

# 吉林白山五道羊岔新太古代大型钒钛磁铁矿床地质特征及锆石U-Pb年龄

邵建波<sup>1</sup> 李景光<sup>2</sup> 王洪涛<sup>1</sup> 陈殿义<sup>1</sup> 任强<sup>1</sup>

(1.吉林省地矿信息中心,吉林 长春 130061;2.吉林省地矿勘察设计院,吉林 长春 130012)

**摘要:**吉林白山五道羊岔新太古代大型钒钛磁铁矿是国内外首次发现的产于斜长角闪岩层状侵入体内的岩浆型铁矿,对于相似成矿地质条件区矿产资源勘查具有重要意义。该矿床位于吉林省南部龙岗古陆核南部边缘,板石沟绿岩带北侧。I、II、VI号矿体位于斑杂状斜长角闪岩层状侵入体内,并具有成因联系。该岩体原岩为正角闪岩,构造环境为汇聚边缘岛弧环境。矿体形态为层状,矿石结构主要为自形-半自形-他形晶粒状结构、固熔体分离结构、海绵陨铁结构,矿石构造有致密块状构造、条带状构造、浸染状构造等。矿石金属矿物主要为磁铁矿、钛铁矿。对磁铁矿、钛铁矿进行了电子探针微区成分分析,磁铁矿成因类型为岩浆熔离钛磁铁矿型。钛铁矿与理论化学成分基本一致。对斑杂状斜长角闪岩层状侵入体中锆石进行了地球化学分析,其稀土元素及微量元素特征显示锆石为岩浆锆石,采用LA-ICP-MS法进行了U-Pb定年,获得一条较好的不一致线,上交点年龄为(2526±35) Ma。

**关键词:**钒钛磁铁矿床;矿床特征;锆石LA-ICP-MS U-Pb年龄;新太古代;五道羊岔;吉林  
**中图分类号:**P618.3;P597.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2014)02-0463-21

五道羊岔铁矿位于吉林省南部白山市江源区,矿区位置为东经126°29'30"~126°32'30",北纬42°07'00"~42°08'00"。该矿床发现于1977年,截至2010年末矿山累计探明资源储量97.48万t<sup>①</sup>,矿床规模仅为小型(矿点)。

2010年李景光等<sup>②</sup>在矿区开展1:2 000磁法测量,发现12处磁异常,经钻探验证发现钒钛磁铁矿矿体,2012年完成勘查,提交并批准资源储量1.87亿t(铁矿石),矿床规模从小型(矿点)跃升为大型矿床,同时共生TiO<sub>2</sub>资源储量606万t(氧化物)、V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>资源储量30万t(氧化物)、钴(Co)资源储量2.40万t(金属),还伴生有益组分镍(Ni)、铌(Nb)、钪(Sc)、镓(Ga)、硒(Se)、碲(Te)等。矿区有10组矿体,其中

VI号矿组规模最大,铁矿石资源储量1.82亿t,占估算铁矿石资源储量的95%。对该矿床成因,李景光等在矿区勘查基础上提出五道羊岔铁矿为太古代岩浆型铁矿床<sup>[1]</sup>,但无精确的地球化学及年龄资料。

笔者对该矿床进行了系统的地质、地球化学研究,认为五道羊岔矿区包含沉积变质型(鞍山式)和岩浆型2种矿床类型,I、II、VI号矿体具有岩浆型铁矿床特征,其他小型矿体(组)则以沉积变质型(鞍山式)成因为主,矿床成因不能一概而论。对含矿斜长角闪岩层状侵入体进行了锆石U-Pb同位素定年,测得含矿斜长角闪岩层状侵入体中锆石的年龄为(2 526±35) Ma。通过这些研究,明确了矿床成矿类型、大地构造环境、矿床成因及成矿时代。

收稿日期:2013-05-16;改回日期:2013-08-04

基金项目:吉林省重点科技发展计划项目(20090483)资助。

作者简介:邵建波,男,1963年生,博士后,研究员,矿产普查与勘探专业,主要从事地质矿产勘查及研究;E-mail:shao-jb@163.com。

①吉林省国土资源厅.吉林省矿产资源储量表[G].2010.

②李景光,吕宗凯,于志鹏,等.吉林省白山市五道羊岔铁矿勘探报告[R].2012.

五道羊岔新太古代大型钒钛磁铁矿床是吉林省建国以来发现的最大铁矿,也是吉南陆块区及至国内外太古宇中首次发现的大型岩浆型铁矿床。该矿床丰富了前寒武纪铁矿类型,改变了太古宇无大型岩浆铁矿的历史,对于重新认识吉林南部乃至全国铁矿分布规律,开展矿产勘查都具有重要意义。

# 1 地质背景

## 1.1 区域地质特征

矿区所处的辽东—吉南地区是中国太古宇发育较好、并具有代表性的地区之一<sup>[2-3]</sup>,其中赋存着丰富的金、铜、锌和铁矿等矿产(图1)。

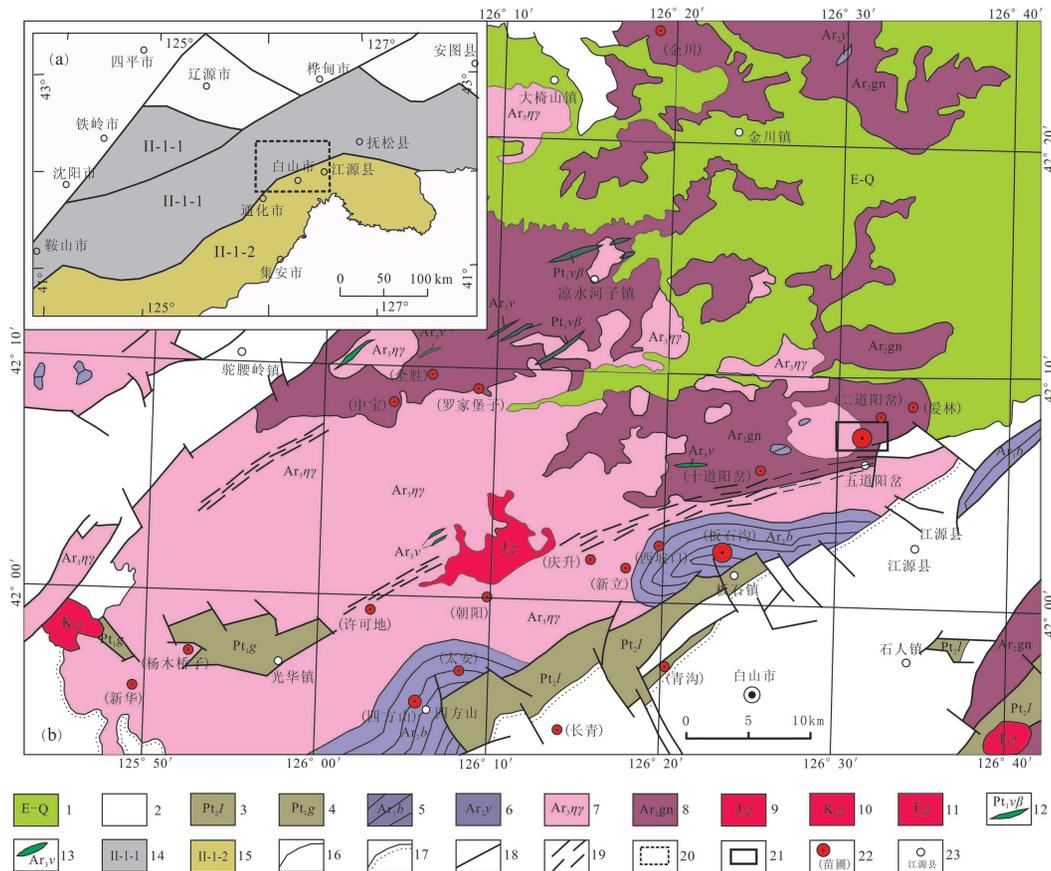


图1 吉林省南部地质图(据资料①~④及文献[3]编制,大地构造据文献[4])

- 1—新生代火山岩;2—新元古界—中生界;3—中元古代老岭群;4—古元古代光华岩群;5—新太古代绿岩带(板石沟岩组);
- 6—中太古代杨家店组;7—新太古代二长花岗岩;8—中太古代英云闪长质片麻岩;9—早侏罗世花岗岩;10—早白垩世花岗岩;
- 11—晚三叠世花岗岩;12—古元古代辉长岩脉;13—新太古代辉长岩脉;14—华北陆块区陈台沟—沂水古陆核(辽吉古陆核);
- 15—华北陆块区胶辽陆块胶辽裂谷(辽吉裂谷);16—地质界线;17—不整合界线;18—断层;19—韧性剪切带;
- 20—图1-b位置;21—图2位置;22—铁矿及名称;23—地名

Fig.1 Geological map of southern Jilin Province (modified after reference ①~④, [3], [4])

- 1—Cenozoic volcanic rocks; 2—Neoproterozoic-Mesozoic; 3—Mesoproterozoic Laoling Group; 4—Paleoproterozoic Guanghua Group;
- 5—Neoproterozoic greenstone belts (Banshigou Group); 6—Mesoarchean Yangjiadian Formation; 7—Neoproterozoic monzogranite; 8—Middle Archean tonalitic gneiss; 9—Early Jurassic granite; 10—Early Cretaceous granite; 11—Late Triassic granite; 12—Paleoproterozoic gabbro vein;
- 13—Neoproterozoic gabbro vein; 14—Chentaigou—Yishui paleocontinent in North China palaeocontinent (Liao-Ji paleocontinent); 15—Jiao-Liao rift valley in North China palaeocontinent (Liao-Ji rift valley); 16—Geological boundary; 17—Unconformity; 18—Fault;
- 19—Ductile shear zone; 20—Location of Fig.1-b; 21—Location of Fig.2; 22—Location and name of iron mine; 23—Geographic name

① 吉林省国土资源厅. 吉林省矿产资源储量表[G]. 2010.  
 ② 李景光, 吕宗凯, 于志鹏, 等. 吉林省白山市五道羊岔铁矿勘探报告[R]. 2012.  
 ③ 路孝平, 王延生, 赵成弼, 等. 中华人民共和国区域地质调查报告 1:250 000 通化市幅[R]. 2004.  
 ④ 于宏斌, 王延生, 刘松华, 等. 中华人民共和国区域地质调查报告 1:250 000 靖宇县幅[R]. 2007.

TTG+表壳岩组合是区域上太古宇的主要地质特征,按时代可分为中太古代和新太古代2期。

中太古代是本区太古宙的主体,由英云闪长质-花岗闪长质片麻岩( $Ar_{2gn}$ )和少量呈包体的中太古代表壳岩( $Ar_{2y}$ )、紫苏花岗岩和变层状镁铁质-超镁铁质侵入岩等组成,岩石遭受高角闪岩相-麻粒岩相的区域变质作用。中太古代地质体构成辽吉古陆核核心(中央卵形隆起)。

新太古代地质体主要分布于古陆核南北两翼,由新太古代英云闪长岩、二长花岗岩( $Ar_{3\eta\gamma}$ )、紫苏花岗岩、新太古代表壳岩(绿岩带)、变层状镁铁质-超镁铁质侵入岩等组成。表壳岩以板石沟绿岩残体最大,长20 km,宽5 km,其中赋存有板石沟大型沉积变质型(鞍山式)铁矿。本文采用周小东的意见<sup>[4]</sup>,将该套岩石称之为板石沟岩组( $Ar_{3b}$ ),区域上与辽宁的红透山岩组( $Ar_{3h}$ )、吉林的老牛沟岩组( $Ar_{3l}$ )相当。板石沟和四方山绿岩残体以外(包括本矿区)绿岩带以捕虏体形式分布在新太古代二长花岗岩( $Ar_{3\eta\gamma}$ )中,规模一般较小。该套岩层在吉林省是重要的铁矿和金矿产出层位。新太古代构造环境一般认为是花岗岩-绿岩带<sup>[3]</sup>。

## 1.2 区域矿产特征

研究区铁矿分布广泛,从图1可以看出,除南部2处分布于中元古代老岭群中的沉积铁矿外,其余全部分布于太古宇内。根据目前研究成果,这些太古宙铁矿矿床类型全部为沉积变质型(鞍山式),以白山市板石沟大型铁矿为代表。板石沟矿床赋矿岩层为新太古代板石沟岩组( $Ar_{3b}$ ),岩石原岩主要为中基性火山喷出岩<sup>[5]</sup>,矿石类型主要为条带状磁铁矿石岩,矿床成因类型为沉积变质型(鞍山式)<sup>[6,7]</sup>。

## 2 五道羊岔钒钛磁铁矿地质特征

五道羊岔铁矿区太古宙地质体出露齐全(图2),包括新太古代绿岩带、新太古代二长花岗岩、新太古代层状侵入体、中太古代英云闪长质片麻岩等。与铁矿关系密切的是新太古代绿岩带和新太古代层状侵入体。

新太古代绿岩带呈包体(残留体)分布于新太古代二长花岗岩、中太古代英云闪长质片麻岩中,

主要岩石类型有黑云斜长角闪片麻岩、斜长角闪岩、石榴黑云斜长片麻岩、黑云斜长片麻岩、变粒岩等。岩石中面理产状总体与围岩片麻理一致,其中局部见磁铁矿体分布。

矿区新太古代层状侵入体是本文首次提出,依岩性命名为五道羊岔斑杂状斜长角闪岩层状侵入体,后文详细论述。

区内共发现10个矿组98条铁矿体。本文仅论述与岩浆作用有关的I、II、VI 3个矿组特征。其他矿组产于绿岩带中,矿床类型或为沉积变质型(鞍山式)铁矿床或资料不足无法确定,不在本文讨论范围之列。

### 2.1 含矿母岩——五道羊岔层状侵入体

#### 2.1.1 岩体分布及产状

该岩体分布于矿区西部(图2~3)。长4000 m,宽500~1000 m,厚50~700 m。岩体形态复杂,SW

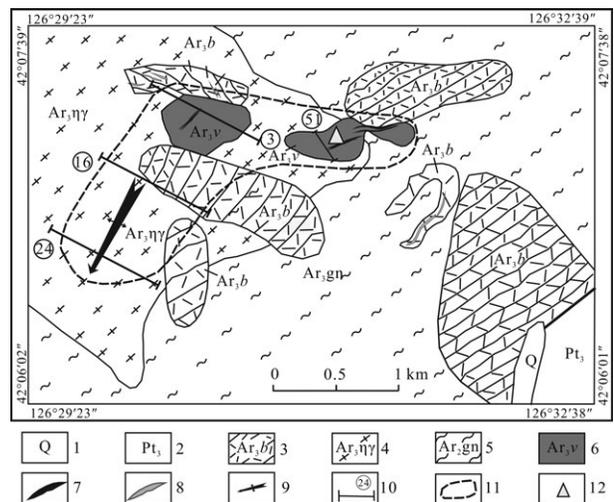


图2 五道羊岔铁矿区地质图(据资料①修改)

1—第四系;2—新元古代钓鱼台组;3—新太古代表壳岩;4—新太古代二长花岗岩;5—中太古代英云闪长岩;6—五道羊岔层状侵入体;7—钒钛磁铁矿及编号;8—沉积变质型铁矿及编号;9—隐伏背斜核部位置;10—剖面位置及编号;11—隐伏岩体范围;12—WCD-1 取样位置

Fig.2 Geological sketch map of the Wudaoyangcha Fe deposit (after ①)

1—Quaternary; 2—Neoproterozoic Diaoyutai Formation; 3—Neoarchean supracrustal rock; 4—Mesoarchean monzogranite; 5—Neoarchean tonalitic gneiss; 6—Wudaoyangcha layered intrusions; 7—Vanadiferous titanomagnetite ore; 8—Sedimentary-metamorphic iron deposit; 9—Location of concealed anticline; 10—Location and serial number of geological section; 11—Boundary of concealed rock mass; 12—Sampling locality of WCD-1

①李景光,吕宗凯,于志鹏,等.吉林省白山市五道羊岔铁矿勘探报告[R]. 2012.

