺组; 4—梅树村组; 5—灯影组含磷白云岩段; 6—灯影组白云岩段; 7—灯影组藻白云岩段; 8—陡山沱组砂岩段; 9—陡山沱组泥岩段; 10—美党组板岩段; 11—美党组变质砂岩段; 12—美党组板岩段; 13—磷矿层及编号; 14—磷矿化层及编号; 15—钻孔及编号

1—flood and alluvial layers; 2—residual slope deposit; 3—Qiongzhusi Formation; 4—Meishucun Formation; 5—phosphorus-bearing dolomite segment of Dengying Formation; 6—dolomite segment of Dengying Formation; 7—algal dolomite segment of Dengying Formation; 8—sandstone segment of Doushantuo Formation; 9—mudstone segment of Doushantuo Formation; 10—slate segment of Meidang Formation; 11—metamorphic sandstone segment of Meidang Formation; 12—slate segment of Meidang Formation; 13—phosphate ore layer and number; 14—phosphate mineralized layer and number; 15—drillholes and numbers

(图6),分为绥江-永善-昭通、镇雄-威信、巧家-会泽-武定、安宁-华宁-曲靖、广南-蒙自-屏边 6 个成磷区(表2);风化淋滤型磷矿床主要为上震旦统灯影组和中三叠统个旧组含磷岩石在表生作用下次生

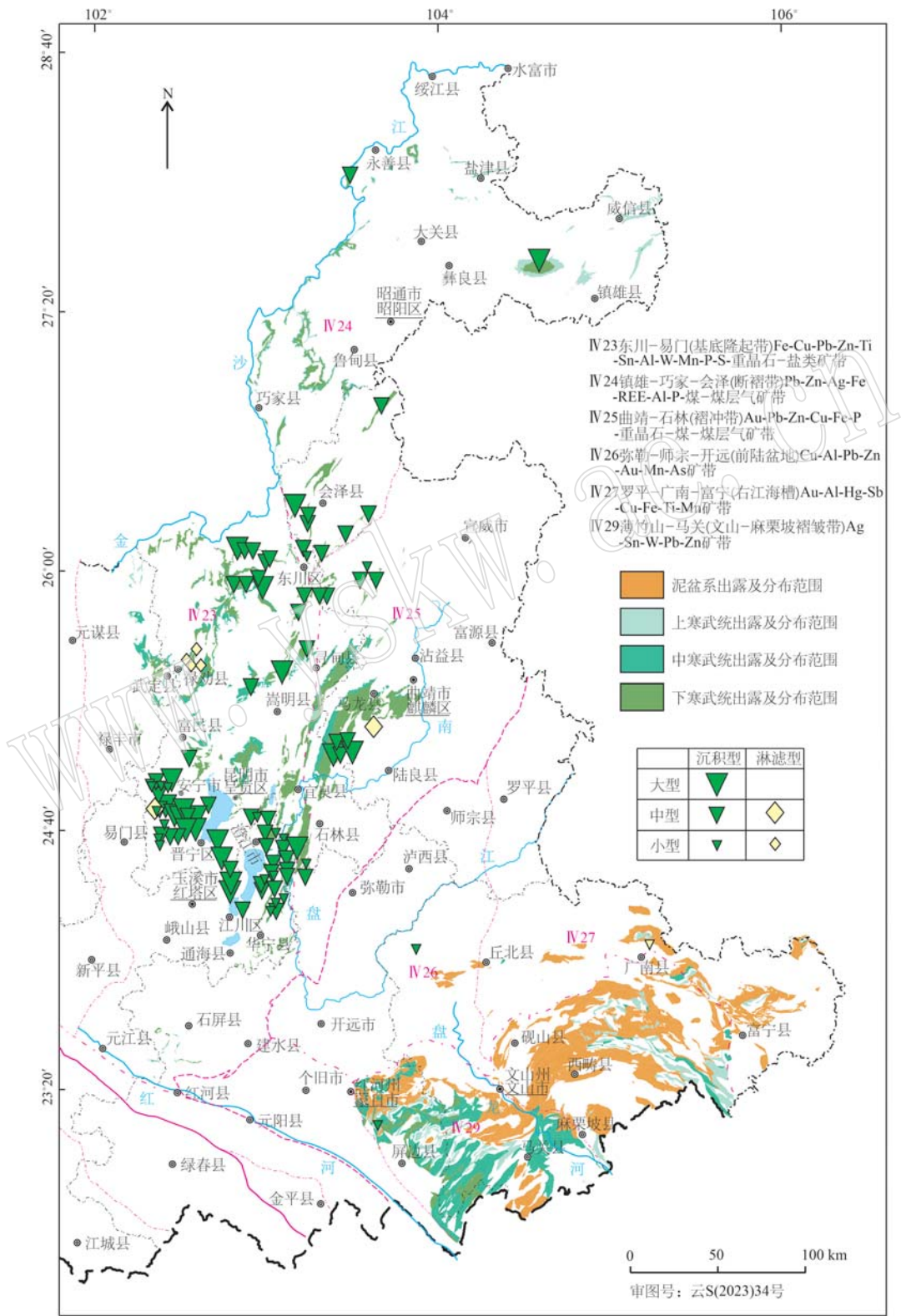


图6 云南省不同类型磷矿床及含磷地层分布图[据岳维好等(2020)修编]
Fig. 6 Distribution map of different types of phosphate deposits and phosphorus-bearing strata in Yunnan Province(after Yue Weihao et al. , 2020)

表 2 云南省主要成磷区矿床总体分布特征一览表

Table 2 General distribution characteristics of mineral deposits in major phosphorus-forming areas of Yunnan Province

序号	成磷区	所属成矿区带(全国)		矿床类型	矿区数			查明资源 储量	典型矿床
		三级	四级		合计	大型	中小型		
1	绥江-永善-昭通成磷区	Ⅲ 11	Ⅳ 24	海相沉积型磷块岩矿床	2		2	大于 0.5 亿吨	永善务基磷矿
2	镇雄-威信成磷区	Ⅲ 11	Ⅳ 24	海相沉积型磷块岩矿床	1	1		大于 27 亿吨	镇雄羊场磷矿
3	巧家-会泽-武定成磷区	Ⅲ 10、Ⅲ 11	Ⅳ 23、Ⅳ 25	海相沉积型磷块岩矿床为主,少量风化淋滤型	26	3	23	大于 13 亿吨	会泽大海、德泽磷矿
4	安宁-华宁-曲靖成磷区	Ⅲ 10、Ⅲ 11	Ⅳ 23、Ⅳ 25	海相沉积型磷块岩矿床为主,少量风化淋滤型	69	17	52	大于 31 亿吨	昆阳磷矿
5	广南成磷区	Ⅲ 12	Ⅳ 26、Ⅳ 27	海相沉积型磷块岩矿床为主,少量风化淋滤型	2		2	大于 500 万吨	布达磷矿
6	蒙自-屏边成磷区	Ⅲ 13	Ⅳ 29	海相沉积型磷块岩矿床	1		1	大于 10 万吨	栏木桥磷矿

