



辽西勿兰乌苏磷矿床地质特征及控矿因素

武悦¹, 郭跃², 韩东³, 罗银花⁴, 蒋永臻³, 陈志斌⁵, 常影⁶, 张一⁷

1. 辽宁省地质勘探矿业集团有限责任公司, 辽宁 沈阳 110032; 2. 辽宁省物测勘查院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110031; 3. 辽宁有色勘察研究院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110013; 4. 辽宁省地质矿产研究院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110032; 5. 中国建筑材料工业地质勘查中心辽宁总队, 辽宁 沈阳 110004; 6. 沈阳佳源土地规划设计有限公司, 辽宁 沈阳 110031; 7. 辽宁省自然资源事务服务中心, 辽宁 沈阳 110033

摘要: 勿兰乌苏磷矿是辽宁省西部重要的磷矿床之一, 资源储量达到大型规模, 同时伴生有益组分(磁铁矿)。磷矿体赋存于新太古界小塔子沟岩组, 控矿因素主要为绿岩型含磷磁铁矿建造。矿石矿物组合为磷灰石+磁铁矿+钛磁铁矿+角闪石+黑云母+斜长石。磷灰石含量与铁钛锰等暗色组分含量呈正相关, 显示了磷的亲铁性。矿床成因属于变质型磷灰石矿床。

关键词: 磷矿; 磷灰石; 矿床成因; 控矿因素; 新太古代; 辽西

GEOLOGICAL CHARACTERISTICS AND ORE-CONTROLLING FACTORS OF WULANWUSU PHOSPHATE DEPOSIT IN WESTERN LIAONING PROVINCE

WU Yue¹, GUO Yue², HAN Dong³, LUO Yin-hua⁴, JIANG Yong-zhen³, CHEN Zhi-bin⁵, CHANG Ying⁶, Zhang Yi⁷

1. Liaoning Geological Exploration and Mining Group Co., Ltd., Shenyang 110032, China; 2. Liaoning Geophysical Measuring Exploration Institute Co., Ltd., Shenyang 110031, China; 3. Liaoning Non-ferrous Geological Exploration and Research Institute Co., Ltd., Shenyang 110013, China; 4. Liaoning Geology and Mineral Resources Institute Co., Ltd., Shenyang 110032, China; 5. Liaoning Branch of China National Geological Exploration Center of Building Materials Industry, Shenyang 110004, China; 6. Shenyang Jiayuan Land Planning and Design Co., Ltd., Shenyang 110031, China; 7. Natural Resources Service Center of Liaoning Province, Shenyang 110013, China

Abstract: Wulanwusu phosphate deposit, one of the important phosphate deposits in western Liaoning Province, has a large-scale resource reserve and associates with beneficial component (magnetite). The phosphate orebodies are occurred in the Neoarchean Xiaotazigou complex, mainly controlled by greenstone-type phosphorus magnetite formation. The ore mineral assemblage includes apatite, magnetite, titanomagnetite, hornblende, biotite and plagioclase. The apatite content is positively correlated with the content of dark components such as iron, titanium and manganese, indicating the siderophile affinity of phosphorus. The deposit is of metamorphic apatite type genetically.

Key words: phosphate deposit; apatite; genesis of deposit; ore-controlling factor; Neoarchean; western Liaoning Province

0 引言

磷矿是我国战略性矿产资源, 在地域分布上呈现

“南多北少”的特点^[1-5]。辽宁省磷矿主要分布在朝阳、阜新、辽阳地区^[6-7]。勿兰乌苏磷矿位于辽宁省建平县

收稿日期:2023-04-02; 修回日期:2023-04-10。编辑:李兰英。

基金项目:辽宁自然资源厅省级地质勘查项目“辽宁省北票市姜家店金矿普查(续作)”(辽自然资项[2022]45号)。

作者简介:武悦(1987—),男,高级工程师,从事地质调查研究工作,通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区北陵大街29号, E-mail//792153056@qq.com

通信作者:罗银花(1983—),女,硕士,工程师,从事地质调查研究工作,通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区北陵大街31号, E-mail//laura83@163.com

深井镇勿兰乌苏村,地理坐标为东经 $119^{\circ}42'40''$,北纬 $41^{\circ}36'50''$,是辽宁省西部重要磷矿床之一,累计查明磷矿资源储量达到大型规模,同时伴生有益组分(磁铁矿),具有矿产资源综合回收利用价值高的特点^[8-10],该矿床属于变质型磷灰石矿床^[11-14]。本文重点对辽西勿兰乌苏磷矿的地质特征和控制因素进行阐释,以期对周边磷矿地质勘查工作提供借鉴参考。