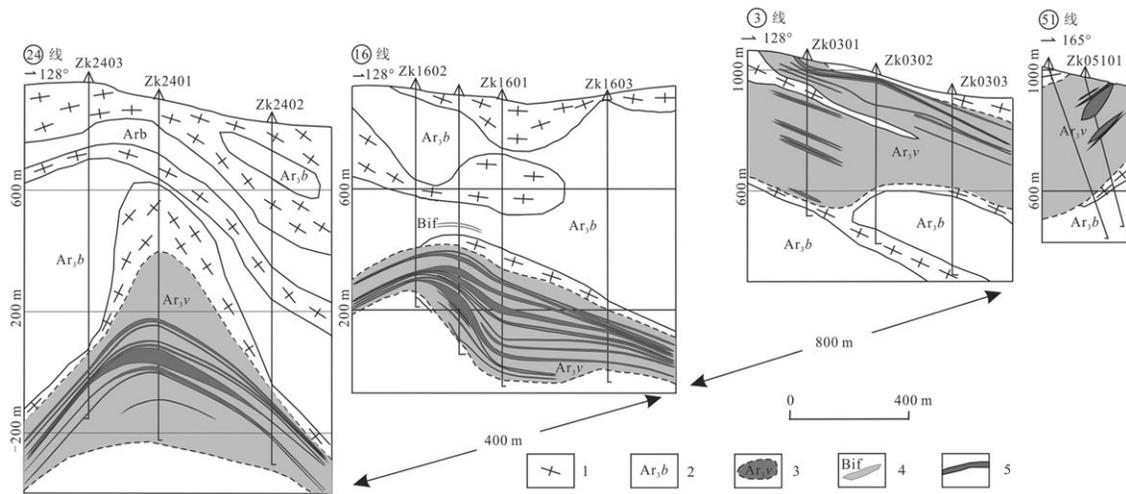


图3 五道羊盆矿区内西部联合剖面图(据资料①修改)(剖面位置见图2)  
1—新太古代二长花岗岩;2—新太古代表壳岩;3—层状侵入体;4—沉积变质铁矿;5—钒钛磁铁矿  
Fig.3 Integrated geological section in the west part of the Wudaoyangcha Fe deposit (after ①)  
(For location of section, see Fig.2)

1—Neoproterozoic monzogranite; 2—Neoproterozoic supracrustal rock; 3—Wudaoyangcha layered intrusions; 4—Sedimentary metamorphic iron ore; 5—Vanadic titanomagnetite ore

端呈背形形态, N端呈向形特征, 空间产状为NE翘起, 向SW侧伏的不规则形饼状体。为沿构造断裂带贯入于新太古代表壳岩及新太古代二长花岗岩中的似层状侵入体, 切割关系明显(图4-A)。岩体SW端埋藏深, NE端出露地表。

### 2.1.2 岩相学特征

该岩体已经变质为斜长角闪岩, 但保留有层状特征, 以NE方向展布为主。岩石呈灰黑色, 块状构造、条带状构造(图4-B)、斑杂状结构。条带主要由暗色矿物角闪石以及磁铁矿等矿物相对集中而成。由于岩石主体具有特征的斑杂状结构(图4-C), 故本文将该岩体称为斑杂状斜长角闪岩体。斑杂状结构为一种极不均匀结构, 在大庙铁矿也有所见<sup>[8]</sup>。该岩体远离矿体部位一般具有块状、条带状构造, 矿体附近以条带状构造为主, 可见强烈变形改造。

镜下观察岩石粒度变化较大, 以中-中细粒者居多, 粒状结构, 主要组成矿物为角闪石、斜长石和少量石英、黑云母、石榴石、绿帘石。不透明矿物呈浸染状、星点状分布于岩石中(图4-D)。

角闪石: 大部分继承了辉石短柱状的外形, 呈

半自形柱状晶体。粒度一般在1.0~2.5 mm。薄片中方为绿色, 多色性明显, 大部分晶体呈集合体的形态分布, 含量大约在50%。

斜长石: 半自形板状晶体, 粒度一般在1.0~3.0 mm, 见明显的聚片双晶, 晶体的边缘呈阶梯状或港湾状, 大部分晶体的边缘被细小的绿帘石交代, 含量大约在35%。

绿帘石: 他形粒状晶体, 粒度大约在0.3 mm, 薄片中方为淡色, 正高突起, 晶体与石英小晶体呈集合体的形态分布在斜长石或斜长石与角闪石的接触空隙里, 含量大约在3%。

石英: 他形粒状晶体, 粒度大约在0.2 mm, 其含量极少, 均分布在绿帘石的集合体中, 为后期交代形成的产物, 含量小于1%。

### 2.1.3 地球化学特征

本次采集了斑杂状斜长角闪岩体样品进行岩石地球化学分析。其中W4、W11位于ZK2402孔1031.5 m、1122 m, WCD1位于采矿坑道中。另外也采集了岩体外表壳岩中斜长角闪岩W15、W19(位于ZK2402孔773 m、104 m)3个样品进行对比。

岩石化学分析由国土资源部长春矿产资源监

①李景光, 吕宗凯, 于志鹏, 等. 吉林省白山市五道羊盆铁矿勘探报告[R]. 2012.

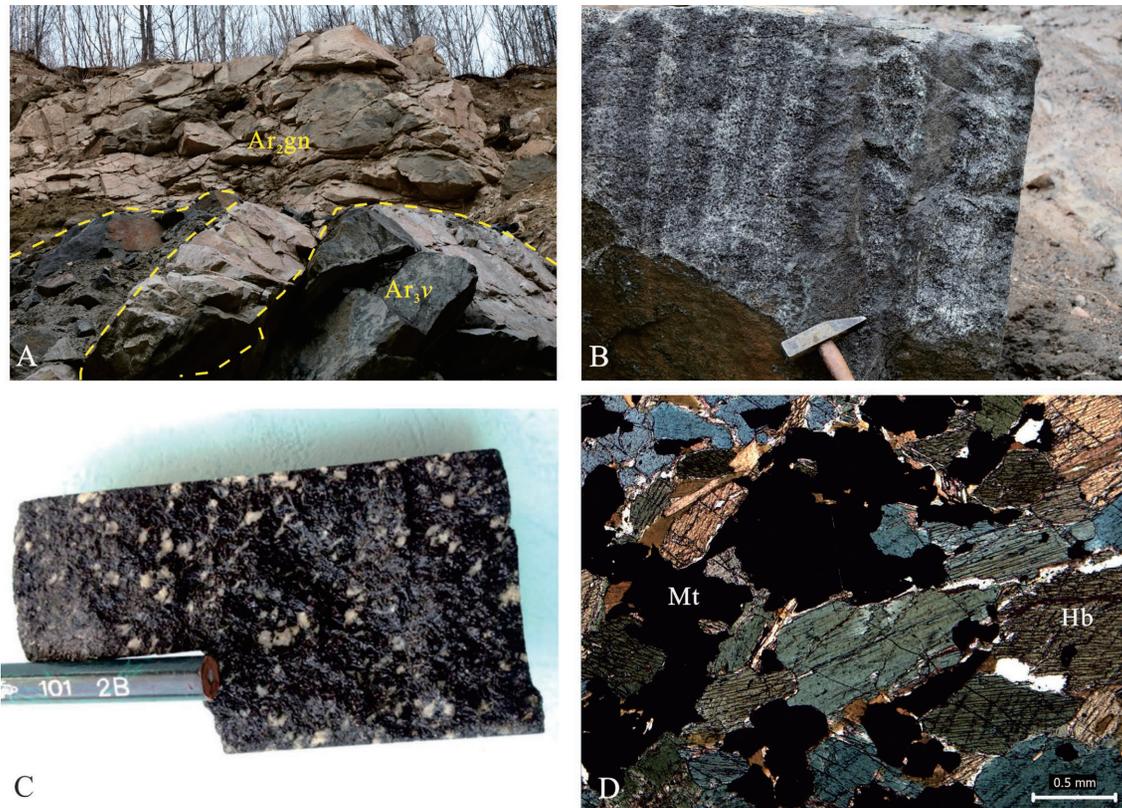


图4 五道羊岔层状侵入体斜长角闪岩照片

A—WCD1 样品附近,斜长角闪岩层状侵入体与中太古代花岗质岩石呈侵入关系;B—斜长角闪岩侵入体条带状构造;C—斜长角闪岩侵入体斑杂状构造;D—W5 样品显微照片,取自 ZK2402 孔,岩性为含磁铁矿斜长角闪岩,正交偏光,自形—半自形结构、柱状、粒状结构、海绵陨铁结构;Ar<sub>3gn</sub>—中太古代英云闪长岩;Ar<sub>3v</sub>—层状侵入体;Mt—磁铁矿;Hb—角闪石

Fig.4 Photographs of Wudaoyangcha taxitic plagioclase amphibolite

A—Intrusive relation between Wudaoyangcha layered intrusions and Mesoarchean tonalitic gneiss near sample WCD1; B—Banded structures in the layered intrusions; C—Mottled structures in the layered intrusions; D—Microphotograph of sample—W5 collected from drill hole ZK2402, whose lithology is ore-bearing amphibolite, crossed nicols, idiomorphic or hypidiomorphic granular texture, columnar or granular texture, sideronitic texture; Ar<sub>3gn</sub>—Tonalitic gneiss; Ar<sub>3v</sub>—Layered intrusions; Mt—Magnetite; Hb—Hornblende

督检测中心完成,共进行了主量、微量、稀土元素分析。斑杂状斜长角闪岩体样品主量元素、微量元素、稀土元素分析结果见表1,采用 Geokit 软件<sup>[9]</sup> 进行数据处理。

#### (1) 主量元素特征

样品主量元素测试结果表明,斑杂状斜长角闪岩体 SiO<sub>2</sub> 含量变化于 41.98%~50.32%, 平均 44.79%, 属于基性-超基性岩范畴。Na<sub>2</sub>O 含量介于 1.79%~3.32%, 平均为 2.49%, K<sub>2</sub>O 含量介于 0.86%~1.00%, 平均为 0.92%, Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O 比值分布于 1.07~3.65, 平均为 2.27, 具有富钠低钾特征。TiO<sub>2</sub> 变化于 1.56%~2.01%, 平均 1.72%。CaO 含量变化于 8.59%~9.80%, 平均 9.31%。MgO 含量变化于 5.25%~

5.99%, 平均 5.72%。镁含量明显偏低, 而且 Mg# (Mg#=Mg/(Mg+Fe<sup>2+</sup>)) 介于 0.47~0.49, 平均 0.48, 低于原始岩浆镁值(0.68~0.75), 这说明岩浆为非原始岩浆, 可能发生了镁铁质矿物的分异作用。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量 12.98%~13.88%, 平均为 13.56%。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 MgO 之间正相关关系明显, 表明有斜长石分离结晶。FeO 含量变化于 9.58%~11.98%, 平均 11.09%, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量变化于 4.84%~8.65%, 平均为 7.36%。Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 SiO<sub>2</sub> 之间呈明显负相关, 说明岩石中铁随着基性程度增加而增加。

#### (2) 稀土及微量元素特征

稀土元素是具有相似地球化学行为的元素组, 在岩浆作用体系中矿物或矿物熔体之间的分配行

表 1 五道羊谷地区斜长角闪岩岩石地球化学分析结果  
Table 1 Element compositions of amphibolite in Wudaoyangcha area