富集形成的风化壳型残积磷矿床(岳维好等, 2020),主要分布于巧家-会泽-武定、安宁-华宁-曲靖、广南 3 个成磷区。

3.2 时间分布规律

云南省已发现 11 个含磷层位,自下至上为上震旦统灯影组,下寒武统梅树村组、筇竹寺组,下奥陶统汤池组、红石崖组及涪潭组,中志留统牛滚凼组、中泥盆统海口组、榴江组,中三叠统个旧组及侏罗系(岳维好等, 2020),但具有工业意义的为下寒武统梅树村组和中泥盆统榴江组,均产出海相沉积型磷块岩矿床,上震旦统灯影组和中三叠统个旧组原始含磷层新生代风化富集后局部形成工业矿床。故云南省磷矿形成时代为早寒武世、中泥盆世、新生代,以早寒武世为主(图 2b)。

3.3 含矿岩系特征

3.3.1 上震旦统灯影组

晚震旦世是全球重要的成磷期,云南上震旦统分布广泛,含磷层为上震旦统灯影组中段,灯影组为连续沉积的含藻类碳酸盐岩。灯影组上段为白云岩夹含藻白云岩。灯影组中段为含磷层,由含磷白云岩夹透镜状白云质磷块岩及条纹条带状磷质岩组成,厚度 0~17.99 m。灯影组下段为白云岩夹含藻白云岩、硅质白云岩及硅质岩。原始含磷层不形成工业矿床,但含磷层经风化淋滤后可在地表次生富集形成工业矿体,目前云南在禄劝、安宁一带等局部地段形成风化淋滤残积型磷矿体。

3.3.2 下寒武统梅树村组

早寒武世梅树村期是云南最主要的成磷期,含磷层下寒武统梅树村组为一套碳酸盐岩、磷块岩及

硅质岩建造(图 7),具有含磷、含硅质岩及含小壳化石三大特点,从下至上分为 3 个岩性段,依次为小歪头山段、中谊村段及大海段,其中,中谊村段为主要的含磷岩段。云南东部晚震旦世晚期至早寒武世早期,就地层完整性而言,以会泽大海地区发育较全,各段岩性特征在区域上有一定代表性(杨志鲜等, 2016;岳维好等, 2020),但就磷矿层来讲,以昆阳、羊场磷矿区代表性较好。

昆阳磷矿:筇竹寺组一段($\epsilon_1 q^1$)是含磷层上覆地层,为泥质粉砂岩、页岩,底部含海绿石磷质岩。梅树村组大海段($\epsilon_1 m^3$)是磷矿层顶板,为白云岩、硅质白云岩及硅质岩组合,厚 1.30 m。梅树村组中谊村段($\epsilon_1 m^2$)是磷矿层,上矿层蓝灰色磷块岩、白云岩及硅质岩厚 6.55 m,泥页岩组合夹层厚 1.00 m,下矿层蓝灰色磷块岩、白云岩及硅质岩厚 5.42 m。梅树村组小歪头山段($\epsilon_1 m^1$)是磷矿层底板,为白云岩、硅质白云岩及硅质岩组合,厚 45.70~219.24 m。

羊场磷矿:牛蹄塘组一段($\epsilon_1 n^1$)是含磷层上覆地层,为灰黑色炭质页岩、钙质粉砂岩,局部夹泥岩。梅树村组三段($\epsilon_1 m^3$)是主磷矿层直接顶板,为白云岩、含磷质砂屑灰岩及少量灰质砂屑磷块(质)岩,局部地段富集成低品位矿体,厚度 3.65~28.85 m。梅树村组二段($\epsilon_1 m^2$)是磷矿主要赋存层位,为磷块岩、含磷白云岩及硅质白云岩,厚度 35.84~75.33 m。梅树村组一段($\epsilon_1 m^1$)是磷矿层底板,为白云岩、硅质岩夹硅质白云岩、砂屑灰岩,局部夹炭质页岩,厚 43.94~65.96 m。

3.3.3 中泥盆统榴江组

中泥盆世磷块岩矿床是云南次要的磷矿资源类

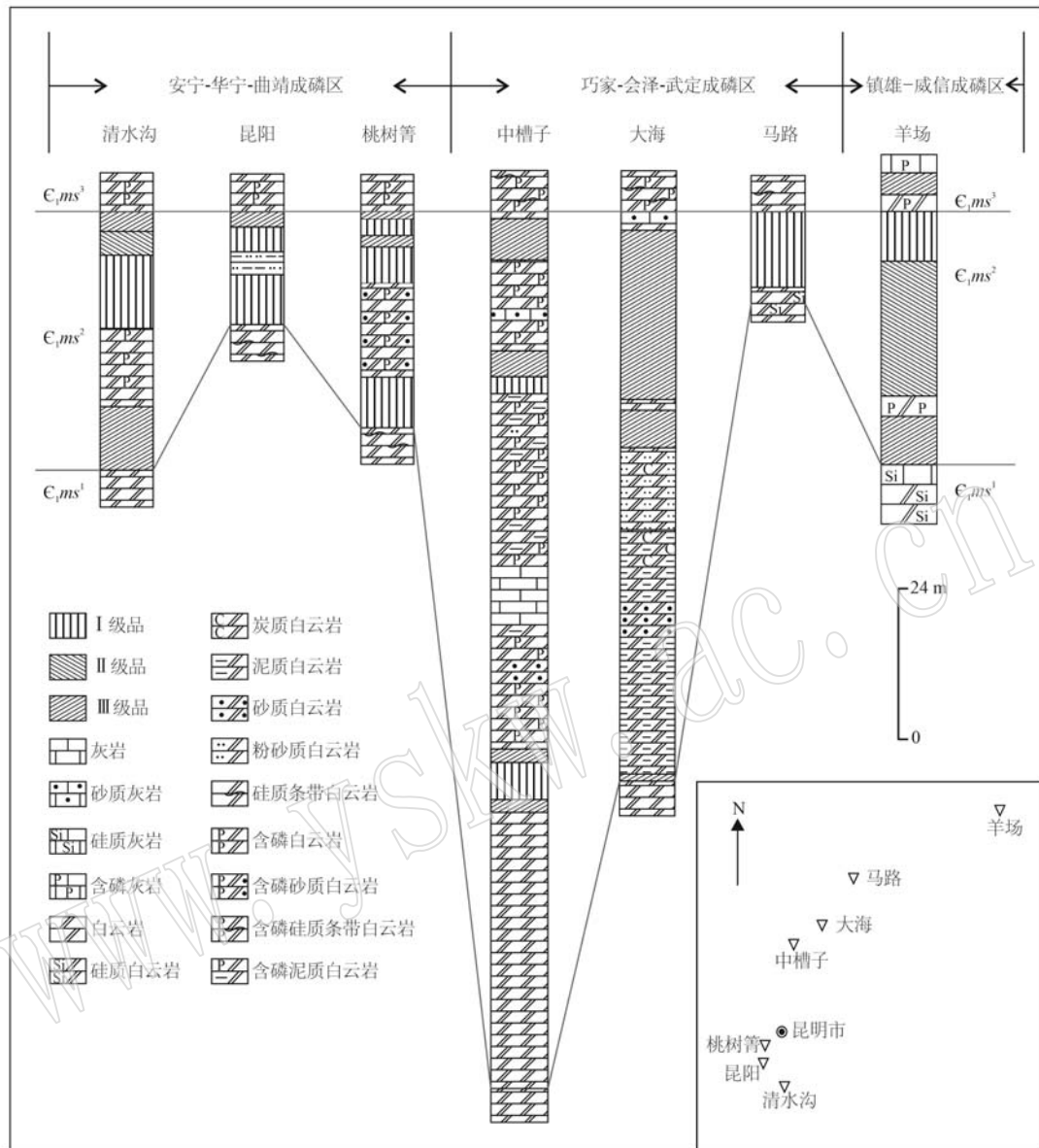


图 7 云南省下寒武统梅树村组含磷层位柱状对比图[据杨志鲜等(2016)修编]