1 地质特征

1.1 区域地质

勿兰乌苏磷矿大地构造处于华北陆块东段,发育新太古界小塔子沟岩组变质岩系^[15],是磷矿主要赋矿岩系。

1.2 矿区地质特征

1.2.1 地层

矿区出露地层较简单(见图1),从老到新特征如下。

(1)新太古界小塔子沟岩组(Ar_{3x}):岩石类型为黑云斜长变粒岩、斜长角闪岩、磁铁石英岩等。区内可进一步划分为上部(Ar_{3x}^1)片麻岩类,岩性主要为黑云斜长片麻岩、角闪斜长片麻岩,片麻状构造明显,普遍含有辉石及紫苏辉石等副矿物。下部(Ar_{3x}^2)以含磷灰石斑杂状变质岩夹磁铁石英岩为主,含磷磁铁矿普遍发育,为磷矿的赋矿层位。下部岩性在勿兰乌苏出露的规模较大,平面上呈梨状,面积约 35 km^2 。下部岩性与上部岩性接触界线明显。

(2)白垩系下统张家口组(K_{1z}):小面积出露于矿区北部,岩石地层单位以陆相火山岩为主,夹少量河湖相沉积岩。岩性组合为厚层状砾岩夹流纹质角砾凝灰岩,偶见薄层泥质粉砂岩、细砂岩。张家口组火山岩是燕山褶皱-逆冲推覆带晚中生代火山活动的重要组成部分。张家口组与下覆新太古界小塔子沟岩组呈角度不整合接触。

(3)第四系(Q):主要为更新统马兰组和全新统大凌河组,岩性主要为灰黄色黄土、黏土、冲积砂砾石。

1.2.2 构造

矿区构造不发育,以 F1 断层为界,分为北部和南部。北部构造线呈北北东向,南部构造线呈近东西向。F1 断层对矿体连续性呈破坏关系。

F1 断层为矿区最大一条断层,呈近东西走向,横

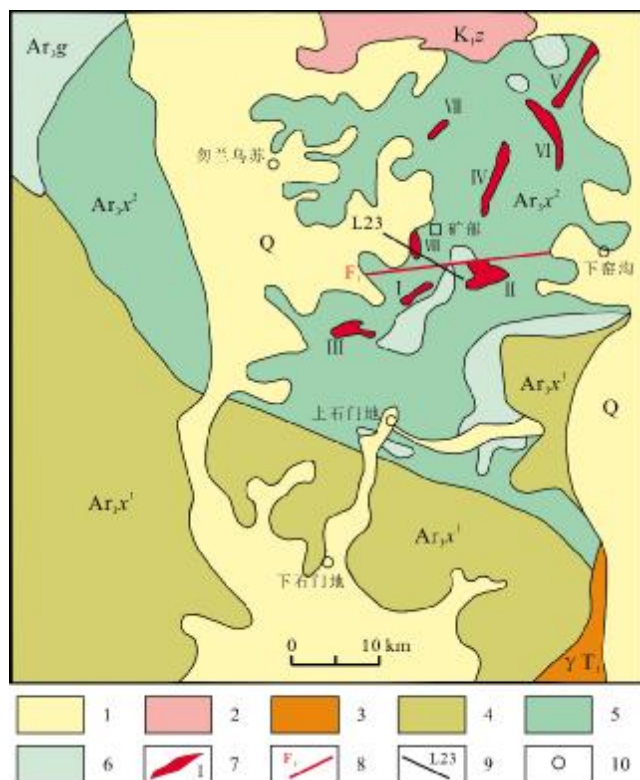


图1 辽西勿兰乌苏磷矿床地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of Wulanwusu phosphate deposit in western Liaoning Province

1—第四系(Quaternary); 2—白垩纪火山岩(Cretaceous volcanic rock); 3—早三叠世二长花岗岩(Early Triassic monzogranite); 4—小塔子沟岩组上部(upper Xiaotazigou rock fm.); 5—小塔子沟岩组下部(lower Xiaotazigou rock fm.); 6—新太古代混合岩化花岗岩(Neoproterozoic migmatized granite); 7—磷矿体及其编号(phosphate orebody and number); 8—断裂构造(fault); 9—勘探线及编号(exploratory line and number); 10—村庄(village)