样品编号	样品对象	SiO <sub>2</sub>	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	合计	Au	B	Sn
W4	岩体	41.98	11.71	8.59	2.01	13.88	9.54	5.93	1.00	1.97	0.17	0.03	0.20	0.75	97.93	0.001	22.5	1.00
W11	岩体	50.32	9.58	4.84	1.56	12.98	8.59	5.25	0.91	3.32	0.25	0.22	0.17	0.55	98.66	0.001	11.5	1.50
WCD1	岩体	42.06	11.98	8.65	1.60	13.82	9.80	5.99	0.86	2.18	0.16	0.04	0.09	0.60	97.94	0.001	27.4	2.50
W15	绿岩带	64.41	3.25	1.66	0.52	16.23	4.77	1.40	1.60	4.83	0.09	0.13	0.52	0.40	99.90	0.001	8.20	2.60
W19	绿岩带	61.31	4.86	1.15	0.58	16.94	3.30	2.24	2.76	4.93	0.08	0.16	0.49	0.93	99.99	0.001	6.80	1.80
W5	矿石	23.51	19.79	29.43	4.53	7.06	5.39	4.88	0.88	0.55	0.2	0.01	1.22	1.25	98.95	0.859	3.40	1.00
W9	矿石	28.71	17.96	23.24	3.22	10.85	4.84	4.98	1.4	1.18	0.17	0.02	0.35	0.95	97.91	0.625	47.1	2.00
W27	矿石	17.11	25.07	36.26	5.34	5.41	1.91	3.88	1.77	0.4	0.15	0.01	0.2	0.35	98.00	1.829	1.10	1.10
样品编号	样品对象	Ag	As	Sb	Hg	Li	Be	Co	Mo	W	Bi	Th	U	V	Zr	Hf	Ta	F
W4	岩体	0.08	1.01	0.15	0.05	27.77	0.53	80.4	12.9	19.3	0.31	0.85	0.34	350	10.5	2.80	0.30	363
W11	岩体	0.16	0.80	0.07	0.01	11.20	1.49	57.1	2.90	18.4	0.13	3.41	0.81	322	73.0	3.77	0.53	522
WCD1	岩体	0.14	1.50	0.29	0.01	30.69	0.43	87.7	0.77	15.8	0.65	0.87	0.60	480	6.55	61.2	2.01	308
W15	绿岩带	0.05	1.04	0.10	0.00	40.98	1.71	15.0	10.5	18.7	0.21	2.39	1.52	71.1	28.3	209	6.15	543
W19	绿岩带	0.09	1.06	0.19	0.01	60.81	1.79	21.3	0.56	26.0	0.35	11.8	2.64	99.1	16.2	67.1	2.39	720
W5	矿石	0.10	1.01	0.07	0.01	30.47	0.47	167	3.21	6.12	0.13	0.65	0.24	1040	5.69	93.7	2.77	393
W9	矿石	0.18	0.80	0.09	0.01	41.07	0.47	194	4.15	6.72	0.24	1.66	0.69	1330	8.89	89.1	2.83	334
W27	矿石	0.09	0.70	0.17	0.01	36.26	0.23	217	0.52	11.2	0.10	1.48	1.90	1560	7.52	42.9	1.32	197
样品编号	样品对象	Ba	Cl	Cu	Ga	Nb	Ni	Pb	Rb	Sc	Sr	Zn	La	Ce	Pr	Sm	Eu	Gd
W4	岩体	151	89.8	25.4	23.4	2.51	5.25	7.15	43.0	36.4	288	136	3.64	10.4	1.17	5.74	1.34	1.74
W11	岩体	132	93.0	104	19.6	7.45	40.1	8.12	31.7	44.0	148	114	15.0	34.1	4.30	19.5	4.48	5.92
WCD1	岩体	147	111	43.0	22.6	2.07	5.08	9.74	36.2	32.6	305	118	3.22	11.6	1.00	5.07	1.16	1.51
W15	绿岩带	202	70.4	12.6	22.1	7.53	20.9	10.9	123	9.24	368	78.5	16.9	33.2	4.03	15.9	3.04	2.79
W19	绿岩带	452	66.0	20.9	22.5	9.18	22.7	10.7	131	17.9	236	91.3	31.9	67.9	8.69	33.2	5.87	4.17
W5	矿石	136	89.9	41.5	35.7	1.52	4.92	2.92	51.5	30.6	55.1	201	2.52	8.9	0.78	3.85	0.97	1.34
W9	矿石	200	76.0	93.2	33.4	2.73	8.75	4.15	67.0	23.2	135	173	3.71	12.2	1.03	4.56	0.98	1.15
W27	矿石	155	134	78.5	46.1	2.90	6.27	3.31	111	24.4	19.7	245	1.68	11.2	0.53	2.79	0.58	0.82
样品编号	样品对象	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE	LREE	HREE	L/H	La <sub>N</sub> /Yb	δEu	δCe		
W4	岩体	0.24	1.34	0.27	0.84	0.12	0.68	0.10	9.59	28.3	22.9	5.31	4.30	3.81	1.19	1.23		
W11	岩体	0.85	5.03	0.99	2.85	0.43	2.79	0.42	25.8	98.1	78.8	19.3	4.09	3.86	0.88	1.03		
WCD1	岩体	0.20	1.16	0.24	0.67	0.10	0.63	0.09	6.94	27.1	22.5	4.60	4.90	3.66	1.14	1.58		
W15	绿岩带	0.41	2.11	0.39	1.10	0.16	0.99	0.15	13.2	82.0	73.9	8.10	9.13	12.2	0.90	0.96		
W19	绿岩带	0.69	3.23	0.58	1.60	0.22	1.23	0.18	13.7	161	148.7	11.9	12.5	18.6	0.63	0.98		
W5	矿石	0.18	0.97	0.20	0.96	0.08	0.48	0.07	8.5	21.6	17.3	4.29	4.04	3.74	0.81	1.54		
W9	矿石	0.16	0.93	0.19	0.75	0.09	0.55	0.09	7.8	26.7	22.8	3.92	5.81	4.84	0.90	1.5		
W27	矿石	0.10	0.67	0.17	0.63	0.07	0.41	0.06	4.66	19.8	16.9	2.93	5.75	2.95	0.40	2.89		

注:测试单位:国土资源部长春矿产资源监督检测中心。常量元素采用滴定管、天平、原子吸收分光光度计等测定,微量元素采用等离子体质谱仪等测定,稀土元素用ICP-MS测定。主量元素单位:%,微量元素及稀土元素单位:10<sup>-6</sup>,Au含量单位:10<sup>-9</sup>。

为主要受晶体场控制,具有普遍一致的独特地球化学特征,因此稀土元素常作为探讨与岩浆作用有关的成岩、成矿地质地球化学过程的示踪剂<sup>[10-13]</sup>。

由表1可见五道羊盆斑杂状斜长角闪岩体  $\Sigma\text{REE}$  值较低,  $\Sigma\text{REE}$  值与  $\text{SiO}_2$  含量具有正相关特征。 $\Sigma\text{REE}$  变化于  $19.8 \times 10^{-6} \sim 161 \times 10^{-6}$ 。8个样品中有6个斑杂状斜长角闪岩样品(含矿石样品)  $\Sigma\text{REE}$  低于  $30 \times 10^{-6}$ ,与正角闪岩4个类型中的超基性岩斜长角闪岩及正斜长角闪岩特征<sup>[14]</sup>一致。稀土元素具有类似的配分模式(图5),表现为轻稀土元素相对富集的右倾型,  $\text{LREE}/\text{HREE}=4.04 \sim 12.5$ ,  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  为  $2.95 \sim 12.2$ ,轻稀土元素分馏程度总体强于重稀土元素,发育中到弱的负铕及弱的正铈异常( $\delta\text{Eu}=0.40 \sim 1.19$ ),铈异常较弱( $\delta\text{Ce}=0.96 \sim 2.89$ )。稀土总体特征与鞍山群及阜平群斜长角闪岩的稀土特征基本一致<sup>[15]</sup>。

微量元素方面,斑杂状斜长角闪岩体中U元素含量  $0.34 \times 10^{-6} \sim 0.81 \times 10^{-6}$ ,明显低于绿岩带中斜长角闪岩U元素含量,Li、Rb、F、Ba、Pb等元素也具有相似特征。V元素含量  $322 \times 10^{-6} \sim 800 \times 10^{-6}$ ,明显高于绿岩带中斜长角闪岩V元素含量,Co、Cr、Cl、Cu、Sc、Zn等元素也具有相似特征。微量元素蛛网图中各类岩石曲线形态基本一致(图6),与稀土特征一样说明物质来源具统一性。图中K、Ti、P元素呈明

显亏损特征。

### (3)原岩及构造环境分析

角闪岩是中深变质地区常见的一种变质岩类,它具有不同的成因,既可以由镁铁质火成岩(玄武岩、辉绿岩、辉长岩等)变质生成(正角闪岩),也可由泥质页岩、钙质页岩或沉积凝灰岩等变质形成(副角闪岩)。由于中深变质岩系岩石的变质程度比较高(达角闪岩相),各种残余及变余结构一般很难保存,因而仅根据野外产状和岩相学研究来恢复原岩性质十分困难,往往需要借助于变质岩的岩石化学和微量元素特征来进行原岩性质恢复和成因判别。

在  $\text{SiO}_2-(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$  图解中<sup>[18]</sup>(图6-a),斑杂状斜长角闪岩样品点全部落入苦橄玄武岩区,表明岩石基性程度较高。表壳岩斜长角闪岩原岩较复杂,图中落入玄武岩区、粗面安山岩、英安岩区。在科马提岩分类<sup>[19]</sup>斑杂状斜长角闪岩样品主要投在高铁拉斑玄武岩区(图略)。 $\text{TiO}_2-\text{MnO}$  组分<sup>[20]</sup>显示斑杂状斜长角闪岩为正玄武岩区(图6-b)。

由于五道羊盆铁矿区火山岩经受较为强烈的蚀变,其可迁移元素(如Na、K、Ca、Mg、Fe)大多数发生迁移,因而不能代表其原始组成,本文主要利用非迁移元素对其构造环境进行进一步判别。在众多构造环境判别图解中,使用玄武岩中少量氧化

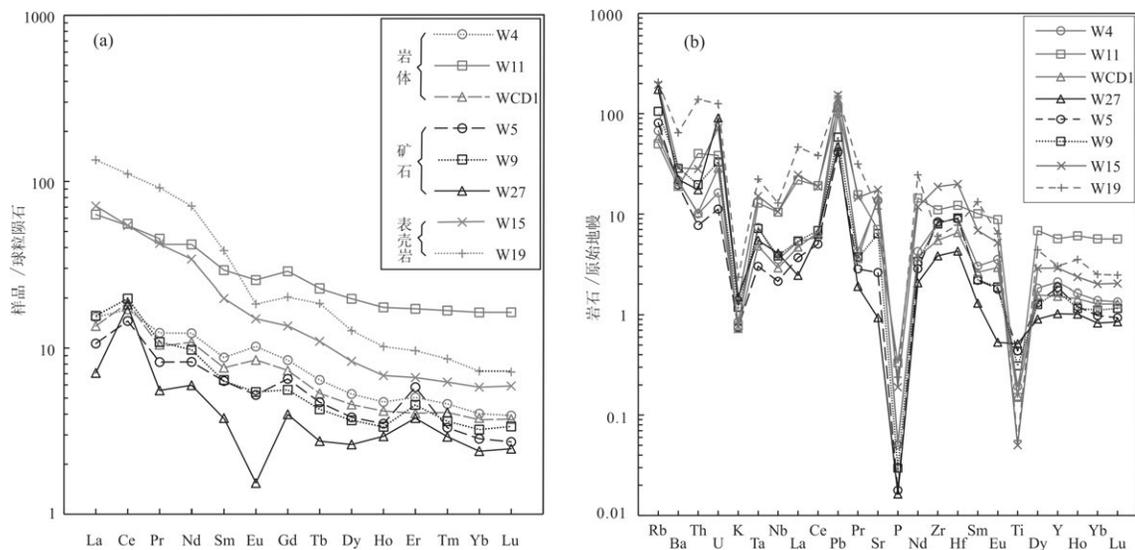


图5 斜长角闪岩稀土及微量元素配分模式图

a—球粒陨石标准化值据文献[16];b—原始地幔标准化值据文献[17]

Fig.5 Chondrite-normalized REE patterns and spider diagrams of trace elements for amphibolites (normalized values after references [16], [17])

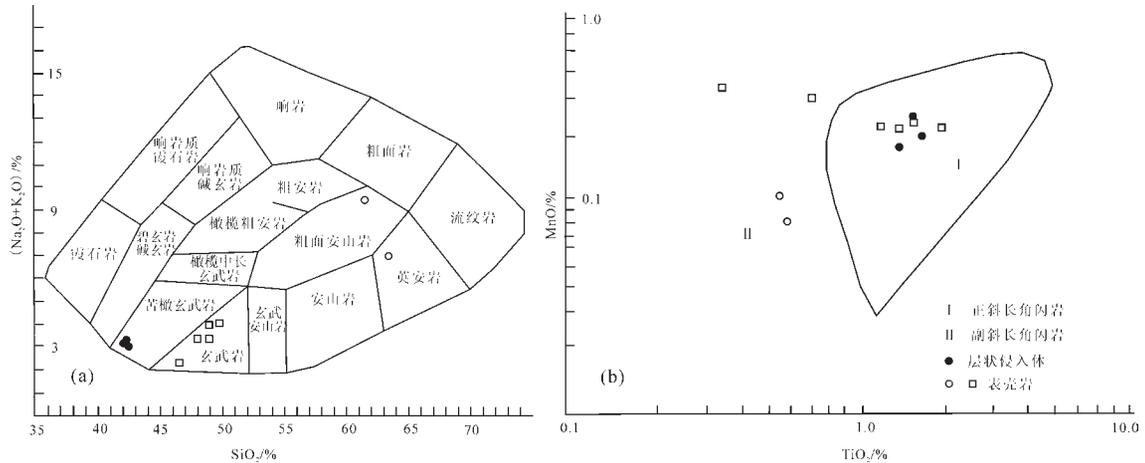


图6 斜长角闪岩原岩分析图解  
 a—SiO<sub>2</sub>-(K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O)图解(底图转引自文献[18]);b—TiO<sub>2</sub>-MnO 图解(据[20], “□表壳岩”点数据引自资料①)  
 Fig. 6 Original rock restoration of amphibolites  
 a—Diagram of SiO<sub>2</sub>-(K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O) (after [18]); b—TiO<sub>2</sub>-MnO plot (after [20]; Data “□” after ①)

物(TiO<sub>2</sub>, MnO, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)的成分作端元组分来判别其构造环境效果较好<sup>[21]</sup>。将上述样品按其成分投影于图中(图7-a),可以看出,本区斑杂状斜长角闪岩全部落入IAT(岛弧拉斑玄武岩)区。而绿岩带中斜长角闪岩构造环境比较复杂,样品分布于钙碱性玄武岩

区、岛弧拉斑玄武岩区、洋中脊玄武岩区等范围内,暗示斑杂状斜长角闪岩侵入体与其他斜长角闪岩不是同一种成因或同期产物。

微量元素方面 Th/Zr-Nb/Zr 图解和 Hf/3-Th-Ta 图解对玄武质岩石大地构造判别具有较好的效

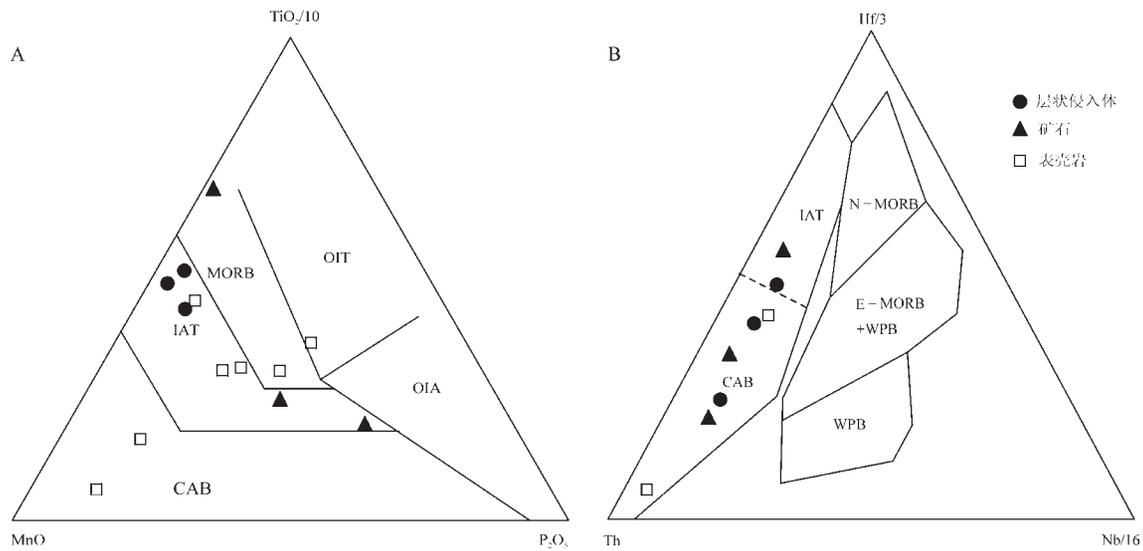


图7 斜长角闪岩构造环境判别图  
 A—TiO<sub>2</sub>/10-MnO-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>图解(据文献[21]);B—Hf/3-Th-Ta图解(据文献[23])  
 OIT—大洋岛屿拉斑玄武岩; OIA—大洋岛屿碱性玄武岩; MORB—洋中脊玄武岩; IAT—岛弧拉斑玄武岩;  
 CAB—钙碱性玄武岩; WPB—板内玄武岩

Fig.7 Tectonic setting discriminant diagram of Wudaoyangcha basic igneous rocks  
 A—Diagram of TiO<sub>2</sub>/10-MnO-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (after [21]); B—Diagram of Hf/3-Th-Ta (after [23])  
 OIT—Oceanic island tholeiite; OIA—Oceanic island alkaline; MORB—Mid-ocean ridge basalt; IAT—Island arc tholeiite;  
 CAB—Calc-alkaline basalt; WPB—Intraplate basalt

①李景光, 吕宗凯, 于志鹏, 等. 吉林省白山市五道羊岔铁矿勘探报告[R]. 2012.