Fig. 7 Columnar correlation map of phosphorus-bearing horizon in Meishucun Formation, Lower Cambrian, Yunnan Province (after Yang Zhixian *et al.*, 2016)

型,含磷层中泥盆统榴江组为一套粉砂岩、硅质黏土岩、黏土岩夹磷块岩组合。该含磷层位分布于滇东南右江海槽广大地区,但相变非常明显,广南县扣来背斜南北两翼差异就较大,在南翼形成具工业价值的磷块岩透镜体,而北翼仅有其层位存在(杨志鲜等, 2016; 岳维好等, 2020)。

榴江组中段(D_2l^2)是含磷层上覆地层,为硅质岩、硅质黏土岩,偶见磷块岩透镜体,厚 192.10 ~ 196.90 m。榴江组下段(D_2l^1)是含磷层,由粉砂岩、黏土岩及中下部夹角砾状磷块岩透镜体组成,厚

57.10~145.82 m。达莲塘组上段(D_2d^2)是含磷层下伏地层,为泥晶灰岩与含磷质黏土岩互层,厚 67.5 ~ 83.7 m。

3.3.4 中三叠统个旧组

含磷层为中三叠统个旧组第 5 段,分布于个旧台地。上覆地层为法郎组下段下部生物碎屑灰岩夹薄层灰质页岩。含磷层为个旧组顶部第 5 段浅灰、灰白色块状含磷生物碎屑灰岩夹磷块岩(胶磷矿结核或条带),局部经新生代风化淋滤残积成块状及角砾状磷矿,含磷风化壳厚 14 m。下伏地层为个旧组

第4段白云岩与灰质条带白云岩互层。

3.4 成矿模式

3.4.1 磷质来源及古气候

海相沉积型磷块岩矿床中磷主要来源于含磷的陆源碎屑和富含磷质的海洋生物,磷的富集与大洋磷循环的突变有关,受控于地史时期的气候突变、大氧化事件和生命演化等因素(叶连俊等, 1989; Filippelli, 2011)。含磷的陆源碎屑通过地表径流、地下径流和风力传输等主要途径从陆地输入海洋,并以有机质或无机磷酸盐的形式进入深海。扬子西南缘在早寒武世为低纬度干旱炎热气候、陆表海海湾潟湖潮坪浅水环境,而冰期过后上升洋流携带深部富磷海水进入后,促使大洋藻类生物繁盛,导致海洋磷循环加速,这种与大洋相通的浅水盆地起到了很好的聚磷作用(曾允孚等, 1989),为云南下寒武统梅树村组磷块岩矿床形成提供了物质基础。

3.4.2 古构造及古地理条件

晚震旦世扬子地块西南缘进入到稳定的碳酸岩台地发展阶段,南北向古断裂控制着古地理格局,西侧西昌-易门断裂与滇中古陆东缘边界基本吻合,受普渡河、小江断裂夹持地块的不均匀下降影响,形成地形地貌上的凸起与凹陷。至早寒武世梅树村成磷期,滇东地区形成了从北往南硝滩-羊场凹地、巧家-五星隆起、九龙-会泽凹地、嵩明隆起及昆明-华宁凹地相隔的“二隆三洼”的古地理格局(戈宏儒等, 1983; 王崇武等, 1985; 陈志明等, 1987; 曾允孚等, 1989; 唐良栋, 1994; 东野脉兴, 1996; 王祖关等, 1995; 罗惠麟等, 1998)。中泥盆世,滇东地区地处上扬子障壁海岸至三角洲环境,滇东南为右江海槽开阔台地至盆地平原,属开阔台地-礁后潟湖古地理环境(王祖关等, 1995)。在台内隆起区可划分靠古陆边缘的潮坪及台内水下隆起潮坪带,在台内低凹区也可划分出与广海直接相通的开阔台地以及不与广海相通的闭塞台地两类,在这样错综复杂的古地理环境中,形成了云南东部早寒武世梅树村期沉积域中众多的沉积相带(图8),划分为潮坪相、滩后潟湖相及开阔台地相(戈宏儒等, 1983; 王崇武等, 1985; 陈志明等, 1987; 王祖关等, 1995; 罗惠麟等, 1998; 金振奎等, 2013)。受波浪和潮汐作用,磷块岩一般形成在古陆或同生水下隆起的边缘、水下浅滩或同生隆起带中的相对洼陷地带,早寒武世梅树村期滇东这样复杂的古地理环境中的海湾、潟湖、浅滩、水下隆起的边缘、水下洼地等成为工业

磷块岩的有利沉积场所。

3.4.3 成矿模式

海相沉积型磷矿的形成具有事件性的特征,国内外众多学者针对其成因开展了大量研究,主要形成了生物成因说和上升洋流说(Hicks, 1876; Kazakov, 1937; Mckelvey *et al.*, 1952),总体认为磷块岩矿床形成受古纬度、古气候、古构造及古地貌等多方面因素控制(Cook and Mcelhinny, 1979; 曾云孚等, 1987, 1989; 东野脉兴, 1996)。

滇东地区地处扬子陆块西南缘,早寒武世时期位于赤道附近,为三面邻陆的陆表海碳酸岩台地,在古构造的控制下,形成近南北向展布的多个隆起与凹陷(戈宏儒等, 1983; 王崇武等, 1985; 陈志明等, 1987; 曾允孚等, 1989; 东野脉兴, 1996; 杨志鲜等, 2016; 岳维好等, 2020)。上升洋流从深处带来的富磷海底淤泥,从南端和西侧古陆缺口处进入各凹陷区,流速由急变缓,由于水浅且温暖,磷质被生物大量吸收,许多菌类生物参与了成磷作用或作为生物碎屑组分从海水中沉积下来(曾允孚等, 1993),磷酸盐堆集由贫到富。各聚磷凹陷地处低纬度地区,随着磷质的聚集,因菌藻生物的存在改变了水介质化学条件(刘志礼等, 1991),且由于太阳热能和地球自转引起地壳上部海水搅动、CO₂减少、海水中P₂O₅形成过饱和状态,磷酸盐不断地随上升洋流运移至聚磷凹地半封闭海湾的大陆斜坡上,在距大陆0~30 km、水体深度0~150 m范围内沉积下来(东野脉兴, 1992; 岳维好等, 2012; 贺天全等, 2022)。初始沉积过程中生物-化学沉积作用较强,以碳酸盐类为主,磷酸盐质点呈细粒的质点散布,在潮下低能环境形成薄层磷质沉积物,并逐渐富集而成半固结或固结磷块岩。滇东地区早寒武世梅树村阶与筇竹寺阶包括4个由海水震荡运动造成的沉积旋回(岳维好等, 2012),随着沉积环境的更替,这些半固结或固结磷块岩,经盆地内的波浪、潮汐作用,发生破碎、冲刷、簸选等机械作用而颗粒化,连同碳酸盐泥和硅泥一起经搬运在凹陷部位重新汇聚再沉积成岩成矿,形成了滇东以磷酸盐-碳酸盐岩-硅质岩建造为主的多层海相沉积型磷块岩矿床(图9)。