穿矿区中部,倾向北,倾角 $40^{\circ}\sim 65^{\circ}$,破碎带宽 $3\sim 15\text{ m}$,为一条正断层。断层南北的矿体走向、岩脉走向、构造线方向均有明显不同。矿区北部构造带:褶皱、断裂均不发育,岩层多为北北东向延展。断裂构造较小,规模亦小,呈北北东向,倾向北西或南东。矿区南部构造带:矿体和主要构造线呈近东西向,局部地层受构造影响发生扭转。断裂构造体系呈北西向。局部岩层扭转较大,多呈北东向。长英质脉、石英脉、斜长角闪岩等受构造控制呈东西向或北西向。

1.2.3 岩浆岩

矿区岩浆岩主要为早三叠世二长花岗岩(γT_1),小面积出露于矿区东南部,呈不规则条带状产出。岩石呈浅肉红色,半自形粗粒结构,块状构造,主要矿物成

分为钾长石、斜长石、石英,其次见有少量的黑云母,矿区局部见花岗斑岩、正长斑岩、伟晶岩等岩脉。

1.2.4 变质岩

矿区变质岩发育,大面积出露新太古界小塔子沟岩组(Ar_{3x}),由高级变质表壳残留体和变质深成岩组成。变质深成岩为矿区的高级变质岩,构成区内最古老的结晶基底。变质程度为中-高级区域变质,变质程度为角闪岩相至麻粒岩相。小塔子沟岩组的原岩为一套夹硅质质的基性火山岩-火山沉积岩建造,在 2.5 Ga 左右遭受变形变质作用改造,原岩形成的环境为火山岛弧环境^[15]。

2 矿体地质特征

2.1 矿体特征

矿区磷矿体均赋存于新太古界小塔子沟岩组下部含磷灰石斑杂状变质岩,共圈定磷矿体 8 条(图 1),磷矿体集中分布在斑杂状变质岩中部。野外主要通过钼酸铵法判断磷矿体出露位置。即:在野外先将岩石表面用酸浸后,滴上钼酸铵溶液,含磷岩石呈现黄色磷钼酸沉淀^[12,16]。此外,野外结合暗色组分含量可以判断磷矿体大致位置。

断裂构造(F1)以南产出 3 条磷矿体(I—Ⅲ号),矿体走向近东西,倾向南东。断裂以北产出 5 条磷矿体(Ⅳ号—Ⅷ号),除Ⅵ号矿体呈北西走向,倾向南西以外,其余矿体均为北东向或北北东向,倾向南东。

磷矿体总体呈似层状、透镜状和不规则状(图 2)。矿体地表出露长度 166~912 m,真厚度 26.14~107.89 m,埋深一般从地表至地下 130 m,深部延续性好,品位均匀,有用组分 P_2O_5 含量为 2.87%~3.83%,最高达 8%左右。有益组分 TFe 含量为 11.11%~14.40%,为超贫铁矿,详见表 1。

2.2 矿石特征

2.2.1 矿石自然类型

依据矿石的矿物成分、结构、构造,磷矿石可分为 5 种自然类型。

(1)钛磁铁磷灰石矿:风化面黑褐色,新鲜面深灰黑色、黑绿色,致密块状构造,偶见斜长流斑构造,中细粒结构。主要矿物含量,角闪石 40%,钛磁铁矿 20%~50%,磷灰石 10%~20%,黑云母 10%~15%,斜长石 0~20%。有用组分 P_2O_5 含量 4%~8%。

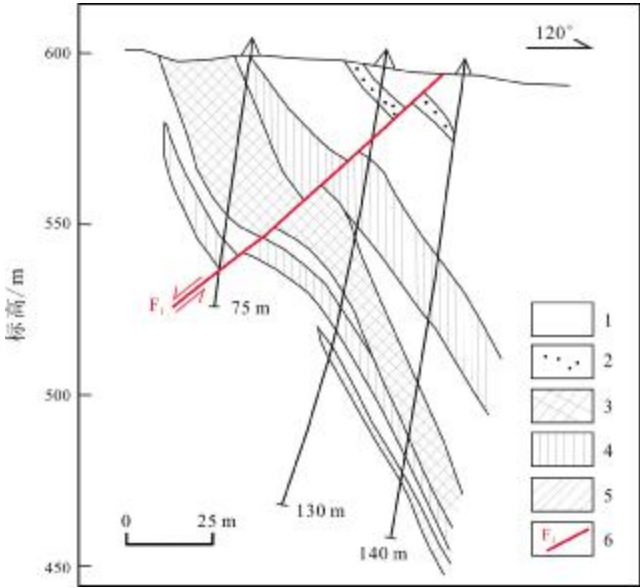


图 2 勿兰乌苏磷矿床第 23 线地质剖面简图
Fig. 2 Geological profile of Wulanwusu phosphate deposit along No. 23 exploratory line