果<sup>[22,23]</sup>。表1五道羊盆斜长角闪岩层状侵入体Th/Zr为0.009~0.028, Nb/ZrO为0.028~0.060, 在Th/Zr-Nb/Zr图属于板块汇聚边缘玄武岩区。Hf/3-Th-Ta图解则落入岛弧玄武岩区(图7-b), 这些都说明斜长角闪岩层状侵入体形成于板块汇聚边缘岛弧构造环境。同时上述各图解中矿石数据投影与斜长角闪岩体层状侵入体一致, 暗示岩体与矿体形成环境一致。

## 2.2 矿体特征

### 2.2.1 矿体分布及产状

从图3可以看出, 五道羊盆铁矿钒钛磁铁矿I、II、VI号矿体(组)这3个矿体(组)实为同一矿体(组)的不同部位。这些矿体赋存于斑杂状斜长角闪岩体中部, 形态为层状, 位置稳定, 平行迭置产出。VI-6规模最大, 矿体厚度1.01~50.1 m, 平均厚度6.98 m, 背斜转折端矿体明显增厚。

### 2.2.2 矿石成分

矿石化学成分见表1。从表中可以看出, 矿石SiO<sub>2</sub>含量变化于17.11%~28.71%, 平均23.11%, FeO含量变化于17.96%~25.07%, 平均20.94%。Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量变化于23.24%~36.26%, 平均29.64%。TiO<sub>2</sub>变化于3.22%~5.34%, 平均4.36%。Au、Co、V、Cu含量明显较其他类型岩石, Co、V达到工业品位要求。

另外从表1及图7可以看出, 矿石中稀土、微量元素特征与斑杂状斜长角闪岩体基本一致, 反映它们均形成于相同的构造环境。但是稀土总量明显偏低, 并出现较明显的负钕异常和正铈异常, 而岩体中无矿斜长角闪岩稀土则是较弱的正钕异常。一般认为稀土元素具明显钕负异常、而铈无明显异常表明成矿物理化学条件为氧化环境<sup>[24,25]</sup>, 暗示成矿过程中由氧化向还原环境的转换。

根据光片鉴定, 五道羊盆钒钛磁铁矿矿石中金属矿物以磁铁矿、钛铁矿为主, 含磁黄铁矿、黄铁矿、黄铜矿等(图8-C~F)。非金属矿物以斜长石、角闪石为主, 其次有少量石榴石、绿泥石、黑云母等。

磁铁矿: 为主要的含铁矿物, 亦是V、Co、Ni等的主要载体。本区磁铁矿有2种形态, 一种他形粒状晶体, 粒度一般在0.3~2.0 mm, 反射色为灰色, 高等硬度, 部分晶体的边缘被黄铁矿和磁黄铁矿交代, 有的晶体与钛铁矿分布在一起, 具共结边。晶体呈浸染状分布在脉石矿物的接触空隙里, 含量大

约占岩石总体13%。另一种呈细小的叶片状在钛铁矿中均匀分布, 为固溶体分离的产物(图8-F)。

钛铁矿: 为主要的含钛矿物。他形粒状或不规则板状晶体, 粒度一般在1.0~2.5 mm, 反射色为灰色略显棕色, 高等硬度, 弱非均质性, 晶体中见有大量叶片状的磁铁矿均匀分布, 部分晶体的边缘被黄铁矿和磁黄铁矿交代, 晶体与磁铁矿具共结边(图8-D、E)。含量大约占岩石总体的15%。

黄铁矿: 半自形粒状晶体, 粒度一般在0.3~1.0 mm, 反射色为亮黄色, 高等硬度, 晶体均分布在磁铁矿或钛铁矿的边缘或其接触空隙里, 部分晶体的边缘被磁黄铁矿交代, 含量大约占岩石总体的2%。

磁黄铁矿: 他形粒状晶体, 粒度一般在0.3~1.2 mm, 反射色为乳黄色, 中等硬度, 强非均质性, 部分晶体分布在磁铁矿或钛铁矿的晶隙里, 个别晶体交代黄铁矿, 含量大约占岩石总体的4%。

黄铜矿: 他形粒状晶体, 粒度极细小, 大约在0.1 mm, 反射色为铜黄色, 中等硬度, 仅见几个小颗粒沿边缘交代磁黄铁矿, 含量小于0.01%。

金属矿物生成顺序为: 磁铁矿、钛铁矿→黄铁矿→磁黄铁矿→黄铜矿→磁铁矿。

### 2.2.3 矿石组构特征

#### (1) 矿石构造

五道羊盆钒钛磁铁矿矿石构造主要以致密块状、条带状构造为主, 稠密浸染状构造、稀疏浸染状构造、星点状构造次之。

块状构造的钒、钛磁铁矿矿石中, 磁铁矿和粒状钛铁矿呈自形或半自形晶及其集合体产出, 脉石矿物含量极少, 且均为他形晶充填于铁钛氧化物晶粒间。这类构造在VI矿体(组)中常见(图8-A)。

条带状构造各矿体(组)中均有所见, 是由暗色致密块状与稀疏浸染状矿石或斜长角闪岩呈互层出现, 总体呈明暗相间的条带。当浅色条带中脉石矿物晶体具定向排列时就形成流层状构造(图4-B, 8-B)。

稠密(或稀疏)浸染状构造矿石的主要成分仍是铁、钛氧化物, 其中的磁铁矿和钛铁矿呈集合体产出, 通常以半自形晶结构为主, 而脉石矿物主要是以他形晶充填于铁、钛氧化物晶粒间。当磁铁矿及钛铁矿以他形晶分布于自形或半自形的脉石矿物晶粒间时, 形成海绵陨铁结构(图4-D)。

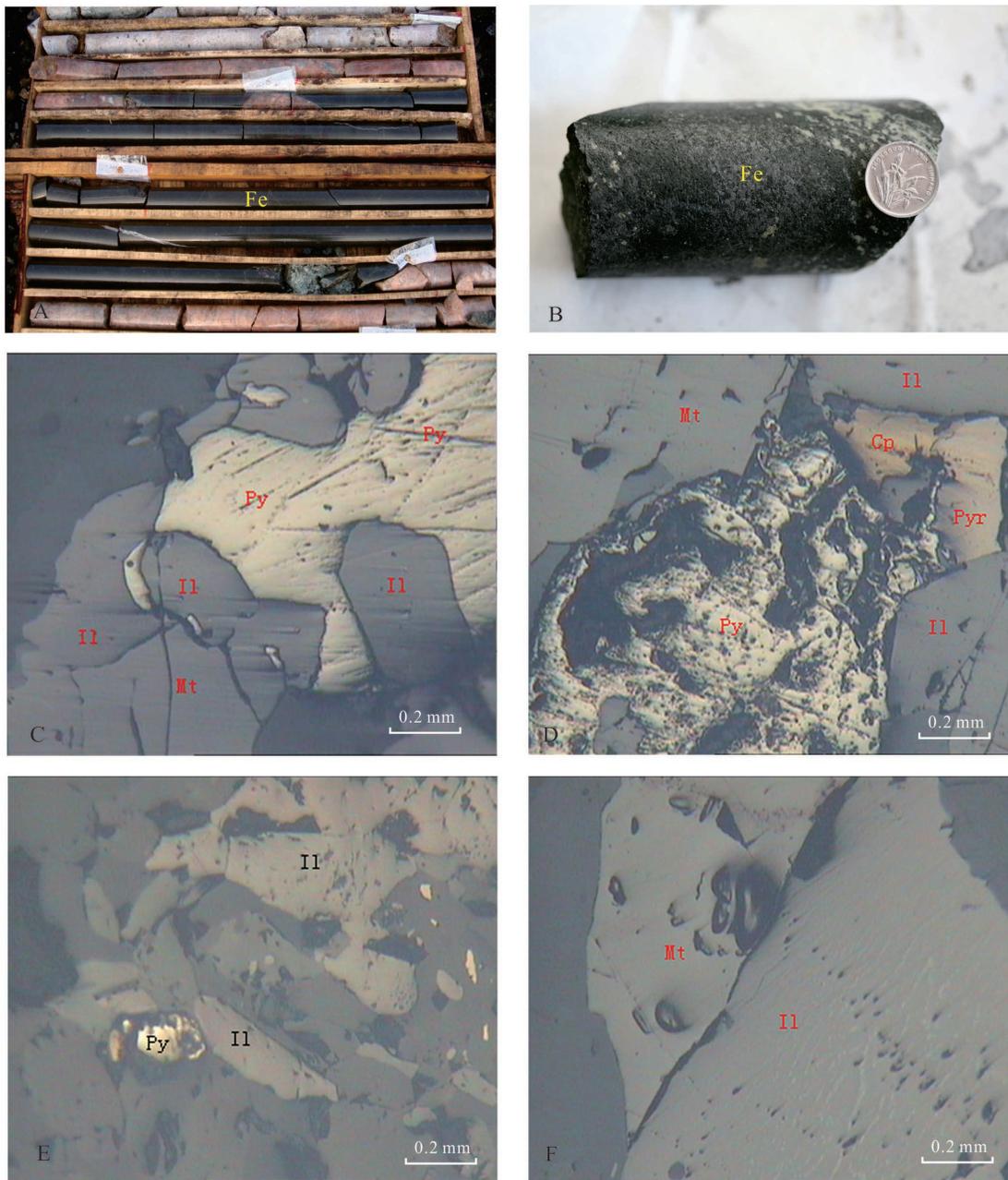


图8 钒钛磁铁矿矿石及显微照片

A—岩心照片,块状构造;B—岩心照片,条带状构造;C—样品5B-4光片照片,取自ZK1601,单偏光,他形晶结构、固溶体分离结构、共结结构;D—样品5B-2光片照片,取自ZK1601,单偏光,它形晶结构、交代结构;E—样品5B-5光片照片,取自ZK1601,单偏光,他形晶结构、交代结构;F—样品5B-3光片照片,取自ZK1601,单偏光,他形晶结构、固溶体分离结构、共结结构  
(Mt—磁铁矿;Il—钛铁矿;Py—黄铁矿;Pyr—磁黄铁矿;Cp—黄铜矿)

Fig.8 Photopgrphs and microphotograph of vanadic titanomagnetite ore

A—Photograph of ore core, massive structure; B—Photograph of ore core, banded structure; C—Microphotograph of sample-5B-4 collected from ZK1601, plainlight, xenomorphic granular texture, exsolution texture, eutectic texture; D—Microphotograph of sample-5B-2 collected from ZK1601, plainlight, xenomorphic granular texture, replacement texture; E—Microphotograph of sample-5B-5 collected from ZK1601, plainlight, xenomorphic granular texture, replacement texture; F—Microphotograph of sample-5B-5 collected from ZK1601, plainlight, xenomorphic granular texture, exsolution texture, eutectic texture  
(Mt—Magnetite; Il—Ilmenite; Py—Pyrite; Pyr—Pyrrhotite; Cp—Chalcopyrite)

星点状构造中磁铁矿他形粒状晶体,粒度极微小,小于0.05 mm,晶体呈星点状分布在脉石矿物中(图8-C、8-F)。

## (2) 矿石结构

根据光片研究,五道羊岔VI号矿组矿石结构矿石的结构主要有自形、半自形和他形晶结构、海绵陨铁结构、固溶体分离结构、包含结构、粒状镶嵌结构、嵌晶结构、共边结构、结状结构、反应边结构、交代结构和压碎结构等(图8-C~8-F)。

**自形-半自形结构:**自形-半自形磁铁矿和钛铁矿晶粒紧密镶嵌,磁铁矿单颗粒(0.05~3.5 mm),钛铁矿单颗粒(0.1~2 mm),占颗粒数的90%以上,且粒度均匀。矿物间的接触界线整齐平滑,磁铁矿和钛铁矿集合体间隙为脉石矿物充填。此类矿石结构是构成致密块状矿石和稠密浸染状矿石的主体结构。

**半自形-他形结构:**磁铁矿、钛铁矿呈半自形,部分呈他形晶粒状紧密镶嵌,整体构成粒状集合体,粒径稍小于自形晶的磁铁矿和钛铁矿粒径。该类型是浸染状矿石、流层状和条带状矿石的主体结构。

**他形晶结构:**这类矿石中铁钛氧化物含量较硅酸盐矿物含量要少,脉石矿物结晶程度高,常呈自形或半自形晶紧密镶嵌。含量相对较少的铁、钛氧化物则为他形集合体沿脉石矿物晶粒间隙呈稀疏浸染状或星散浸染状分布,有的呈他形细粒晶包含于脉石矿物晶粒中,铁钛氧化物分布不连续。与自形晶结构不同,这一结构特征表明在这类矿石中,铁钛氧化物又晚于脉石矿物结晶。这类矿石结构是稀疏浸染状、星散浸染状矿石及岩浆期后形成的硫化物矿石的主体结构。

**海绵陨铁结构:**这种结构的矿石并不多见,其特征为硅铝酸盐脉石矿物含量多于铁钛氧化物含量,且自形程度高,呈自形晶均匀分布,铁钛氧化物含量相对较少,以他形晶粒状集合体充填于脉石矿物晶粒四周间隙,呈不规则状胶结脉石矿物。此类结构说明铁钛氧化物晚于脉石矿物结晶<sup>[26]</sup>。

**固溶体分离结构:**属钛铁矿特有,在自形、半自形的钛铁矿晶粒中,固溶体分离的磁铁矿沿钛铁矿解理裂隙分布。

**交代结构:**该结构比较发育,主要是黄铁矿、磁

黄铁矿交代钛铁矿、磁铁矿形成。

## 2.3 主要矿物电子探针分析

### 2.3.1 样品及测试方法

为进一步确定矿床类型及成因,工作中开展了矿物电子探针微区成分分析,分析对象为与矿床成因关系密切的斜长石、角闪石、黄铁矿、磁铁矿、钛铁矿等。本文仅论述主要金属矿物磁铁矿、钛铁矿分析结果。

电子探针微区成分分析样品为矿石(含磁铁斜长角闪岩),全部采于VI矿体。每个样品在不同部位切磨2件探针薄片。样品在中国地质科学院地质研究所国土资源部大陆动力学重点实验室电子探针中心进行分析。