4 找矿方向

云南省磷矿潜力评价工作,按照全国矿产资源国情调查潜在矿产资源评价技术要求,对云南省沉

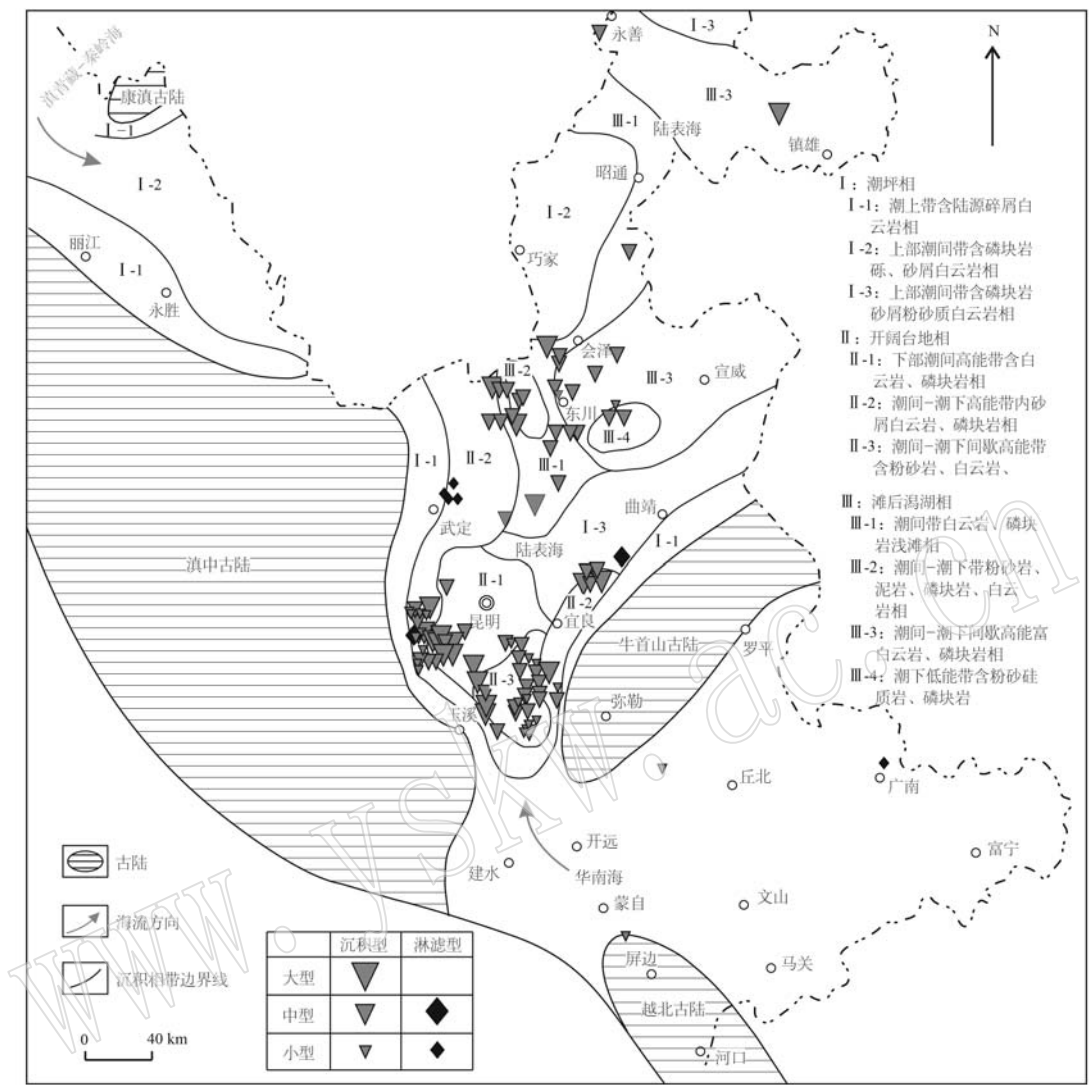


图 8 云南省早寒武世中宜村期岩相古地理图[据王祖关等(1995)修编]

Fig. 8 Lithofacies paleogeographic map of Zhongyicun Stage in the Early Cambrian, Yunnan Province (after Wang Zuguang et al., 1995)

积型磷块岩、风化淋滤型 2 种磷矿床类型,以地质环境、成矿特征及地球化学特征等磷矿成矿要素为基础,结合区域成矿模式和找矿模式,建立了 4 种矿床式找矿预测模型,其中新建了“羊场式”沉积型磷块岩找矿预测模型(表 3),全省圈定 146 处最小预测区,采用地质体积法预测云南磷矿潜在资源矿石量超 290 亿吨。本文在云南省磷矿潜力评价动态更新成果的基础上,结合磷矿成矿规律,圈定了 8 处寻找下寒武统梅树村组沉积型磷块岩的重点找矿远景区(图 10a、表 4),其中镇雄-威信远景区找磷潜力巨大,可优先部署找矿工作。

镇雄-威信找矿远景区:位于镇雄-威信成磷区(图 10b),区内含磷层位未出露地表,为隐伏状。该

区近年找矿取得重大突破,羊场超大型磷矿矿体呈层状沿羊场背斜核部及两翼顺层产出,控制走向长 13 km、倾向宽 6 km,工业矿体累计厚度平均 36.77 m, P_2O_5 平均品位 23.18%,探获资源量超过 40 亿吨。一是羊场磷矿深部矿体延伸稳定,均未封边,深部特别是西部为有利的找矿地段;二是该区古地貌属硝滩-羊场凹地,为浅海碳酸盐台地干热潮坪环境浅滩泻湖相,为寻找羊场式沉积型磷块岩矿床的有利地段,区内与羊场磷矿成矿条件类似的还有芒部背斜、长安背斜、威信背斜及以勒背斜,地表已出露寒武系,含矿层位梅树村组均未出露,深部均具有寻找沉积型磷块岩矿床的巨大潜力,该区预测潜在资源超 130 亿吨。