1—小塔子沟岩组下部斑杂状变质岩 (taxitic metamorphic rock in lower Xiaotazigou rock fm.); 2—黑云角闪斜长变粒岩 (biotite amphibolite plagioclase granulite); 3—钛磁铁磷灰石矿体 (titanomagnetite apatite orebody); 4—变斑斜长钛磁铁磷灰石矿体 (plagioclase titanomagnetite apatite orebody); 5—含磁铁磷灰石黑云斜长变粒岩 (magnetite-bearing apatite biotite plagioclase granulite); 6—断裂构造(fault)

表 1 勿兰乌苏磷矿床矿体特征表
Table 1 Orebody characteristics of Wulanwusu phosphate deposit

矿体 编号	规模/m		产状		平均 品位/%		赋存标高/ m	埋深/ m
	长度	真厚度	倾向	倾角	P_2O_5	TFe		
I	380	49.71	SE	64~80°	3.27	11.50	570~470	0~100
II	360	26.14	S	54~68°	3.22	12.61	622~470	0~100
III	300	92.29	S	7~25°	2.93	11.11	610~470	0~130
IV	912	43.48	SE	67~86°	3.68	12.81	600~470	0~100
V	166	34.76	SE	64~70°	3.02	11.88	610~470	0~110
VI	835	50.64	SW	15~83°	3.83	13.59	635~470	0~95
VII	276	20.95	SE	22~85°	3.43	14.40	680~640	0~40
VIII	260	107.89	E	25~70°	3.44	13.55	575~470	0~100

(2)斜长变斑钛磁铁磷灰石矿:灰黑色、深灰色,斑杂状构造,中粗粒结构。主要矿物含量,角闪岩 25%~30%,钛磁铁矿 15%~20%,斜长石含量较钛磁铁磷灰石矿增多,占 20%~40%,磷灰石 6%~10%,黑云母 10%~15%。有用组分 P_2O_5 含量 3%~4%。

(3)含磁铁磷灰石黑云斜长斑杂状变质岩:灰色,斑杂状构造发育,粗粒结构。主要矿物含量,斜长石 40%~60%,其次为角闪石 10%~15%,钛磁铁矿 8%~15%,黑云母 10%~20%。有用组分 P_2O_5 含量 2%~3%。

(4)变粒岩型钛磁铁磷灰石矿:灰黑色、灰绿色,块状构造,局部呈片麻状构造,细粒结构,暗色组分含量大于 50%。黑云母 30%~40%,斜长石 30%,角闪石 0~10%,磷灰石 6%~10%,钛磁铁矿 1.0%~1.5%。有用组分 P_2O_5 含量约 3%。

(5)含磁铁磷灰石黑云角闪斜长变粒岩:岩性基本与变粒岩型钛磁铁磷灰石矿相同,暗色组分减少,斜长石增多,钛磁铁矿、磷灰石减少。磷灰石含量 5%~6%,与变粒岩型钛磁铁磷灰石矿呈过渡类型,暗色组分逐渐减少,逐渐过渡为黑云角闪斜长变粒岩。

以上(1)~(3)类为本区磷矿石的主要类型,可归为一类,互为渐变过渡关系,暗色组分呈递减趋势,长英质组分逐渐增多,片麻状构造渐趋发育,岩性类型整体向黑云斜长片麻岩(围岩)过渡。

2.2.2 矿石结构、构造

矿石结构主要为花岗变晶结构、交代结构及镶嵌变晶结构,其次为鳞片变晶结构、陨铁结构、变余结构。矿石构造主要为中粗粒块状构造,中粗粒流斑状-斑杂状构造,其次为细粒块状、片麻状构造。

2.2.3 矿石矿物组成

矿石矿物组合主要为:磷灰石+磁铁矿+钛磁铁矿+角闪石+黑云母+斜长石。

磷灰石:白色,玻璃光泽,性脆,呈豆状、短柱状均匀分布在矿石中,与暗色组分角闪石、磁铁矿等密切共生。斑杂状构造矿石中磷灰石自形程度较好,呈六方柱状。变粒岩中磷灰石呈粒状他型晶。磷灰石为最先结晶矿物,至晚期常被其他结晶矿物包裹、穿插、破坏,偶见包裹于角闪石或黑云母中磷灰石蚀变为氟磷灰石。