### 2.3.2 电子探针分析结果

#### (1) 磁铁矿

磁铁矿电子探针微区成分分析结果见表2。从表中可以看出,五道羊岔钒钛磁铁矿矿石中磁铁矿各样品测点成份平均值FeO 91.817%~92.722%、SiO<sub>2</sub> 0.019%~0.036%、Na<sub>2</sub>O 0.002%~0.020%、TiO<sub>2</sub> 0.035%~0.108%、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.071%~0.372%、MgO 0.010%~0.059%、MnO 0.012%~0.026%、CaO 0~0.001%,可以看出除FeO外其他元素含量甚微。另外从表1中矿石成分来看,本矿床矿石中富集V、Co,磁铁矿未分析成分中应包含这两种成分。

本矿区磁铁矿中TiO<sub>2</sub>含量非常低(0.035%~0.108%),与河南舞阳赵案庄型铁矿磁铁矿TiO<sub>2</sub>特征一致,符合一般超基性岩中钛磁铁矿多为贫钛的规律<sup>[27]</sup>。按林师整划分<sup>[28]</sup>大部分为普通磁铁矿,少量为低钛磁铁矿。前人研究证明,TiO<sub>2</sub>在磁铁矿中普遍存在,且变化范围较大,其含量与形成的温度、压力密切相关,能有效地反映磁铁矿的形成条件。在成岩作用或成矿作用过程中,随着温度和压力的降低,磁铁矿都是从高TiO<sub>2</sub>到低TiO<sub>2</sub>方向演化。本矿区磁铁矿较低的TiO<sub>2</sub>含量,可能反映岩浆作用晚期的低温特征。另外综合分析本区磁铁矿组分特征,结合矿物共生组合,可以确定磁铁矿为岩浆成因,这与舞阳赵案庄型铁矿磁铁矿的组分特征及成因特征<sup>[29]</sup>一致。

利用磁铁矿成分可以分析判别磁铁矿的成因类型<sup>[28-31]</sup>。虽然电子探针分析对磁铁矿精度有限,除Fe之外的元素均为微量元素,分析结果仅可以作

表2 五道羊岔钒钛磁铁矿床磁铁矿、钛铁矿电子探针分析结果(%)

Table 2 Electron microprobe analyses of magnetite and ilmenite from the Wudaoyangcha vanadic titanomagnetite deposit (%)

矿物	样号(点数)	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	CaO	FeO	TiO <sub>2</sub>	NiO	总和
磁铁矿	W2(13)	0.023	0.009	0.017	0.001	0.015	0.128	0.014	0	92.498	0.077		92.784
	W5(13)	0.036	0.013	0.032	0.003	0.011	0.071	0.015	0.001	92.485	0.035		92.701
	W9(14)	0.030	0.018	0.038	0.001	0.010	0.125	0.012	0	92.722	0.092		93.052
	W23(12)	0.019	0.010	0.039	0.001	0.059	0.372	0.026	0	91.817	0.077		92.422
	W31(11)	0.032	0.020	0.045	0.002	0.052	0.309	0.019	0	92.293	0.049		92.820
	W37(13)	0.025	0.011	0.026	0.007	0.024	0.121	0.025	0	92.275	0.088		92.604
	W41(9)	0.032	0.002	0.037	0.002	0.017	0.206	0.014	0	92.483	0.052		92.845
钛铁矿	W42(17)	0.030	0.015	0.038	0.003	0.020	0.185	0.016	0	92.648	0.108		93.065
	W5(9)	0.054	0.018	0.025	0.005	0.035	0.008	1.300	0.002	47.878	49.862	0	99.186
	W9(9)	0.029	0.013	0.023	0.004	0.046	0.005	1.519	0.004	48.936	49.159	0.003	99.741
	W23(6)	0.035	0.010	0.023	0.008	0.418	0.023	1.043	0	49.919	48.621	0.004	100.103
	W31(7)	0.129	0.006	0.032	0.004	0.133	0.040	0.806	0.068	50.666	47.987	0.011	99.882

注:由于篇幅影响未列出原始数据,表中数据为各样品测点数据之平均值,FeO为全铁,总和为表中氧化物含量之和, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, SO<sub>3</sub>等其他氧化物未计入。测试单位:中国地质科学院地质研究所国土资源部大陆动力学重点实验室电子探针中心;使用仪器:电子探针显微分析仪(EPMA)(日本电子JEOL公司, JXA-8100)、能谱仪(EDS)(英国OXFORD公司, Inca);测试者:戎合。

为参考<sup>[32]</sup>,但本矿区磁铁矿成分反映的矿床分类特征已经很明显(图9),五道阳岔钒钛磁铁矿体中磁铁矿成因类型基本未出现副矿物(超基性-基性-中性-酸性岩浆岩)型、火山岩型(玢岩型)、热液型和矽卡岩型,各点成分均分布于岩浆熔离钛磁铁矿型区及附近。

### (2) 钛铁矿

钛铁矿电子探针分析结果见表2。钛铁矿化学式为FeTiO<sub>3</sub>,其TiO<sub>2</sub>的理论含量为52.66%,FeO的理论含量为47.34%,表2中钛铁矿各样品测点成分平均值TiO<sub>2</sub> 47.987%~49.862%、FeO 47.878%~50.666%、MnO 0.806%~1.519%、MgO 0.046%~0.418%,样品成分与钛铁矿的理论化学成分基本一致,可以确定为钛铁矿。

## 3 锆石矿物特征及U-Th-Pb同位素测定

### 3.1 样品采集及分析方法

为确定五道羊岔斜长角闪岩体形成时代,作者在采矿坑道中采集了30 kg斑杂状斜长角闪岩,在河北省区调队实验室分离出了锆石,挑选包裹体少、无明显裂隙且晶形完好的锆石进行LA-ICP-MS同位素测定。

锆石CL图像及测试由西北大学柳小明博士协

助完成。锆石U-Pb年龄分析用西北大学地质学系大陆动力学国家重点实验室Agilent 7500a型ICP-MS仪器与193 nm的ArF准分子激光器完成。分

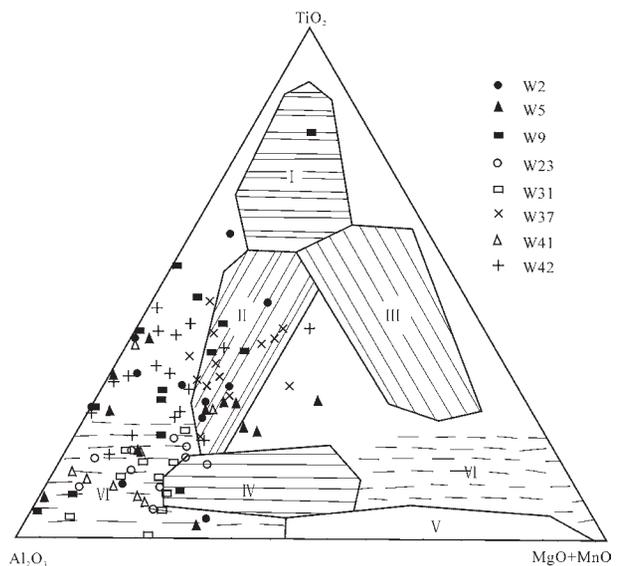


图9 五道羊岔铁矿磁铁矿TiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-(MgO+MnO)成因分类图解(据文献[28])

I—副矿物型; II—岩浆熔离钛磁铁矿型; III—火山岩型(玢岩型); IV—热液型; V—矽卡岩型; VI—沉积变质型

Fig.9 TiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-(MgO+MnO) magnetite genetic classification diagram (after Reference [28])

I—Accessory mineral type; II—Magma liquation titanomagnetite type; III—Volcanic type (porphyrite type); IV—Hydrothermal type; V—Skarn type; VI—Metamorphosed sedimentary type

析时采用He作为剥蚀物质的载气,用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质NIST 610进行仪器最佳化,用标准锆石91500进行U含量和同位素分馏校正。激光束斑直径为20 μm,普通铅校正采用Anderson<sup>[33]</sup>的方法。详细的测试过程参见文献<sup>[34,35]</sup>。

锆石多为不规则状。粒度较小,为30~100 μm。大部分具有明显的核-边结构及振荡环带,个别锆石边部出现明显的亮边,应该是后期构造热事件或变质流体作用所致,这与斜长角闪岩的原岩经历了区域变质作用的地质事实相吻合。

### 3.2 锆石成分

近年来,随着分析技术的提高,锆石化学成分特别是微量元素特征用于锆石成因的分析取得很大进展,国内外已经发表较多成果<sup>[36]</sup>。为进一步确定五道羊盆斜长角闪岩体中锆石成因,本文对所选定的锆石进行了微量元素测定,结果见表3。

#### 3.2.1 微量元素特征

Th/U 比值:大量研究表明,不同成因锆石具有不同的Th、U含量及Th/U比值。岩浆锆石的Th、U含量较高,Th/U比值较大(一般>0.4),变质锆石的Th、U含量低,Th/U比值小(一般<0.1)<sup>[37-39]</sup>。从表3可以看出,本区斜长角闪岩体Th含量甚高,为 $10.6 \times 10^{-6} \sim 716.45 \times 10^{-6}$ ,平均 $247.63 \times 10^{-6}$ ,U含量为 $74.24 \times 10^{-6} \sim 1953.04 \times 10^{-6}$ ,平均 $823.19 \times 10^{-6}$ ,Th/U比值0.04~0.60,平均0.29(图10),具有岩浆锆石特点。

Nb、Ta及Nb/Ta比值:Nb、Ta含量及Nb/Ta比值也是区分岩浆锆石与变质锆石的很好指标,一般变质锆石的Nb、Ta含量及Nb/Ta比值均低于岩浆锆石。大别山黄镇榴辉岩岩浆锆石Nb、Ta含量及Nb/Ta比值分别为 $(3.8 \sim 19.7) \times 10^{-6}$ , $(2.7 \sim 12.7) \times 10^{-6}$ 和1.0~4.6,而变质锆石Nb、Ta含量及Nb/Ta比值分别为 $(0.5 \sim 1.4) \times 10^{-6}$ , $(0.7 \sim 1.5) \times 10^{-6}$ 和0.3~1.3<sup>[40]</sup>。本区斜长角闪岩体锆石Nb、Ta及Nb/Ta比值分别为 $(0.19 \times 10^{-6} \sim 165.48 \times 10^{-6})$ ,平均 $30.43 \times 10^{-6}$ , $(0.02 \times 10^{-6} \sim 6.93 \times 10^{-6})$ ,平均 $0.43 \times 10^{-6}$ 和(1.0~4.6,平均4.39),符合岩浆锆石特点。

#### 3.2.2 稀土元素特征

稀土元素丰度,尤其是HREE富集程度是区分岩浆锆石、变质重结晶锆石和变质增生锆石的重要指标。岩浆锆石含有较高的REE含量和具有陡立

的HREE富集模型。对于变质重结晶锆石,其轻稀土元素较重稀土元素有较大的离子半径而更容易在变质重结晶过程中从锆石晶格中排除出来<sup>[41]</sup>,从而可以导致变质重结晶锆石比岩浆锆石具有更陡直的重稀土富集模型。本区锆石稀土总量( $\Sigma$ REE)为 $95.6 \times 10^{-6} \sim 1838 \times 10^{-6}$ ,平均 $433 \times 10^{-6}$ ,轻稀土总量(LREE)为 $1.53 \times 10^{-6} \sim 456 \times 10^{-6}$ ,平均 $86.2 \times 10^{-6}$ ,重稀土总量(HREE)为 $93.6 \times 10^{-6} \sim 1382 \times 10^{-6}$ ,平均 $347 \times 10^{-6}$ ,LREE/HREE比值0.01~0.59,平均0.2。稀土分布见图11,与咸水泉岩体和Boggy Plain岩体<sup>[34-35]</sup>相比,岩浆特征明显。

### 3.3 U-Th-Pb同位素测定结果

五道羊盆斜长角闪岩体中锆石测试结果见表4、图12。

可以看出 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 3组表面年龄数据差别大,非常不谐和。采用ISOPLOT 3.0程序进行谐和年龄计算,有1个点位于谐和线上, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为2544 Ma,其余所有点均位于谐和线外,但构成一条较好的不一致线,上交点年龄为 $(2526 \pm 35)$  Ma,笔者认为该年龄为岩体结晶年龄,下交点年龄为 $(401 \pm 78)$  Ma,可能为后期一次热事件扰动或无地质意义。

## 4 讨论

### 4.1 成矿构造背景

五道羊盆铁矿位于华北陆块区北缘东段,大地构造环境为华北陆块区陈台沟-沂水古陆核<sup>[4]</sup>边部,

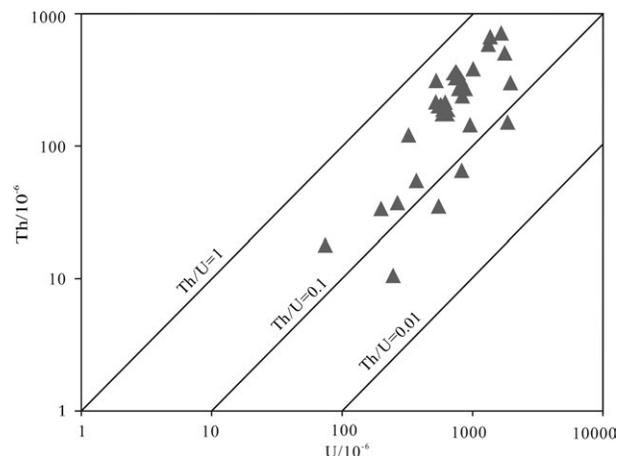


图10 锆石Th-U关系图

Fig.10 Th-U concentrations of zircons

表3 五道羊岔斑杂状斜长角闪岩体锆石微量元素组成( $10^{-6}$ )  
Table 3 Trace Element compositions of zircons from Wudaoyangcha taxitic  
plagioclase amphibolite rock mass ( $10^{-6}$ )