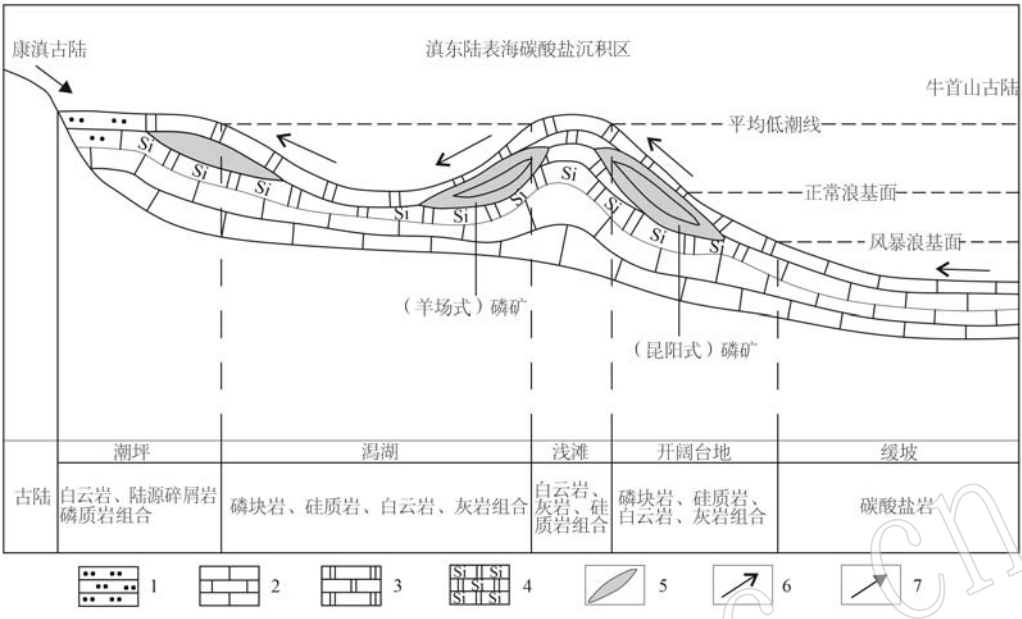


图 9 云南省早寒武世沉积型磷矿成矿模式图[据杨志鲜等(2016)修编]

Fig. 9 Early Cambrian sedimentary phosphate mineralization model map in Yunnan Province (after Yang Zhixian *et al.*, 2016)

1—碎屑岩; 2—灰岩; 3—白云岩; 4—硅质白云岩; 5—磷质磷块岩(磷矿体); 6—洋流方向; 7—陆源碎屑
1—clastic rock; 2—limestone; 3—dolomite; 4—siliceous dolomite; 5—phosphoric phosphorite (phosphorite); 6—ocean current direction;
7—terrigenous debris

表 3 云南“羊场式”沉积型磷块岩矿床找矿预测模型

Table 3 Prospecting prediction model of “Yangchang type” sedimentary phosphorite deposit in Yunnan Province

预测要素	要素特征	要素分类
大地构造单元	昭通陆棚	重要
成矿时代	早寒武世梅树村中期(中谊村期)	必要
古地理	硝滩-羊场凹地东段	必要
成矿环境	浅海碳酸盐台地干热潮坪环境	必要
沉积亚相	浅滩潟湖相	必要
沉积建造	硅质白云岩-白云质灰岩-磷块岩建造	必要
含磷层	下寒武统梅树村组二段	必要
岩性组合	含磷白云岩、含磷白云质灰岩、硅质白云岩及磷块岩	必要
矿体规模	超大型,走向延伸 13 km,倾向延伸 6 km	重要
矿体厚度	5.29~29.59 m	重要
矿石品位	各矿体平均品位 P_2O_5 为 18.04%~24.33%	重要
矿物组合	主要为胶磷矿	重要
结构构造	砂屑、砾屑结构,致密块状构造和条纹条带状构造	重要
地球化学特征	P 元素化探异常	重要
	隐伏磷矿体,无 P 元素地球化学异常	重要

5 结论

(1) 云南省磷矿具有分布集中,矿床类型简单,大中型矿床多,矿石质量好等特点。矿床类型可分为沉积型磷块岩和风化淋滤型,以沉积型磷块岩矿

床为主;主要分布在昆明、玉溪、曲靖及昭通等市;云南已发现 11 个含磷层位,仅下寒武统梅树村组和中泥盆统榴江组具有工业意义;成矿时期为早寒武世、中泥盆世、新生代,以早寒武世为主。