磁铁矿:黑色,金属光泽,粒状,具强磁性,呈不规则粒状镶嵌于暗色组分及磷灰石颗粒之间,形成海绵

陨铁结构。部分呈八面体自形晶和浸染状产出。另有少量磁铁矿,呈星点状分布于角闪石节理结构。

钛磁铁矿:褐色,金属至半金属光泽,呈叶片晶型产于海绵陨铁结构,为磁铁矿变种,片晶宽度 0.04~0.5 mm,常见白铁矿化。

角闪石:呈中粒自形晶,长柱状,属多镁少铁普通角闪石,后期黑云母化、绿泥石化。

黑云母:属铁黑云母,呈片状簇生,与磷灰石相伴生长。与角闪石呈负相关,部分黑云母呈斑晶状,半径可达 1 mm,其中含有磷灰石包粒。

斜长石:为主要脉石矿物,灰白色,呈斑状,分布均匀。斑晶个体可达 0.5~1 cm。镜下斜长石多为碎裂化的颗粒状集合体,其内混杂较多的黑云母鳞片,显示动力变质、重结晶特征。部分在高品位矿石及斑杂状矿石中出现。

石英:矿石中石英含量少,镜下见于暗色组分聚集处。角闪石中含有石英细粒,为角闪石蚀变成为黑云母过程中的副产品。

其他少量矿物有黄铜矿、黄铁矿。次生蚀变矿物有白钛矿、绿帘石、绿泥石等。

夹石主要为闪长岩脉、长英质脉、斜长角闪岩及含磷灰石基性岩。夹石多呈条带状、扁豆状及蝌蚪状,与矿体倾向一致,宽 3~12 m。

2.3 矿石化学组分

化学组分是磷矿研究的重要内容,本次研究化学组分样品共计 6 件,其中矿石 3 件,围岩 3 件。各项化学组分测试结果质量满足《地质矿产实验室测试质量管理规范》(DZ/T 0130—2006)要求。

通过表 2 和图 3 分析可知:1)磷灰石含量与铁锰钛等暗色组分含量呈正相关,显示磷的亲铁性,说明其成因上的继承性。2)磷灰石与长英质矿物呈负相关关系。长英质矿物含量高的岩石,其原岩向中-酸性火山岩过渡。根据磷灰石含量,矿石矿物组合可划分为 4 种类型:

- (1)磷灰石+辉石+钛磁铁矿+角闪石($P_2O_5 > 5\%$);
- (2)磷灰石+钛磁铁矿+角闪石+黑云母(P_2O_5 3%~5%);
- (3)磷灰石+钛磁铁矿+角闪石+黑云母+斜长石(P_2O_5 2%~3%);
- (4)磷灰石+角闪石+黑云母+斜长石+石英(P_2O_5

1%~2%)。

表 2 勿兰乌苏磷矿矿石及围岩主要化学成分表
Table 2 Main chemical compositions of ores and wall rocks in Wulanwusu phosphate deposit

岩(矿)石 名称	钛磁铁 磷灰石 矿石	斜长变斑 钛磁铁磷 灰石矿石	变粒岩型 钛磁铁磷 灰石矿石	黑云斜长 片麻岩	黑云钾长 片麻岩	花岗质 片麻岩
SiO ₂	23.22	39.01	41.11	52.75	58.39	68.34
TiO ₂	4.77	2.96	3.17	2.02	1.27	0.5
Al ₂ O ₃	5.85	9.82	11.35	14.85	16.81	14.89
Fe ₂ O ₃	5.85	9.82	11.35	14.85	16.81	14.89
FeO	25.97	11.83	11.91	4.73	2.45	1.75
MnO	8.25	8.23	6.7	5.39	3.54	2.66
MgO	0.24	0.17	0.19	0.12	0.07	1.05
CaO	11.63	10.11	9.06	5.61	4	1.98
BaO	0.04	0.04	0.21	0.53	0.68	0
Na ₂ O	0.5	2.7	2.48	3.93	4.35	3.3
K ₂ O	0.42	1.6	2.25	3.7	4.87	6.05
P ₂ O ₅	6.83	3.73	3.25	0.81	0.43	0.06
V ₂ O ₅	0.12	0.06	0.07	0.03	0.02	0.04
S	0.26	0.7	0.18	0.15	0.15	0.12
铁钛锰	44.84	32.84	33.13	26.99	24.07	19.8
长英质	29.99	53.13	57.19	75.23	84.42	92.58

测试单位:辽宁省第三地质大队实验室;外检单位:国土资源部东北矿产
资源监督检测中心。铁钛锰组分=Fe₂O₃+FeO+MnO+TiO₂ 含量之和。长
英质组分=SiO₂+Na₂O+K₂O+Al₂O₃ 含量之和。含量单位: %。