点号	P	Ti	Y	Nb	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy
WCD-1-01	84.0	4.91	107	0.07	0.59	3.59	0.34	2.85	1.12	0.66	2.21	0.63	7.45
WCD-1-02	114	91.4	455	0.56	0.93	12.7	1.32	12.0	7.42	1.68	14.3	3.17	28.7
WCD-1-03	124	626	813	1.27	6.57	32.3	4.09	32.5	10.6	6.26	17.3	3.43	36.9
WCD-1-04	64.5	146	93.2	0.17	0.32	2.79	0.22	1.69	0.67	0.65	2.13	0.50	5.78
WCD-1-05	94.1	3.31	81.9	0.08	<0.03	1.18	<0.02	0.27	0.14	0.32	0.87	0.34	5.05
WCD-1-06	62.4	109	1440	0.25	12.02	72.0	10.2	92.9	23.3	6.01	47.7	8.34	77.9
WCD-1-07	67.1	6.88	150	0.10	0.40	5.18	0.64	6.73	2.53	0.66	4.20	0.74	7.91
WCD-1-08	89.5	15.7	338	0.28	1.76	19.4	2.13	15.0	4.34	1.92	5.45	1.22	14.2
WCD-1-09	771	2.67	1798	2.92	3.94	23.3	1.56	9.05	7.32	0.73	30.7	11.5	143
WCD-1-10	29.6	261	232	0.10	0.66	6.28	0.79	7.32	4.24	1.77	6.76	1.38	12.2
WCD-1-11	107	39.2	191	0.11	0.18	3.83	0.28	2.34	1.56	0.99	3.4	0.91	10.7
WCD-1-12	108	82.8	231	0.12	0.49	6.57	0.62	5.61	1.99	1.00	3.92	1.05	12.6
WCD-1-13	68.2	25.2	864	1.19	3.28	34.3	3.98	31.7	13.8	9.08	24.2	5.04	49.2
WCD-1-14	47.5	251	442	0.44	0.29	4.71	0.32	2.93	1.08	0.45	3.83	1.55	24.0
WCD-1-15	38.5	40.0	878	0.47	5.15	27.5	3.49	314	18.5	3.80	41.4	8.7	76.2
WCD-1-17	83.3	898	1079	1.04	13.5	92.6	11.8	90.3	32.1	119	47.2	7.9	64.1
WCD-1-18	64.2	110.8	3382	0.47	26.8	156	21.9	166	72.4	13.1	116	23.6	210
WCD-1-19	78.1	192	580	0.49	2.96	25.4	3.03	25.0	12.9	3.52	21.4	4.43	36.2
WCD-1-20	48.9	16.1	515	0.08	0.44	7.29	0.61	5.37	1.70	0.96	5.62	1.96	28.1
WCD-1-21	75.2	88.4	1668	1.20	32.3	145	18.2	126	44.1	10.7	69.9	12.6	106
WCD-1-23	88.1	9.31	239	0.10	1.73	10.3	1.11	6.73	2.21	7.60	4.65	1.17	14.3
WCD-1-24	29.4	0.75	175	0.06	<0.03	0.99	<0.02	<0.20	0.16	0.13	1.33	0.55	9.48
WCD-1-25	74.2	37.8	965	2.05	5.49	40.7	5.38	41.9	18.4	6.53	30.5	5.65	48.7
WCD-1-26	76.8	5.75	168	0.14	0.12	2.18	0.14	1.27	0.68	0.64	2.86	0.69	9.03
WCD-1-27	53.5	8.62	414	0.19	2.57	15.3	1.97	20.5	12.3	2.08	26.5	4.38	35.7
WCD-1-28	63.3	2.95	98.0	0.10	<0.03	1.12	0.02	0.19	0.37	0.20	1.53	0.58	7.41
WCD-1-29	40.9	18.0	333	0.12	0.26	2.93	0.21	2.77	4.13	1.35	10.6	2.48	24.7
WCD-1-30	91.0	36.1	2049	0.46	18.3	95.4	13.5	113	46.5	19.7	92.7	13.7	109
点号	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	$\Sigma$ REE	LREE	HREE	LREE/HREE	$La_N/Yb_N$	$\delta Eu$
WCD-1-01	3.27	18.5	4.88	62.2	15.6	4715	0.03	124	9.15	115	0.08	0.01	1.25
WCD-1-02	10.1	43.1	9.54	106	23.1	5142	0.11	274	36.0	238	0.15	0.01	0.49
WCD-1-03	15.8	70.4	13.8	150	32.3	3993	0.16	432	92.3	339	0.27	0.03	1.41
WCD-1-04	2.43	14.1	3.97	56.0	15.2	4070	0.04	106	6.34	100	0.06	0.00	1.52
WCD-1-05	2.58	15.9	4.83	66.9	17.0	4995	0.02	115	1.96	113	0.02	0.00	2.12
WCD-1-06	25.7	96.2	19.2	182.4	39.5	4564	0.04	713	216	497	0.44	0.05	0.54
WCD-1-07	3.45	17.7	4.52	55.5	13.8	4219	0.03	124	16.1	108	0.15	0.01	0.61
WCD-1-08	5.63	23.2	4.23	43.0	9.38	3648	0.08	151	44.5	106	0.42	0.03	1.21
WCD-1-09	56.7	264	57.2	556	103	1155	1.58	1268	45.9	1222	0.04	0.01	0.13
WCD-1-10	4.94	23.1	4.81	60.7	15.6	4641	0.03	151	21.1	129	0.16	0.01	1.01
WCD-1-11	4.54	21.2	4.77	52.9	12.7	4735	0.04	120	9.17	111	0.08	0.00	1.28
WCD-1-12	5.64	28.3	6.87	80.5	19.1	5382	0.04	174	16.3	158	0.10	0.00	1.07
WCD-1-13	16.0	58.5	10.4	104	25.5	6103	1.03	389	96.2	293	0.33	0.02	1.50
WCD-1-14	12.1	70.1	18.4	226	59.9	5710	0.37	426	9.78	416	0.02	0.00	0.60
WCD-1-15	23.3	82.5	15.2	166	41.3	6671	0.36	544	89.7	455	0.20	0.02	0.41
WCD-1-17	20.3	78.2	15.5	159	34.7	4520	0.08	679	252	427	0.59	0.06	0.93
WCD-1-18	72.3	308	55.3	493	104	6615	0.07	1838	456	1382	0.33	0.04	0.44
WCD-1-19	12.1	49.0	9.79	103	24.4	4729	0.06	333	72.7	261	0.28	0.02	0.64
WCD-1-20	14.0	82.1	22.3	283	76.7	5508	0.02	531	16.4	514	0.03	0.00	0.86
WCD-1-21	33.3	132	23.4	228	48.0	3312	0.09	1029	376	653	0.58	0.10	0.59
WCD-1-23	6.06	29.2	7.41	87.8	20.2	5834	0.03	201	29.7	171	0.17	0.01	7.07
WCD-1-24	5.00	29.6	8.50	107	28.6	6003	0.02	192	1.53	190	0.01	0.00	0.61
WCD-1-25	16.7	65.0	12.5	131	28.9	8863	6.93	457	118	338	0.35	0.03	0.84
WCD-1-26	3.9	23.1	6.17	76.0	18.6	4878	0.02	145	5.03	140	0.04	0.00	1.20
WCD-1-27	10.69	43.9	10.1	127	33.1	6867	0.58	347	55.7	292	0.19	0.01	0.34
WCD-1-28	3.11	16.1	4.07	48.7	12.2	5085	0.03	95.6	1.93	93.6	0.02	0.00	0.69
WCD-1-29	9.14	43.5	10.1	112	26.6	6988	0.05	250	11.6	238	0.05	0.00	0.59
WCD-1-30	34.9	128	21.2	178	33.4	3490	0.07	916	306	610	0.50	0.07	0.90

注:由西北大学地质学系大陆动力学国家重点实验室通过LA-ICP-MS法测试;测试人:柳小明。

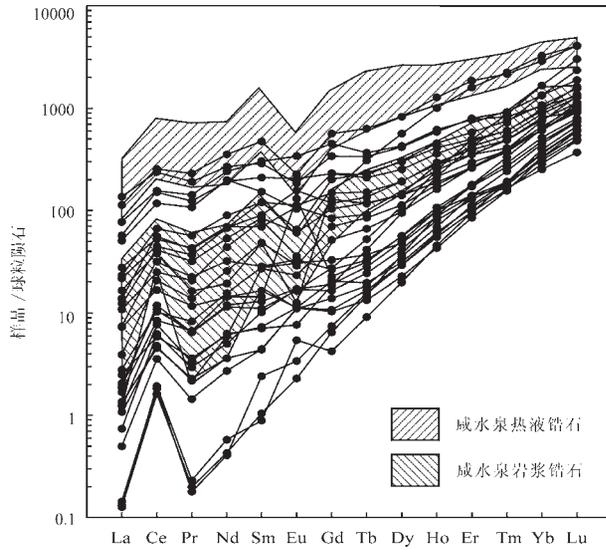


图 11 五道羊盆斜长角闪岩体锆石稀土元素球粒陨石配分图解  
(球粒陨石标准化值据文献[17],咸水泉锆石数据据文献[38])  
Fig.11 Chondrite REE patterns of zircons from Wudaoyangcha taxitic plagioclase amphibolite rock mass (normalized values after References [17], data of zircons from Xianshuiquan rock mass after [38])

其南部为胶辽裂谷。传统说法为中朝准地台(Ⅰ)、辽东台隆(Ⅱ)、铁岭-靖宇台拱(Ⅲ)、龙岗复背斜(Ⅳ)南翼。

根据矿体围岩——斑杂状斜长角闪岩体的岩石地球化学特征,在构造判别图上它们大致落在板块汇聚边缘岛弧构造环境中,说明矿床形成时大地构造为板块汇聚边缘岛弧构造环境。这符合国内外含钒钛铁矿产于不同大地构造单元断裂带上,且靠近稳定单元的一侧,或产于活动带中相对隆起的褶皱带中,产于稳定地块断裂带上含矿岩体及矿床一般呈层状、似层状,规模较大的规律<sup>[42]</sup>。

#### 4.2 矿床成因讨论

铁矿床从成因上一般划分为为沉积变质型、岩浆型、接触交代-热液型、火山岩型、沉积型和现代风化沉积型等类型<sup>[2,7,43]</sup>。而钒钛磁铁矿床(如南非的布什维尔德铁矿<sup>[26]</sup>、中国的攀枝花铁矿<sup>[44]</sup>、中国的大庙黑山铁矿<sup>[8]</sup>)的研究已相当深入,矿床成因类型已基本定型,主要为岩浆晚期分异型、岩浆晚期分异-贯入型两种。

根据前述五道羊盆钒钛磁铁矿矿体产状、地球化学特征、矿石结构构造等(表1~4,图3~10),本文

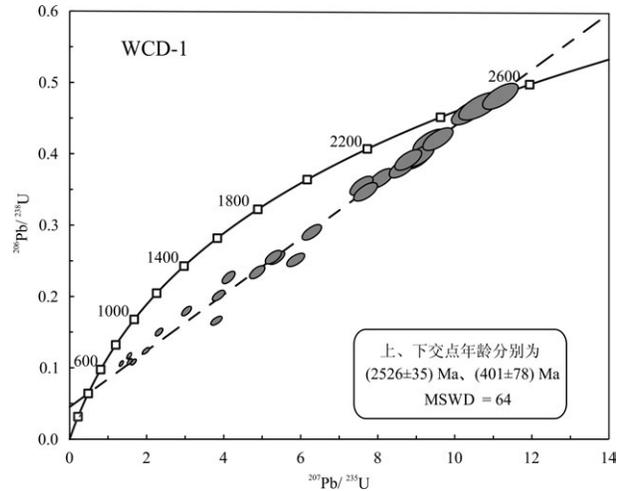


图 12 五道羊盆斑杂状斜长角闪岩体锆石 LA-MC-ICP MS U-Pb 谐和图  
Fig.12 LA-MC-ICP MS U-Pb concordia diagram of zircons from Wudaoyangcha taxitic plagioclase amphibolite rock mass

支持五道羊盆钒钛磁铁矿成因为岩浆分异成因观点,但该成因仅限于Ⅰ、Ⅱ、Ⅵ 3个矿组。这3个矿组共有资源储量 183 65.1 万 t(铁矿石),共伴生钒铁矿 590.6 万 t(氧化物)、Co 23 944 t(金属)、V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 297 508 t(氧化物),属于含钒、钴、钒的大型贫铁矿床。

#### 4.3 成岩成矿时代

目前五道羊盆铁矿周边太古宙地质体已经取得的同位素年龄数据比较丰富。如夹皮沟灰色片麻岩 Rb-Sr 全岩等时线年龄(2971±95) Ma、板石沟绿岩带中斜长角闪岩、黑云斜长片麻岩 Rb-Sr 全岩等时线年龄(2585±67) Ma、板石沟绿岩带中斜长角闪锆石 U-Pb 年龄(2519±21) Ma<sup>[3]</sup>。在矿区附近光华岩群变质玄武岩年龄是(2120±10) Ma、赤柏松镁铁-超镁铁岩的侵位年龄(2145±19) Ma<sup>[45]</sup>。对这些年龄数据的地质意义的认识虽有差异,但这些数据所代表的热-构造事件无疑是存在的。因此,准确确定五道羊盆斑杂状斜长角闪岩体的形成时代对认识该矿床成矿时代、分析成矿规律具有重要意义。

本文对五道羊盆斑杂状斜长角闪岩体锆石测试取得(2526±35) Ma 的上交点年龄(图 12),代表岩体结晶年龄。该年龄与区域上绿岩带中已有年龄完全吻合,一方面说明数据是可靠的,另一方面斑杂状斜长角闪岩体与板石沟绿岩带中斜长角闪、黑

表 4 五道羊岔斜长角闪岩体 WCD-1 样品锆石 U-Th-Pb 同位素测定结果  
Table 4 U-Th-Pb composition of zircons from sample WCD-1 in Wudaoyangcha taxitic amphibolite rock mass