(2) 云南省沉积型磷块岩矿床受古气候、古构造及古地理的共同控制,在羊场磷矿床研究基础上

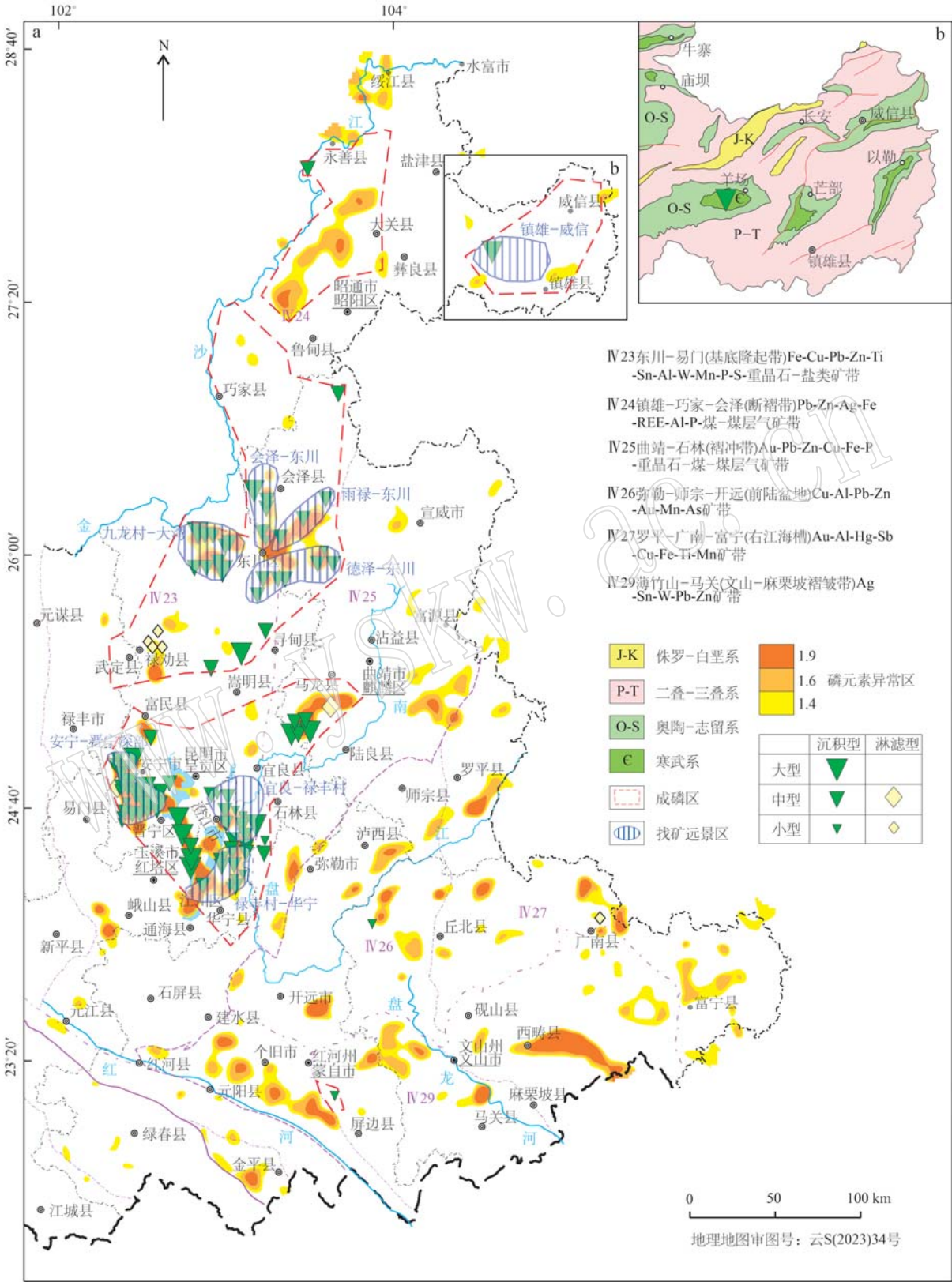


图 10 云南省磷矿找矿远景区分布图(a)和镇雄-威信找矿远景区地质简图(b)

Fig. 10 Prospecting potential area map of the phosphate ore in Yunnan(a) and geological sketch of Zhenxiong-Weixin prospecting prospect area(b)

表 4 找矿远景区特征一览表

Table 4 List of characteristics of prospecting potential areas

序号	找矿远景区名称	成矿地质条件	化探特征	总体工作程度	找矿前景
1	安宁-晋宁深部	位于安宁-华宁-曲靖成磷区西部,区内含磷岩系分布广泛,为白云岩-磷块岩-白云岩夹硅质岩建造,分布有安宁草铺、西山尖山及昆阳等大型-超大型磷矿床 10 余处,磷矿层走向及倾向延伸稳定,浅部工作程度较高,深部找矿潜力大。	分布有 3 个 P 元素异常,与地表含磷岩系套合较好	浅部工作程度高	已查明磷矿石资源量大于 15 亿吨,预测潜在资源大于 14 亿吨。
2	宜良-禄丰村	位于安宁-华宁-曲靖成磷区中东部,区内含磷岩系分布广泛,为白云岩夹硅质岩-含磷白云岩及磷块岩-白云岩夹硅质岩建造,分布有渔户村、大山寺及梁王冲等大中型磷矿床 10 余处,磷矿层走向及倾向延伸稳定。	分布有 1 个 P 元素异常,与地表含磷岩系套合较好	较低	已查明磷矿石资源量大于 0.2 亿吨,预测潜在资源大于 1.7 亿吨。
3	禄丰村-华宁	位于安宁-华宁-曲靖成磷区南部,区内含磷岩系分布广泛,为白云岩-泥岩及磷块岩-白云岩夹硅质岩建造,分布有华宁火特等大中型磷矿床 10 余处,磷矿层走向及倾向延伸稳定。	分布有 1 个 P 元素异常,与地表含磷岩系套合较好	较低	已查明磷矿石资源量大于 0.5 亿吨,预测潜在资源大于 7 亿吨。
4	九龙村-大湾	位于巧家-会泽-武定成磷区西部,区内含磷岩系分布广泛,为白云岩-磷块岩-含磷及硅质条带白云岩建造,分布有白龙潭等大中型磷矿 10 余处,磷矿层走向及倾向延伸稳定。	分布有 1 个 P 元素异常,与地表含磷岩系套合较好	偏低	已查明磷矿石资源量大于 4 亿吨,预测潜在资源大于 35 亿吨。
5	会泽-东川	位于巧家-会泽-武定成磷区中部,区内含磷岩系分布广泛,为白云岩夹硅质条带-磷块岩-白云岩建造,分布有梨树坪、大海等大中型磷矿床 10 余处,磷矿层走向及倾向延伸稳定。	分布有 1 个 P 元素异常,与地表含磷岩系套合较好	偏低	已查明磷矿石资源量大于 1.4 亿吨,预测潜在资源大于 1.2 亿吨。
6	雨禄-东川	位于巧家-会泽-武定成磷区东部,区内含磷岩系分布广泛,为白云岩-磷块岩-泥岩-白云岩夹硅质岩建造,分布有雨禄大型磷矿,磷矿层走向及倾向延伸稳定。	分布有 1 个 P 元素异常,与地表含磷岩系套合较好	较低	已查明磷矿石资源量大于 1 亿吨,预测潜在资源大于 8 亿吨。
7	德泽-东川	位于巧家-会泽-武定成磷区东部,区内含磷岩系分布广泛,为白云岩-磷块岩-粉砂质白云岩-泥质白云岩夹硅质岩建造,分布有德泽等大中型磷矿床 10 余处,磷矿层走向及倾向延伸稳定。	分布有 1 个 P 元素异常,与地表含磷岩系套合较好	较低	已查明磷矿石资源量大于 1.9 亿吨,预测潜在资源大于 13 亿吨。
8	镇雄-威信	位于镇雄-威信成磷区,区内含磷层位呈隐伏状,为硅质白云岩-白云质灰岩-磷块岩建造,分布有羊场超大型磷矿,磷矿层走向及倾向延伸稳定,矿石质量较好,深部找矿潜力大。	分布有 3 个 P 元素异常,地表无含磷岩系出露,与已知矿床不套合。	较低	已查明磷矿石资源量大于 40 亿吨,预测潜在资源大于 130 亿吨。

完善了云南省早寒武世沉积型磷矿成矿模式。

(3) 云南省磷矿潜力评价动态更新,预测全省磷矿潜在资源矿石量超 290 亿吨,本次结合磷矿成矿规律圈定安宁-晋宁深部、宜良-禄丰村、禄丰村-华宁、九龙村-大湾、会泽-东川、雨禄-东川、德泽-东川、镇雄-威信 8 处重点找矿远景区,其中镇雄-威信远景区找磷潜力巨大,可优先部署找矿工作。

致谢 云南省矿产资源国情调查和羊场磷矿普查项目组的相关工作成果为本文的编写奠定了基础,审稿专家及编辑提出的宝贵意见使笔者受益匪浅,在此一并表示感谢。

References

- Chen Qiliang, He Minfang and Guo Jian. 2017. Genetic type and metallogenic model for Bainishan phosphate deposit, Anning City, Yunnan Province[J]. Mineral Resources and Geology, 31(6): 1 113 ~ 1 120 (in Chinese with English abstract).
- Chen Ruihong and Zhao Kai. 2021. Ore-forming material source and sedimentary environment of Kunyang phosphate deposit in East Yunnan [J]. Mineral Resources and Geology, 35(1): 70~75, 89 (in Chinese with English abstract).