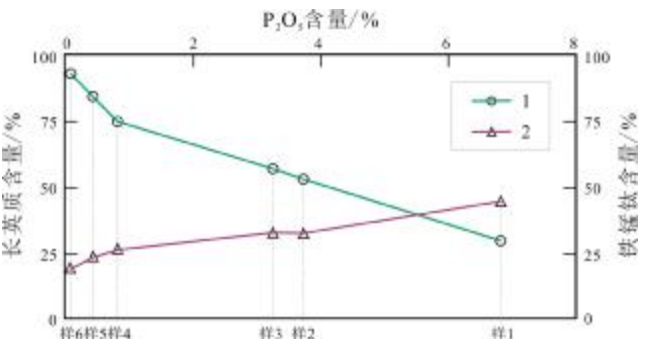


图 3 P₂O₅ 含量与铁钛锰组分和长英质组分含量关系图
Fig. 3 The diagram of P₂O₅ content vs. Fe-Mn-Ti and felsic components
1—长英质组分(felsic); 2—铁钛锰组分(Fe-Mn-Ti)

3 控矿因素

辽西勿兰乌苏磷矿床赋存于新太古代小塔子沟组含磷黑云斜长斑杂状变质岩中,矿体层控性明显,受

绿岩型含磷铁建造岩石组合控制^[17-18],由此认为勿兰乌苏磷矿床是大陆边缘构造-岩浆作用、沉积-变质作用的产物,后经中—高级区域变质作用使得磷灰石富集成矿,控矿因素见表 3。

矿床成矿模式见图 4。成矿作业主要包括两个阶段:第一阶段为新太古代火山喷发沉积阶段,即太古宙大陆边缘活动带或弧后盆地裂谷环境,火山喷发和沉积形成火山-沉积物质(绿岩建造),成矿物质 P、Fe 等与绿岩建造一同沉积形成最初的矿源层^[19-20]。第二阶段为区域变质阶段,即强烈的构造-岩浆热液事件引起区域变质作用,形成混合岩化黑云斜长片麻岩等岩性组合,成矿物质 P、Fe 进一步富集最终成矿。

找矿方向为新太古代深成变质岩中残留绿岩型地质体,通过对辽宁区域地质资料的研究整理,初步认为,辽宁抚顺-清原地区、建平-宝国老地区位于古老地核边缘,区域发育相似断裂和褶皱构造,广泛发育绿岩型含磷磁铁建造及中—高级区域变质作用,形成的黑云斜长变粒岩、斜长角闪岩、磁铁石英岩的含磷磁铁岩相组合,具有良好的磷矿找矿前景^[7]。

建议对磷矿远景区加强大比例尺地质调查,利用 Fe、P、Ti、Mn 等元素异常和磁异常,精确圈定绿岩型含磷磁铁建造空间分布,以期精确圈定磷矿找矿靶区。

4 结论

(1)辽西勿兰乌苏磷矿成因类型为变质型磷矿床。规模大、品位低,伴生有益组分(磁铁矿),具有矿产资源综合回收利用价值高的特点。

(2)矿石矿物组合主要为:磷灰石+磁铁矿+钛磁铁矿+角闪石+黑云母+斜长石。磷灰石含量与铁钛锰等暗色组分含量呈正相关,显示磷的亲铁性。

(3)磷矿的主要控矿因素为绿岩型含磷磁铁建造的新太古界小塔子沟组。辽西地区新太古界黑云斜长变粒岩、斜长角闪岩、磁铁石英岩等含磷磁铁建造地质体出露区,具有良好的磷矿找矿前景。

参考文献(References):

[1]黎龙昌,张伟,邹林,等.四川绵竹地区城墙岩磷矿床地质特征及沉积环境[J].西北地质,2021,54(3):142-154.
Li L C, Zhang W, Zou L, et al. Geological characteristics and sedimentary environment of Chengqiangyan phosphate deposit in Mianzhu area,

表 3 勿兰乌苏磷矿床控矿因素分析表

Table 3 Ore-controlling factors of Wulanwusu phosphate deposit

控矿要素	特征描述	分类
变质建造	黑云斜长变粒岩、斜长角闪岩、磁铁石英岩、黑云斜长片麻岩、黑云钾长片麻岩、花岗质片麻岩	必要
岩石结构	中细粒结构、花岗变粒结构	重要
地质环境	岩石构造	块状构造、条带状构造
	成矿时代	新太古代
	成矿层位	新太古界变质表壳岩和变质深成岩组合
矿石类型	钛磁铁磷灰石矿、含磁铁磷灰石黑云斜长斑杂状变质岩等	必要
矿石矿物	钛磁铁矿、磷灰石	必要
矿床特征	脉石矿物	角闪石、黑云母、斜长石
	矿石结构	中细粒结构
	矿石构造	块状构造、条带状构造
物化探异常	地球物理异常	伴生磁铁矿可引起磁异常,对磷矿勘查具有间接指示作用
	地球化学异常	Fe、P、Ti、Mn 等元素异常