点号	元素含量/10 <sup>-6</sup>										同位素比率										表面年龄/Ma									
	206Pb		207Pb		208Pb		232Th		238U		207Pb/206Pb		208Pb/232Th		206Pb/238U		207Pb/206Pb		208Pb/232Th		207Pb/235U		206Pb/238U		207Pb/235U		208Pb/232Th			
	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ		
WCD-1-1	20.5	778	136	40.2	216	522	0.1602	0.50	8.0667	13.1	0.3652	0.56	0.1009	0.15	2457	52	2239	15	2007	26	1943	27								
WCD-1-2	45.9	800	148	60.0	272	783	0.1693	0.53	5.8500	9.36	0.2505	0.38	0.1192	0.17	2551	51	1954	14	1441	20	2276	31								
WCD-1-3	18.8	714	71.1	37.7	716	1657	0.0912	0.29	1.3302	2.28	0.1057	0.16	0.0285	0.04	1451	59	859	10	648	9	567	8								
WCD-1-4	17.1	927	96.5	22.8	301	1953	0.0954	0.30	1.5328	2.55	0.1165	0.18	0.0409	0.07	1535	58	944	10	711	10	811	13								
WCD-1-5	18.5	989	180	38.9	191	618	0.1663	0.52	9.0189	14.4	0.3932	0.60	0.1101	0.16	2521	51	2340	15	2138	28	2111	29								
WCD-1-6	15.4	804	98.0	43.8	588	1320	0.1117	0.36	2.3060	4.02	0.1497	0.23	0.0403	0.06	1827	57	1214	12	899	13	799	12								
WCD-1-7	17.5	880	158	40.1	203	570	0.1644	0.51	8.6112	13.8	0.3798	0.58	0.1067	0.16	2501	51	2298	15	2076	27	2049	29								
WCD-1-8	17.6	768	128	46.1	361	745	0.1529	0.48	5.3547	8.74	0.2539	0.39	0.0691	0.10	2379	52	1878	14	1459	20	1351	19								
WCD-1-9	15.6	102	5.99	6.42	331	771	0.0536	0.21	0.2416	0.67	0.0327	0.05	0.0105	0.02	355	85	220	5	207	3	211	4								
WCD-1-10	20.7	337	59.5	8.16	33.7	199	0.1620	0.53	9.3234	17.5	0.4174	0.68	0.1309	0.32	2476	54	2370	17	2249	31	2487	57								
WCD-1-11	17.2	887	150	43.9	215	616	0.1543	0.48	7.5517	12.2	0.3548	0.54	0.1107	0.16	2394	52	2179	14	1958	26	2122	29								
WCD-1-12	19.6	860	141	41.4	301	833	0.1499	0.47	5.2633	8.58	0.2546	0.39	0.0743	0.11	2345	52	1863	14	1462	20	1449	21								
WCD-1-13	20.3	638	85.2	30.8	272	880	0.1221	0.38	3.0207	5.06	0.1794	0.28	0.0612	0.09	1987	55	1413	13	1064	15	1200	18								
WCD-1-14	25.5	491	87.8	10.3	37.4	266	0.1636	0.52	10.323	17.5	0.4575	0.72	0.1490	0.30	2494	52	2464	16	2428	32	2807	52								
WCD-1-15	16.1	670	102	5.23	65.5	825	0.1390	0.44	3.8529	6.51	0.2010	0.31	0.0432	0.10	2215	54	1604	14	1181	17	855	20								
WCD-1-17	54.9	675	123	66.3	384	1010	0.1662	0.52	3.7947	6.12	0.1656	0.25	0.0933	0.13	2519	51	1592	13	988	14	1803	24								
WCD-1-18	19.4	594	71.7	35.1	671	1365	0.1104	0.35	1.6417	2.86	0.1079	0.17	0.0283	0.04	1805	57	986	11	660	10	563	9								
WCD-1-19	16.2	786	129.3	28.3	240	835	0.1504	0.47	4.8485	8.00	0.2338	0.36	0.0639	0.10	2351	53	1793	14	1354	19	1253	19								
WCD-1-20	15.8	592	107	10.4	54.9	371	0.1658	0.52	9.0627	14.9	0.3964	0.61	0.1025	0.19	2516	52	2344	15	2152	28	1973	34								
WCD-1-21	18.9	811	91.2	16.2	152	1858	0.1029	0.33	1.5384	2.68	0.1085	0.17	0.0575	0.11	1676	58	946	11	664	10	1131	21								
WCD-1-23	17.6	732	129	52.0	313	526	0.1605	0.50	7.6658	12.6	0.3463	0.53	0.0897	0.13	2461	52	2193	15	1917	26	1736	24								
WCD-1-24	14.6	139	25.1	4.56	18.0	74.2	0.1652	0.55	10.620	22.1	0.4663	0.80	0.1372	0.37	2509	55	2491	19	2467	35	2598	65								
WCD-1-25	15.1	868	125	15.21	145	957	0.1318	0.41	4.1107	6.70	0.2263	0.35	0.0568	0.09	2122	54	1656	13	1315	18	1116	18								
WCD-1-26	17.4	957	170	36.6	177	611	0.1627	0.51	8.7658	14.2	0.3908	0.60	0.1118	0.17	2484	52	2314	15	2127	28	2143	31								
WCD-1-27	15.7	637	109	7.02	35.2	549	0.1567	0.49	6.2564	10.3	0.2896	0.45	0.1078	0.22	2420	52	2012	14	1639	22	2069	40								
WCD-1-28	13.0	621	115	29.2	121	323	0.1686	0.53	11.158	18.7	0.4799	0.75	0.1301	0.21	2544	52	2536	16	2527	33	2472	37								
WCD-1-29	14.6	413	74.5	2.35	10.6	246	0.1647	0.51	9.5348	15.8	0.4199	0.65	0.1197	0.31	2504	52	2391	15	2260	30	2286	57								
WCD-1-30	14.3	873	110	43.4	506	1764	0.1150	0.37	1.9630	3.51	0.1238	0.19	0.0463	0.08	1879	57	1103	12	753	11	915	15								

注:由西北大学地质学系大陆动力学国家重点实验室测试,同位素比值误差为百分比误差(相对误差),表面年龄误差为绝对误差,测试人:柳小明。

云斜长片麻岩形成时代一致,表明在绿岩带岩层形成后斑杂状斜长角闪岩体马上就侵入了,围岩成分、变质流体等对岩体及矿床的形成必将产生重要影响。这从前述岩石地球化学特征、磁铁矿电子探针分析结果已经得到印证。

辽东—吉南地区的早前寒武纪构造演化已经有明确的认识。大体上在3 000 Ma前由于地幔的分离作用和物质向地面运移,发育了初始硅铝壳。随着硅铝壳的形成,逐渐发生了海陆分化,形成古隆起和古海盆。其中在3 800 Ma<sup>[46,47]</sup>、3 300 Ma<sup>[43-45,48-50]</sup>、3 000 Ma等时期出现强烈的构造—岩浆热事件,到3 000 Ma左右形成早期稳定陆块。在早期古陆块形成后,大约从2 900 Ma起,在由古陆块组成的卵形穹隆区的边缘形成了类似现代大陆边缘活动带或弧后盆地的裂谷环境,大量的火山喷发和沉积作用在狭长的槽型盆地内聚集了大量的火山—沉积物质,即原始绿岩建造。大约在2 500 Ma,在本区再次发生较为强烈的构造—岩浆热事件,太古宙地体基本克拉通化。在此期间,花岗岩浆以及在特定部位超基性—基性层状侵入体(岩墙)的侵入,直接或间接地导致一些金属元素如金、铁等的成矿。五道羊岔钒钛磁铁矿即形成于这一构造演化背景之下。

前寒武纪在世界范围上是铁矿重要成矿期,前寒武纪(火山)沉积变质型铁矿床是前寒武纪铁矿床的主要类型,其中最主要的是阿尔戈马型条带状铁建造铁矿床(鞍山式铁矿),是前寒武纪的特征矿床类型,也是仅发育在前寒武纪时期的铁矿床<sup>[2]</sup>。而相比之下岩浆型铁矿床在前寒武纪分布不广,相对规模也不大。目前已知的有河南舞阳地区新太古代赵案庄式铁矿床和河北承德中元古代大庙式铁矿床。赵案庄铁矿床规模为中型,目前国内外未见有太古代大型岩浆铁矿报道。

吉林太古界分布区同样是吉林省最重要的铁矿资源分布区。截止2010年末全省铁矿矿区总数158处<sup>①</sup>,其中99处分布于太古宇地质体内,矿床类型全部为沉积变质型(鞍山式)铁矿床,探明资源储量5.01亿t,占全省铁矿资源储量的68%。这些矿床中只有桦甸老牛沟、白山板石沟2个矿区铁矿资源储量达到大型规模,其余太古代地质体内的铁矿全部为小型矿床(矿点)。因此,五道羊岔新太古代斜

长角闪岩型大型钒钛磁铁矿的发现和确认,不仅改变了吉林省铁矿资源储量的格局,也是世界范围内首次发现的产于斜长角闪岩体内的大型太古代岩浆型铁矿。

五道羊岔钒钛磁铁矿的发现,增加了铁矿类型,丰富了铁矿床理论。目前,在吉林省太古代地质体分布区内的铁矿勘查区尚有几十处,地质勘查多数无大起色,总结五道羊岔钒钛磁铁矿地质特征、成矿规律,对于矿产资源勘查同样具有重要意义。

## 5 结论

五道羊岔大型钒钛磁铁矿床分布于吉南太古代陆核范围内,矿体呈似层状、条带状,矿床围岩为五道羊岔斑杂状斜长角闪岩体。矿石富含铁、钛、钒、钴等元素,矿床成因类型为岩浆分异型铁矿床。

根据含矿围岩——斜长角闪岩层状侵入体中岩浆锆石U-Pb年龄,认为岩体结晶年龄为(2 526±35) Ma,成岩、成矿年代为新太古代末期。

五道羊岔钒钛磁铁矿床是首次发现的产于斜长角闪岩层状侵入体内的大型太古代岩浆型铁矿,增加了铁矿类型,丰富了铁矿床理论,对于矿产资源勘查同样具有重要意义。

由于五道羊岔大型钒钛磁铁矿发现时间较短,对该矿床的研究处于起步阶段。同时由于矿床埋深较大、主要矿体尚未开发,也增加了研究难度。本文所做工作及结论也许尚未反映矿床全貌及矿床本质,深入的研究有待同行们今后的辛劳。

**致谢:**野外工作中得到五道羊岔铁矿大力协助,葛文春教授、柳小明博士、刘鹏举博士、戎合工程师、王生副教授、于介江副教授等在锆石U-Th-Pb同位素分析、矿物电子探针分析、光薄片鉴定等方面提供帮助和指导,审稿人及编辑部对论文提出建设性的意见及建议,在此表示真诚的感谢。同时,借本文的发表,向几位参加五道羊岔大型钒钛磁铁矿床勘查的古稀前辈表示敬意。

## 参考文献(References):

- [1] 李景光,钟长林,张晓兰,等. 吉林白山五道羊岔钒钛磁铁矿地质特征及找矿标志[J]. 吉林地质, 2012, 31(4): 67-73.  
Li Jingguang, Zhong Changlin, Zhang Xiaolan, et al. Geological features and prospecting criteria of Wudaoyangcha vanadium

①吉林省国土资源厅. 吉林省矿产资源储量表[G]. 2010.

- titano-magnetite in Baishan, Jilin Province[J]. *Jilin Geology*, 2012, 31(4): 67-73(in Chinese with English abstract).
- [2] 沈保丰, 翟安民, 杨春亮, 等. 中国前寒武纪铁矿床时空分布和演化特征[J]. *地质调查与研究*, 2005, 28(4): 196-206.  
Shen Baofeng, Zhai Anmin, Yang Chunliang, et al. Temporal-spatial distribution and evolutionary characters of precambrian iron deposits in China[J]. *Geological Survey and Research*, 2005, 28(4): 196-205(in Chinese with English abstract).
- [3] 沈保丰, 路辉, 韩国刚, 等. 辽北—吉南太古宙地质及成矿[M]. 北京: 地质出版社, 1994: 1-255.  
Shen Baofeng, Luo Hui, Han Guogang, et al. *Archean Geology and Metallization in Northern Liaoning Province and Southern Jilin Province*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994: 1-255 (in Chinese with English abstract).
- [4] 潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年, 等. 中国大地构造单元划分[J]. *中国地质*, 2009, 36(1): 1-28.  
Pan Guitang, Xiao Qinghui, Lu Songnian, et al. Subdivision of tectonic units in China[J]. *Geology in China*, 2009, 36(1): 1-28(in Chinese with English abstract).
- [5] 路恩兰, 高明珠, 高艳, 等. 白山市板石沟铁矿地质特征及找矿方向[J]. *吉林地质*, 2012, 31(2): 45-49.  
Lu Enlan, Gao Mingzhu, Gao Yan, et al. Geological features and prospecting targets of Banshigou iron ore in Baishan City[J]. *Jilin Geology*, 2012, 31(2): 45-49(in Chinese with English abstract).
- [6] 王宝金, 刘忠, 松权衡, 等. 吉林省铁矿成矿规律及资源潜力预测[J]. *吉林地质*, 2008, 27(3): 8-12.  
Wang Baojin, Liu Zhong, Song Quanheng, et al. Metallogenic regulation of iron and resources potentiality of Jilin Province[J]. *Jilin Geology*, 2008, 27(3): 8-12(in Chinese with English abstract).
- [7] 李厚民, 王登红, 李立兴, 等. 中国铁矿成矿规律及重点矿集区资源潜力分析[J]. *中国地质*, 2012, 39(3): 559-580.  
Li Houmin, Wang Denghong, Li Lixing, et al. Metallogeny of iron deposits and resource potential of major iron minerogenetic units in China[J]. *Geology in China*, 2012, 39(3): 559-580(in Chinese with English abstract).
- [8] 孙静, 罗照华, 张长厚, 等. 大庙铁矿田——危机矿山还是潜在超大型铁矿基地[J]. *中国地质*, 2009, 36(2): 255-267.  
Sun Jing, Luo Zhaohua, Zhang Changhou. Is the Damiao ore field a crisis mine or a potential giant iron base?[J]. *Geology in China*, 2009, 36(2): 255-267 (in Chinese with English abstract).
- [9] 路远发. GeoKit: 一个用VBA构建的地球化学工具软件包[J]. *地球化学*, 2004, 33(5): 459-464.  
Lu Yuanfa. GeoKit: A geochemical toolkit for microsoft excel[J]. *Geochimica*, 2004, 33(5): 459-464(in Chinese with English abstract).
- [10] 任广利, 王核, 刘建平, 等. 安徽繁昌地区桃冲铁矿床地球化学特征及矿床成因研究[J]. *地学前缘*, 2012, 19(1): 1-14.  
Ren Guangli, Wang He, Liu Jianping, et al. Geochemical characteristics and genesis of Taochong iron deposit in Fanchang district, Anhui Province, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(1): 1-14(in Chinese with English abstract).
- [11] 杨福全, 毛景文, 徐林刚, 等. 新疆蒙库铁矿稀土元素地球化学及对铁成矿作用的指示[J]. *岩石学报*, 2007, 23(10): 2443-2456.  
Yang Fuquan, Mao Jingwen, Xu Lingang, et al. REE geochemistry of the Mengku iron deposit, Xinjiang, and its indication for iron mineralization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(10): 2443-2456(in Chinese with English abstract).
- [12] 李国华, 鄢云飞, 谭俊, 等. 稀土元素在矿床学研究中的应用[J]. *地质找矿论丛*, 2007, 22(4): 294-298.  
Li Yanhua, Yan Yunfei, Tan Jun, et al. The application of rare earth elements in research of ore deposits[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 2007, 22(4): 294-298 (in Chinese with English abstract).
- [13] 孟旭阳, 王鹏, 张东阳, 等. 辽宁思山岭铁矿元素地球化学特征及其地质意义[J]. *中国地质*, 2012, 39(6): 1857-1873.  
Meng Xuyang, Wang Peng, Zhang Dongyang, et al. Element geochemistry of the Sishanling iron deposit in Liaoning Province and its geological implications[J]. *Geology in China*, 2012, 39(6): 1857-1873(in Chinese with English abstract).
- [14] 赵振华. 微量元素地球化学原理[M]. 北京: 科学出版社, 1997.  
Zhao Zhenhua. *Principle of Trace Element Geochemistry*[M]. Beijing: Science Press, 1997: 1-204(in Chinese)
- [15] 万渝生, 程裕淇, 高吉凤, 等. 河北小觉地区阜平岩群斜长角闪岩及深熔产物的稀土和Nd同位素地球化学研究[J]. *地球学报*, 2002, 23(5): 429-434.  
Wan Yusheng, Cheng Yuqi, Gao Jifeng, et al. Study on geochemistry of hornblendic rocks and their anatectic derivatives of the Fuping group in the Xiaojue area, Hebei Province[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2002, 23(5): 429-434(in Chinese with English abstract).
- [16] Taylor S R and McLemann S M. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*[M]. Blackwell: Oxford Press, 1985, 312.
- [17] Sun S S and McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implication for mantle composition and processes[C]//Sauders A D & Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society Special Publication, 1989, 42: 313-345.
- [18] 王仁民, 贺高品, 陈珍珍, 等. 变质岩原岩图解判别法[M]. 北京: 地质出版社, 1987: 1-100.  
Wang Renming, He Gaopin, Chen Zhenzhen, et al. *Protolith Graphic Interpretation Discriminant Analysis of Metmorphic Rock*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987: 1-100(in Chinese).
- [19] Jensen L S. A New Cation Plot for Classifying Subalkalic Volcanic Rocks[M]. Ontario Division of Mines Misc. , 1976.
- [20] Misra S N. Chemical distinction of high-grade ortho and para metabasites[J]. *Norsk Geologisk Tidsskrift*, 1971, 51: 311-316.