- Chen Zhiming and Chen Qiying. 1987. Paleogeography of Yangzi platform and the characteristics of the phosphorite distribution of early Meishucun stage, early Cambrian[J]. Chinese Journal of Geology, 22(3): 246~257 (in Chinese with English abstract).
- Cook P J and McElhinny M W. 1979. A reevaluation of the spatial and temporal distribution of sedimentary phosphate deposits in the light of plate tectonics[J]. Economic Geology, 74(2): 315~330.
- Cui R G, Zhang Y F, Guo J, *et al.* 2019. Development strategy of phosphate rock in China under global allocation of resources[J]. Chinese Journal of Engineering Science, 21(1): 128.
- 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. 1992. Progress of the phosphorite research and its theory of biomineralization[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 10(3): 96~103 (in Chinese with English abstract).
- Dongye Maixing. 1996. Upwelling oceanic currents & epicontinental Chi[J]. Geology of Chemical Minerals, 18(3): 156~162 (in Chinese).
- 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).
- Filippelli G M. 2011. Phosphate rock formation and marine phosphorus geochemistry: The deep time perspective[J]. Chemosphere, 84(6): 759~766.
- 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).
- Han Yuchuan, Xiong Xianxiao, Xue Tianxing, *et al.* 2012. Metallogenic Regularity of Phosphate Deposits in China[M]. Beijing: Geologic Publishing House, 1~211 (in Chinese with English abstract).
- He Tianquan, Li Binbin and Zhang Chunying. 2022. Geological characteristics and metallogenic model of phosphate deposit of Kunyang type in Sichuan Province[J]. Geological Survey of China, 9(2): 15~24 (in Chinese with English abstract).
- Hicks H. 1876. On the occurrence of phosphates in the cambrian rocks [J]. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1(5): 415~416.
- 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).
- Kazakov A V. 1937. The phosphorite facies and the genesis of phosphorites[J]. Trans. Sci. Fertil. Insecto-Fungicides, 142: 95~113.
- Li Wei, Gao Hui, Luo Yingjie, *et al.* 2015. Status, trends and suggestions of phosphorus ore resources at home and abroad [J]. China Mining Magazine, 24(6): 6~10 (in Chinese with English abstract).
- Liang Yongzhong, Su Yuyun, Su Xiuzhu, *et al.* 2018. Modes of occurrence of rare earth elements in Kunyang phosphate deposit, Yunnan province[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 37(6): 959~966 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jianxiong. 2009. Phosphate rock resource characteristic and suggestion on its exploitation and utilization[J]. Industrial Minerals & Processing, 38(3): 36~39 (in Chinese with English abstract).
- Liu Zhili, Liu Xuexian, Fang Yigong, *et al.* 1991. A simulated test of algal influence on formation and deposition of phosphate [J]. Acta Geologica Sinica, 65(2): 166~175 (in Chinese with English abstract).
- Luo Huilin, Hu Shixue, Zhang Shishan, *et al.* 1998. Sedimentary environment of early cambrian phosphorites in the Jinning-Anning region, Yunnan[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 25(2): 163~169 (in Chinese with English abstract).
- McKelvey V E, Swanson R W & Sheldon R P. 1952. The Perm-lan Phosphorite Deposits of Western United States[R]. Section 11: 45~64.
- Meng Yonglong. 2018. Geological Characteristic and Origin of the Phosphate Deposits in Bailongtan, Xundian, Yunnan Province [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology (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).
- Qin Huan. 2022. Geochemical Characteristics of Yangchang Phosphate Deposit in Zhenxiong County, Northeast Yunnan and Its Indicative Significance[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology (in Chinese with English abstract).
- Qin Huan, Zhou Qian, Hong Tuo, *et al.* 2022. Geochemical characteristics and sedimentary environment of Yangchang phosphorite deposit in Zhenxiong County, Yunnan Province[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 37(3): 259~269 (in Chinese with English abstract).
- Shen Lijuan and Zeng Yunfu. 1989. Genetic types of phosphorite in eastern Yunnan[J]. Mineralogy and Petrology, 9(2): 12~24 (in Chinese with English abstract).
- Sun Xiaohong, Chen Chunlin, Wang Gaoshang, *et al.* 2015. The prediction of phosphate rock demand in China[J]. Acta Geoscientia Sinica

- ca, 36(2): 213~219(in Chinese with English abstract).
- Tang Liangdong. 1994. On the palaeogeography of the early Cambrian sedimentary facies in east Yunnan[J]. Yunnan Geology, 13(3): 240~252(in Chinese with English abstract).
- Wang Chongwu, Zhu Longguang, Que Jingcheng, *et al.* 1985. Geological setting in which early Cambrian phosphorite deposits formed in the west region of the Yangtze platform[J]. Yunnan Geology, 4(1): 33~58(in Chinese with English abstract).
- Wang Wenhao, Wang Chunlian, Wang Lianxun, *et al.* 2024. Origin types, metallogenic regularity and prospecting direction of Phosphate deposits in China[J/OL]. Geology in China, 1~26(in Chinese with English abstract). [2024-08-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20240321.1935.002.html>.
- Wang Ying and Xiong Xianxiao. 2023. Phosphate ore series, metallogenic regularity, and prospecting direction in China[J]. Acta Geologica Sinica, 44(4): 625~634(in Chinese with English abstract).
- Wang Ying, Xiong Xianxiao, Dongye Maiying, *et al.* 2022. Prediction model and exploration prospect analysis of phosphate mineral resources in China[J]. Geology in China, 49(2): 435~454(in Chinese with English abstract).
- Wang Zuguan and Jiang Nengren. 1995. Atlas of the Sedimentary Facies and Palaeogeography of Yunnan[M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 1~228(in Chinese with English abstract).
- Wu Fafu, Wang Jianxiong, Liu Jiangtao, *et al.* 2021. Distribution, geology and development status of phosphate resources [J]. Geology in China, (1): 82~101(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, Yuan Junhong, Du Jiahai, *et al.* 2011. Distribution characteristics and resource potential of sedimentary phosphate deposits in China[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 33(2): 6~11(in Chinese with English abstract).
- Xiao Zhe, Chen Guifang, Pang Jiantao, *et al.* 2019. Analysis of occurrence state of Cr in phosphate rock of Kunyang phosphate mine[J]. Industrial Minerals and Processing, 48(7): 36~39(in Chinese with English abstract).
- Xiong Xianxiao, Dongye Maixing, Cao Ye, *et al.* 2019. Mineral Geology of China Phosphate Ore Volume[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~597(in Chinese with English abstract).
- Xue Tianxing, Xiong Xianxiao and Tian Shengping. 2011. Discussion on the main phosphate ore concentration areas and their resource potential in China[J]. Geology of Chemical Minerals, 33(1): 9~20(in Chinese with English abstract).
- Yan Qinggao, Li Chao, Jiang Xiaojun, *et al.* 2018. The age and sedimentary environment of the Kunyang phosphate deposit, central Yunnan: Constraints from Re-Os isotopes[J]. Rock and Mineral Analysis, 37(4): 462~474(in Chinese with English abstract).
- Yang Zhixian, Deng Quanjian, Huo Zhengping, *et al.* 2016. Metallogenic Regularity and Resource Potential of Phosphate Rock in Yunnan Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~153(in Chinese with English abstract).
- Ye Lianjun, Chen Qiyang and Zhao Dongxu. 1989. China Phosphorite [M]. Beijing: Science Press, 237~247(in Chinese with English abstract).
- Yue Weihao, Gao Jianguo, Li Yunchan, *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).
- Yue Weihao, Huang Yanhua, Dao Tinghong, *et al.* 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[J]. Geological Bulletin of China, 41(5): 846~856(in Chinese with English abstract).
- Yue Weihao, Yang Zhixian, Cai Zhangyang, *et al.* 2020. Geology of Minerals in China · Yunnan Volume · Chemical Minerals[M]. Beijing: Science Press, 1~643(in Chinese with English abstract).
- Zeng Yunfu, He Tinggui, Shen Lijuan, *et al.* 1993. Mechanism of the formation of lower Cambrian biophosphorites in eastern Yunnan[J]. Mineralogy and Petrology, 13(2): 49~56(in Chinese with English abstract).
- Zeng Yunfu, Shen Lijuan and He Tinggui. 1989. Sedimentary environment and minerogenetic mechanism of phosphorite ores in east Yunnan[J]. Mineralogy and Petrology, 9(2): 45~59(in Chinese with English abstract).
- 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).