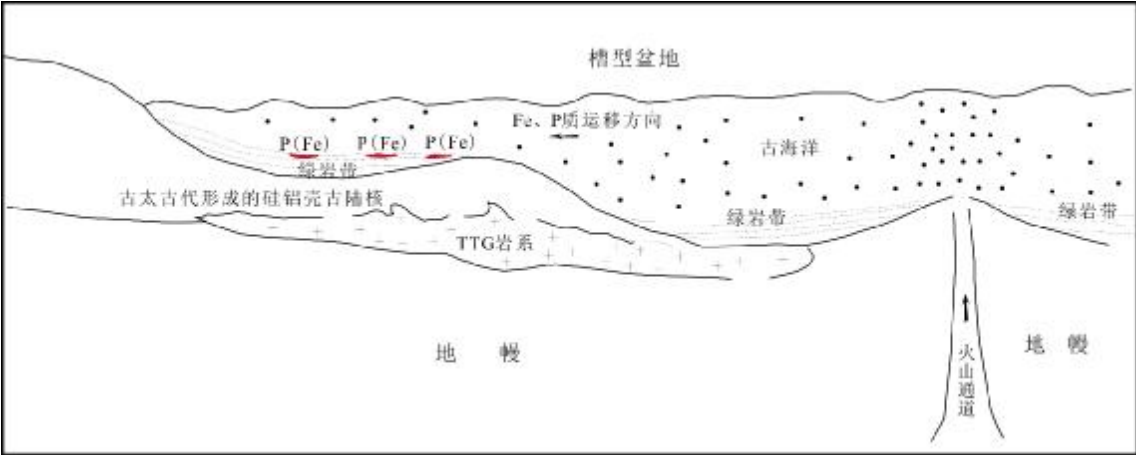


图 4 勿兰乌苏磷矿床成矿模式图

Fig. 4 Metallogenic model of Wulanwusu phosphate deposit

Sichuan Province[J]. Northwestern Geology, 2021, 54(3): 142–154.

[2]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.

Qin H, Zhou Q, Hong T, et al. Geochemical characteristics and sedimentary environment of Yangchang phosphorite deposit in Zhenxiong County, Yunnan Province [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2022, 37(3): 259–269.

[3]郑兰强,刘亮,邹林,等. 四川绵竹红岩什邡式磷矿地质特征及找矿标志[J]. 矿产勘查, 2021, 12(3): 640–649.

Zheng L Q, Liu L, Zou L, et al. Geological characteristics and prospecting criteria of Shifang type phosphate deposit in Hongyan,

Mianzhu, Sichuan Province [J]. Mineral Exploration, 2021, 12(3): 640–649.

[4]贺瑾瑞,朱杰勇,周健,等. 云南白登浅海相磷块岩与青龙峭陆相磷块岩的对比研究[J]. 地质与资源, 2009, 18(4): 292–297.

He J R, Zhu J Y, Zhou J, et al. A contrast research between the Baideng shallow-sea facies and Qinglongshao continental facies phosphorite in Yunnan Province[J]. Geology and Resources, 2009, 18(4): 292–297.

[5]朱林生,朱杰勇,陈启亮,等. 云南安宁磷矿区富矿的分布规律及控制因素[J]. 地质与资源, 2008, 17(1): 40–44.