- [21] 方爱民, 李继亮, 刘小汉, 等. 新疆西昆仑库车杂带中基性火山岩构造环境分析[J]. 岩石学报, 2003, 19(3): 409-417.  
Fang AiMin, Li Jiliang, Liu Xiaohan, et al. Tectonic settings of the basic igneous rocks in the Kudi ophiolite zone of West Kunlun Mountains, Xingjiang Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2003, 19(3): 409-417 (in Chinese with English abstract).
- [22] 孙书勤, 张成江, 赵松江. 大陆板内构造环境的微量元素判别[J]. 大地构造与成矿学, 2007, 31(1): 104-109.  
Sun Shuqin, Zhang Chengjiang, Zhao Songjiang. Identification of the tectonic settings for continental intraplate by trace elements[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2007, 31(1): 104-109 (in Chinese with English abstract).
- [23] 赵振华. 关于岩石微量元素构造环境判别图解使用的有关问题[J]. 大地构造与成矿学, 2007, 31(1), 214-226.  
Zhao Zhenhua. How to use the trace element diagrams to discriminate tectonic settings[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2007, 31(1): 214-226 (in Chinese with English abstract).
- [24] 毛光周, 华仁民, 高剑峰, 等. 江西金山金矿床含金黄铁矿的稀土元素和微量元素特征[J]. 矿床地质, 2006, 25(4): 412-426.  
Mao Guangzhou, Hua Renmin, Gao Jianfeng, et al. REE composition and trace element features of gold-bearing pyrite in Jinshan gold deposit, Jiangxi Province[J]. Mineral Deposits, 2006, 25(4): 412-426(in Chinese with English abstract).
- [25] 李厚民, 沈远超, 毛景文, 等. 石英黄铁矿中群体包裹体微量元素研究——以胶东焦家式金矿床为例[J]. 岩石学报, 2003, 19(02): 267-274.  
Li Houmin, Shen Yuanchao, Mao Jingwen, et al. Features of trace elements in pyrite, quartz and their fluid inclusions: An example from Jiaojia- type gold deposits, northwestern Jiaodong peninsula[J]. Acta Petrologica Sinica, 2003, 19(02): 267-274(in Chinese with English abstract).
- [26] 袁见齐, 朱上庆, 翟裕生. 矿床学[M]. 北京: 地质出版社, 1985: 32-44.  
Yuan Jianqi, Zhu Shangqing, Zhai Yusheng. Mineral Deposits[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1985, 32-44(in Chinese).
- [27] 俞受璠, 庄龙池, 李善择, 等. 河南舞阳赵寨庄型铁矿成矿特征及矿床成因[J]. 地球化学, 1983, 11(1): 71-79.  
Yu Shouyan, Zhuang Longchi, Li Shanze, et al. Genesis and mineralogical characteristics of the iron deposit of Zhaoanzhuang type in the Wuyang region, Henan Province[J]. Geochimica, 1983, 11(1): 71-79(in Chinese with English abstract).
- [28] 林师整. 磁铁矿矿物化学、成因及演化的探讨[J]. 矿物学报, 1982, 2(03): 166-174.  
Lin Shizheng. A contribution to the chemistry, origin and evolution of magnetite[J]. Acta Mineralogica Sinica, 1982, 2(03): 166-174(in Chinese with English abstract).
- [29] 徐国风, 邵连莲. 磁铁矿标型特征及其实际意义[J]. 地质与勘探, 1979, (3): 30-37.  
Xu Guofeng, Shao Jielian. The typomorphic characteristics of magnetite and its significance[J]. Geology and Prospecting, 1979, (3): 30-37 (in Chinese).
- [30] 陈光远, 孙岱生, 殷辉安. 成因矿物学与找矿矿物学[M]. 重庆: 重庆出版社, 1987.  
Chen Guangyuan, Sun Daisheng, Yin Hui'an. Genetic Mineralogy and Prospecting Mineralogy [M]. Chongqing: Chongqing Press, 1987(in Chinese with English abstract).
- [31] 王慧媛, 彭晓蕾. 辽宁凤城翁泉沟钼铁矿床磁铁矿的成因研究[J]. 中国地质, 2008, 35(6): 1299-1306.  
Wang Huiyuan, Peng Xiaolei. Genesis of magnetite of the Wengquangou vonsenite deposit, Fengcheng county, Liaoning Province[J]. Geology in China, 2008, 35(6): 1299-1306(in Chinese with English abstract).
- [32] 张东阳, 苏慧敏, 田磊, 等. 河南窑场铁矿床成因矿物学研究及其地质意义[J]. 矿物岩石, 2010, 30(1): 53-63.  
Zhang Dongyang, Su Huimin, Tian Lei, et al. Genetic mineralogy of the Yaochang iron deposit in Henan province and their geological implications[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2010, 30(1): 53-63(in Chinese with English abstract).
- [33] Andersen T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report  $^{204}\text{Pb}$ [J]. Chemical Geology, 2002, 192: 59-79.
- [34] 柳小明, 高山, 第五春荣, 等. 单颗粒锆石的  $20\ \mu\text{m}$  小斑束原位微区 LA-ICP-MS U-Pb 年龄和微量元素的同时测定[J]. 科学通报, 2007, 52(02): 228-235.  
Liu Xiaoming, Gao Shan, Diwu Chunrong, et al. Simultaneous insitu determination of U-Pb age and trace elements in zircon by LA-ICP-MS in  $20\ \mu\text{m}$  spot size[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(02): 228-235(in Chinese with English abstract).
- [35] 马中平, 李向民, 徐学义, 等. 南阿尔金山清水泉镁铁-超镁铁质侵入体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年及其意义[J]. 中国地质, 2011, 38(4): 1071-1078.  
Ma Zhongping, Li Xiangmin, Xu Xueyi, et al. Zircon LA-ICP-MS U-Pb isotopic dating for Qingshuiquan layered mafic-ultramafic intrusion in southern Altun orogen, northwestern China and its implication[J]. Geology in China, 2011, 38(4): 1071-1078 (in Chinese with English abstract).
- [36] 段超, 李延河, 毛景文, 等. 宁芜火山岩盆地凹山铁矿床侵入岩锆石微量元素特征及其地质意义[J]. 中国地质, 2012, 39(6): 1874-1884.  
Duan Chao, Li Yanhe, Mao Jingwen, et al. Zircon trace element characteristics of intrusions in the Washan iron deposit of Ningwu volcanic basin and their geological significance[J]. Geology in China, 2012, 39(6): 1874-1884(in Chinese with English abstract).
- [37] Hermann J, Rubatto D, Korsakov A. Multiple zircon growth during fast exhumation of diamondiferous, deeply subducted continental crust(Kokchetav Massif, Kazakhstan) [J]. Contrib. Mineral Petrol., 2001, 141: 66-82.
- [38] 唐俊华, 顾连兴, 张遵忠, 等. 咸水泉片麻状花岗岩锆石热液增生边阴极发光及稀土元素特征[J]. 自然科学进展, 2008, 18(7):

- 769-777.  
Tang Junhua, Gu Lianxing, Zhang Zunzhong, et al. Salt water springs slice hemp shape granite zircon hydrothermal hyperplasia edge cathodeluiminescence and rare earth elements characteristics[J]. Progress in Natural Science, 2008, 18(7): 769-777(in Chinese with English abstract).
- [39] 李长民. 锆石成因矿物学与锆石微区定年综述[J]. 地质调查与研究, 2009, 33(3): 161-174.  
Li Changmin. A review on the minerageny and situ microanalytical dating techniques of zircons[J]. Geological Survey and Research, 2009, 33(3): 161-174(in Chinese with English abstract).
- [40] 吴元保, 陈道公, 夏群科, 等. 大别山黄镇榴辉岩锆石微区微量元素分析: 榴辉岩相变质锆石的微量元素特征[J]. 科学通报, 2002, 47(11): 859-863.  
Wu Yuanbao, Chen Daogong, Xia Qunke, et al. In situ trace element analyses of zircons from Dabieshan Huangzhen eclogite: Trace element characteristics of eclogite facies metamorphic zircon[J]. Chinese Sci. Bull., 2002, 47(11): 859-863(in Chinese).
- [41] Geisler T, Pidgeon R T, Kurtz R, et al. Experimental hydrothermal alteration of partially metamict zircon[J]. American Mineralogist, 2003, 88: 1496-1513.
- [42] 尹绍枚, 唐兴信. 中国钒钛铁矿概况[J]. 中国地质科学院矿床地质研究所所刊, 1982, (3): 73-77.  
Qi Shaomei, Tang Xingxin. A general survey of the vanadium-bearing titano magnetite deposits in China[J]. Bulletin of the Institute of Mineral Deposits, Chinese Academy of Geological Sciences, 1982, (3): 73-77(in Chinese with English abstract).
- [43] 程裕淇, 赵一鸣, 陆松年. 中国几组主要铁矿类型[J]. 地质学报, 1978, 53(4): 253-268.  
Cheng Yuqi, Zhao Yiming, Lu Songnian. Main type groups of iron deposits of China[J]. Acta Geologica Sinica, 1978, 53(4): 253-268(in Chinese with English abstract).
- [44] 卢记仁, 张承信, 张光第, 等. 攀西地区钒钛磁铁矿床的成因类型[J]. 矿床地质, 1988, 7(1): 1-13.  
Lu Jiren, Zhang Chengxin, Zhang Guangdi, et al. Genetic type of V-Ti magnetite deposits in Panzihua-Xichang area[J]. Mineral Deposits, 1988, 7(1): 1-13(in Chinese with English abstract).
- [45] 路孝平. 通化地区古元古代构造岩浆事件[D]. 长春: 吉林大学博士学位论文, 2004: 1-103.  
Lu Xiaoping. Paleoproterozoic Tectonic-Magmatic Event in Tonghua Area[D]. Changchun: Jilin University Ph. D. Thesis, 2004: 1-103(in Chinese with English abstract).
- [46] Wan Y S, Liu D Y, Song B, et al. Geochemical and Nd isotopic compositions of 3.8 Ga meta-quartz dioritic and trondhjetic rocks from the Anshan area and their geological significance[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2005, 24: 563-575.
- [47] Liu D Y, Nutman A P, Compston W, et al. Remnants of 3800 Ma crust in the Chinese part of the Sino-Korean craton[J]. Geology, 1992, 20: 339-342.
- [48] 万渝生, 伍家善, 刘敦一, 等. 鞍山3.3 Ga陈台沟花岗岩地球化学和Nd、Pb同位素特征[J]. 地球学报, 1997, 18(4): 382-388.  
Wan Yusheng, Wu Jiashan, Liu Dunyi, et al. Geochemistry and Nd, Pb isotopic characteristics of 3.3 Ga Chentaigou granite in Anshan area[J]. Acta Geoscientica Sinica, 1997, 18(4): 382-388 (in Chinese with English abstract).
- [49] 万渝生, 宋彪, 刘敦一, 等. 鞍山东山风景区3.8~2.5 Ga古老岩带的同位素地质年代学和地球化学[J]. 地质学报, 2001, 75(3): 363-370.  
Wan Yusheng, Song Biao, Liu Dunyi, et al. Geochronology and geochemistry of 3.8-2.5 Ga ancient rock belt in the Dongshan Scenic Park, Anshan area[J]. Acta Geologica Sinica, 2001, 75(3): 363-370(in Chinese with English abstract).
- [50] 周红英, 刘敦一, 万渝生, 等. 鞍山地区3.3 Ga岩浆热事件——SHRIMP年代学和地球化学新证据[J]. 岩石矿物学杂志, 2007, 26(2): 123-129.  
Zhou Hongying, Liu Dunyi, Wan Yusheng, et al. 3.3 Ga magmatic events in the Anshan area: New SHRIMP age and geochemical constraints[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2007, 26(2): 123-129(in Chinese with English abstract).

## Geological characteristics and zircon U-Pb age of the Wudaoyangcha Neoproterozoic vanadic titanomagnetite deposit in Baishan, Jilin Province

SHAO Jian-bo<sup>1</sup>, LI Jing-guang<sup>2</sup>, WANG Hong-tao<sup>1</sup>, CHEN Dian-yi<sup>1</sup>, REN Qiang<sup>1</sup>

(1. Information Center of Geology and Mineral Resources of Jilin Province, Changchun 130061, Jilin, China;

2. Institute of Geologic and Mineral Resources Exploration and Design of Jilin Province, Changchun 130012, Jilin, China)

**Abstract:** Located in Baishan City of southern Jilin Province, the Wudaoyangcha vanadic titanomagnetite deposit is a large-size magma type iron deposit lying in amphibolite layered intrusions in Archaean strata, founded for the first time in the world. The discovery of the deposit has important implications for mineral resource exploration in areas with similar geological conditions. The deposit is located in northern Banshigou greenstone belt on the southern margin of Longgang paleo-continental nucleus of the Liao-Ji paleocontinent. No. I, II and VI orebodies lie in Wudaoyangcha amphibolite layered intrusions, and vanadic titanomagnetite mineralization is closely related to the layered intrusions. The protolith of the layered intrusions belongs to orthometamorphite, and its tectonic environment belongs to the island arc basalts in the convergent margin of the plate. Orebodies are mainly in layered form. Ore textures include mainly crystallization texture, solid solution separation texture and sideronitic texture. Ore structures are dominated by massive structure, disseminated structure, spongy-meteoritic structure and layered structure. Magnetite-ilmenite-pyrite makes up most metallic mineral association of the ore. The magnetite and ilmenite of the vanadic titanomagnetite ore was investigated by means of EPMA. The magnetite is genetically magmatic liquation titanomagnetite. The chemical composition of the ilmenite is generally consistent with the theoretical constituents of ilmenite. The authors carried out U-Pb dating and micro-scale in situ trace elements and REE research on zircons separated from the Wudaoyangcha amphibolite layered intrusions. The characteristics of trace elements and REE show that these zircons are magmatic zircons. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating yielded a discordant age, with the discordant upper intercept age for 28 spots of sample WCD1 being  $(2\ 526\pm 35)$  Ma. This age represents the crystallization age of layered intrusions.

**Key words:** vanadic titanomagnetite deposit; geological features of the ore deposit; zircon LA-ICP-MS U-Pb age; Neoproterozoic; Wudaoyangcha; Jilin Province

---

**About the first author:** SHAO Jian-bo, male, born in 1963, senior researcher, post-doctoral researcher, engages in the investigation and study of mineral resources; E-mail: shao-jb@163.com.