附中文参考文献

- 陈启良, 何敏芳, 郭 健. 2017. 云南安宁白泥山磷矿成因类型与成矿模式[J]. 矿产与地质, 31(6): 1113~1120.
- 陈瑞红, 赵 锴. 2021. 滇东昆阳磷矿成矿物质来源及其沉积环境[J]. 矿产与地质, 35(1): 70~75, 89.

- 陈志明, 陈其英. 1987. 扬子地台早寒武世梅树村早期的古地理及其磷块岩展布特征[J]. 地质科学, (3): 246~257.
- 崔荣国, 张艳飞, 郭娟, 等. 2019. 资源全球配置下的中国磷矿发展策略[J]. 中国工程科学, 21(1): 128~132.
- 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. 1992. 磷块岩研究进展与磷块岩生物成矿说[J]. 沉积学报, 10(3): 96~103.
- 东野脉兴. 1996. 上升洋流与陆缘坳[J]. 化工矿产地质, 18(3): 156~162.
- 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.
- 韩豫川, 熊先孝, 薛天星, 等. 2012. 中国磷矿成矿规律[M]. 北京: 地质出版社, 1~211.
- 贺天全, 李斌斌, 张春颖. 2022. 四川省昆阳式磷矿地质特征及成矿模式[J]. 中国地质调查, 9(2): 15~24.
- 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.
- 李维, 高辉, 罗英杰, 等. 2015. 国内外磷矿资源利用现状、趋势分析及对策建议[J]. 中国矿业, 24(6): 6~10.
- 梁永忠, 苏好芸, 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.
- 刘建雄. 2009. 我国磷矿资源特点及开发利用建议[J]. 化工矿物与加工, 38(3): 36~39.
- 刘志礼, 刘雪娟, 方贻功, 等. 1991. 藻类对磷酸盐形成和沉积作用影响的模拟实验[J]. 地质学报, 65(2): 166~175.
- 罗惠麟, 胡世学, 张世山, 等. 1998. 云南晋宁、安宁地区早寒武世磷块岩沉积环境分析[J]. 成都理工学院学报, 25(2): 163~169.
- 孟永龙. 2018. 云南省寻甸白龙潭磷矿地质特征及成因探讨[D]. 成都: 成都理工大学.
- 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.
- 秦欢. 2022. 滇东北镇雄县羊场磷矿地球化学特征及其指示意义[D]. 昆明: 昆明理工大学.
- 秦欢, 周骞, 洪托, 等. 2022. 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, 37(3): 259~269.
- 沈丽娟, 曾云孚. 1989. 滇东磷块岩的成因类型[J]. 矿物岩石, 9(2): 12~24.
- 孙小虹, 陈春琳, 王高尚, 等. 2015. 中国磷矿资源需求预测[J]. 地球学报, 36(2): 213~219.
- 唐良栋. 1994. 云南东部早寒武世沉积相古地理[J]. 云南地质, 13(3): 240~252.
- 王崇武, 朱隆光, 阙竞成, 等. 1985. 扬子西区早寒武世磷块岩矿床形成的地质背景[J]. 云南地质, 4(1): 33~58.
- 王文浩, 王春连, 王连训, 等. 2024. 中国磷矿成因类型、成矿规律及重点找矿方向[J/OL]. 中国地质, 1~26. [2024-08-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20240321.1935.002.html>.
- 王莹, 熊先孝. 2023. 中国磷矿成矿系列、成矿规律与找矿方向[J]. 地球学报, 44(4): 625~634.
- 王莹, 熊先孝, 东野脉兴, 等. 2022. 中国磷矿资源预测模型及找矿远景分析[J]. 中国地质, 49(2): 435~454.
- 王祖关, 江能人. 1995. 云南岩相古地理图集[M]. 昆明: 云南科技出版社, 1~228.
- 吴发富, 王建雄, 刘江涛, 等. 2021. 磷矿的分布、特征与开发现状[J]. 中国地质, (1): 82~101.
- 夏亮亮, 郝乃轩, 范晨予, 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, 袁俊宏, 杜家海, 等. 2011. 中国沉积磷矿床分布特征及资源潜力[J]. 武汉工程大学学报, 33(2): 6~11.
- 肖喆, 陈贵方, 庞建涛, 等. 2019. 昆阳磷矿磷块岩中铬元素的赋存状态分析[J]. 化工矿物与加工, 48(7): 36~39.
- 熊先孝, 东野脉兴, 曹焯, 等. 2019. 中国矿产地质志·磷矿卷[M]. 北京: 地质出版社, 1~597.
- 薛天星, 熊先孝, 田升平. 2011. 中国磷矿主要矿集区及其资源潜力探讨[J]. 化工矿产地质, 33(1): 9~20.
- 严清高, 李超, 江小均, 等. 2018. 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]. 岩矿测试, 37(4): 462~474.
- 杨志鲜, 邓泉江, 霍正平, 等. 2016. 云南省磷矿成矿潜力及资源潜力[M]. 北京: 地质出版社, 1~153.
- 叶连俊, 陈其英, 赵东旭. 1989. 中国磷块岩[M]. 北京: 科学出版社, 237~247.
- 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.
- 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[J]. 地质通报, 41(5): 846~856.
- 岳维好, 杨志鲜, 蔡章杨, 等. 2020. 中国矿产地质志·云南卷·化工矿产[M]. 北京: 地质出版社, 1~643.
- 曾允孚, 何廷贵, 沈丽娟, 等. 1993. 滇东下寒武统生物磷块岩的形成机制[J]. 矿物岩石, 13(2): 49~56.
- 曾允孚, 沈丽娟, 何廷贵. 1989. 滇东磷块岩的沉积环境和成矿机理[J]. 矿物岩石, 9(2): 45~59.
- 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.