Zhu L S, Zhu J Y, Chen Q L, et al. The distribution law and controlling

- factors of the rich phosphorite ore in Anning phosphorous deposit, Yunnan Province[J]. *Geology and Resources*, 2008, 17(1): 40-44.
- [6] 吴兴乐, 冯闯, 姜红英. 辽宁省辽阳市甜水磷矿床地质特征及成矿条件[J]. *吉林地质*, 2007, 26(4): 47-53.
- Wu X L, Feng C, Jiang H Y. Geologic features and metallogenic condition of the Tianshui P-deposit, Liaoyang area, Liaoning Province [J]. *Jilin Geology*, 2007, 26(4): 47-53.
- [7] 孙鹏慧, 李博, 乌爱军, 等. 辽宁省磷矿资源潜力评价[M]. 北京: 地质出版社, 2018: 1-174.
- Sun P H, Li B, Wu A J, et al. Potential evaluation of phosphate ore resources in Liaoning Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2018: 1-174. (in Chinese)
- [8] 张建乐. 辽西-冀北地区低品位铁磷共生矿磷的选矿[J]. *化工矿物与加工*, 2017, 46(7): 13-16.
- Zhang J L. Beneficiation of apatite from low grade iron & phosphate intergrown ore in western Liaoning and northern Hebei[J]. *Industrial Minerals & Processing*, 2017, 46(7): 13-16.
- [9] 张建乐. 辽西某低品位铁磷选矿工艺技改实践[J]. *矿产综合利用*, 2018, 39(4): 117-120.
- Zhang J L. Practice of technical improvement on mineral processing for a low-grade iron-phosphate in western Liaoning [J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2018, 39(4): 117-120.
- [10] 夏学惠, 杨辉艳, 魏详松. 华北地台北缘绿岩带型铁磷矿地质及综合利用前景[J]. *地质与勘探*, 2012, 48(5): 876-883.
- Xia X H, Yang H Y, Wei X S. Geology and comprehensive utilization of the greenstone belt iron-phosphate deposit in the northern margin of North China platform[J]. *Geology and Exploration*, 2012, 48(5): 876-883.
- [11] 王莹, 熊先孝, 东野脉兴, 等. 中国磷矿资源预测模型及找矿远景分析[J]. *中国地质*, 2022, 49(2): 435-454.
- Wang Y, Xiong X X, Dongye M X, et al. Prediction model and exploration prospect analysis of phosphate mineral resources in China [J]. *Geology in China*, 2022, 49(2): 435-454.
- [12] 宋天锐. 中国北方磷矿成矿类型和找矿方向[J]. *中国地质*, 2007, 34(2): 315-323.
- Song T R. On the types of phosphate deposit in northern China and direction for ore finding[J]. *Geology in China*, 2007, 34(2): 315-323.
- [13] 夏学惠, 郝尔宏. 中国磷矿床成因分类[J]. *化工矿产地质*, 2012, 34(1): 1-14.
- Xia X H, Hao E H. Genetic classification of China phosphorus deposit[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 2012, 34(1): 1-14.
- [14] 熊先孝, 李博, 姚超美, 等. 中国北方磷矿矿床类型及成矿规律[J]. *化工矿产地质*, 2007, 29(3): 159-168.
- Xiong X X, Li B Y, Yao C M, et al. The ore types and metallagenic regularities of phosphorite in the North China[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 2007, 29(3): 159-168.
- [15] 杨仲杰. 华北板块北缘中段新太古界小塔子沟岩组恢复及其地质意义[J]. *世界地质*, 2016, 35(1): 133-141.
- Yang Z J. Recovery of New Archean Xiaotazigou rock group in middle sector of northern margin of North China Plate and its geological implications[J]. *Global Geology*, 2016, 35(1): 133-141.
- [16] 东野脉兴, 熊先孝, 栾俊霞. 磷矿找矿标志与找矿方法[J]. *化工矿产地质*, 2018, 40(4): 198-203.
- Dongye M X, Xiong X X, Luan J X. The prospecting mark and prospecting method of phosphate ore [J]. *Geology of Chemical Minerals*, 2018, 40(4): 198-203.
- [17] 孙小虹, 陈春琳, 王高尚, 等. 中国磷矿资源需求预测[J]. *地球学报*, 2015, 36(2): 213-219.
- Sun X H, Chen C L, Wang G S, et al. The prediction of phosphate rock demand in China[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2015, 36(2): 213-219.
- [18] 吴发富, 王建雄, 刘江涛, 等. 磷矿的分布、特征与开发现状[J]. *中国地质*, 2021, 48(1): 82-101.
- Wu F F, Wang J X, Liu J T, et al. Distribution, geology and development status of phosphate resources [J]. *Geology in China*, 2021, 48(1): 82-101.
- [19] 薛珂, 张润宇. 中国磷矿资源分布及其成矿特征研究进展[J]. *矿物学报*, 2019, 39(1): 7-14.
- Xue K, Zhang R Y. Advances of researches on the distribution and metallogenic characteristics of phosphorous deposits in China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2019, 39(1): 7-14.
- [20] 李延河, 侯可军, 万德芳, 等. 前寒武纪条带状硅铁建造的形成机制与地球早期的大气和海洋[J]. *地质学报*, 2010, 84(9): 1359-1373.
- Li Y H, Hou K J, Wan D F, et al. Formation mechanism of Precambrian banded iron formation and atmosphere and ocean during early stage of the earth [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84(9): 1359-1373.