https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.105



黑龙江省太平岭地区下二叠统双桥子组岩石 地球化学特征及其成矿意义

何谋焘1,2,丁振举1,2*,魏连喜3*,周腾飞3

1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学固体矿产勘查国家级实验教学示范中心,湖北武汉 430074

3. 黑龙江省有色金属地质勘查研究总院, 黑龙江哈尔滨 150090

摘 要:太平岭成矿带是黑龙江省重要的铜金多金属成矿带,矿床类型主要为中温热液脉型,也发育斑岩型、浅成低温热液型 和岩浆熔离型.区内广泛发育的下二叠统双桥子组(P₁s)由泥质岩、粉砂岩及砂岩夹多层中酸性火山岩等组成.地层中Au、P、 Fe等元素含量较高,近年来,在东宁县及穆棱市境内相继发现了陆角岭、五道沟-二十三公里等小型金矿床,金矿体均呈脉状 产于P₁s中,但品位较低,直接影响到下一步找矿决策.在野外调查的基础上,利用岩石地球化学、X射线粉晶衍射以及有机碳 分析等手段,对该地层岩石类型、沉积物源以及Au等成矿元素来源进行了分析,结果表明:岩石主量元素含量稳定,与PAAS 相比,轻度亏损Al₂O₃、P₂O₅、CaO和MnO₂,中度亏损Na₂O、MgO、TiO₂和Fe₂O₃;微量元素除了Zn外,其他元素含量都较低;稀 土元素总量与北美页岩相当,轻重稀土元素分异略低于北美页岩;主要矿物为粘土矿物(伊利石、绿泥石)和石英,另有不等量 的钠长石、少量的碳酸盐矿物和黄铁矿,岩石TOC含量为0.22%~2.52%,平均值为1.10%;岩石中Au的含量与TOC和粘土 矿物含量之间没有相关性.认为区内P₁s为碳质砂板岩,沉积物主要来源于石英质沉积岩的风化产物,少量来源于镁铁质和长 英质火成岩,沉积于近岸环境,地层中高含量的金并不是成岩之后由流体携带而来并被岩石中富含的有机物或粘土矿物所吸 附,而是同样来源于陆源风化产物,指示该区产于P₁s中的金矿并非层控型金矿床,而是受断层控制的热液脉型金矿床. **关键词**:碳质板岩;双桥子组;沉积物源;太平岭成矿带;黑龙江省;矿床地质.

中图分类号: P618 **文章编号:** 1000-2383(2021)05-1537-17 **收稿日期:** 2020-10-05

Geochemical Characteristics and Metallogenic Significance of Lower Permian Shuangqiaozi Formation in Taiping Mountains, Heilongjiang Province

He Mouchun^{1,2}, Ding Zhenju^{1,2*}, Wei Lianxi^{3*}, Zhou Tengfei³

3. Non-Ferrous Metals of Geological Survey and Research Institute of Heilongjiang Province, Harbin 150090, China

Abstract: The metallogenic belt in the Taiping Mountains is one of the most important copper-gold polymetallic metallogenic belts

*通讯作者:丁振举, E-mail: dingzhenju@cug.edu.cn; 魏连喜, E-mail: wlx861@163.com

引用格式:何谋卷,丁振举,魏连喜,等,2021.黑龙江省太平岭地区下二叠统双桥子组岩石地球化学特征及其成矿意义.地球科学,46(5):1537-1553.

^{1.} School of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

^{2.} National Demonstration Center for Experimental Mineral Exploration Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

基金项目:黑龙江省国土资源科研项目(No.黑国土科研201606).

作者简介:何谋惷(1965-),男,副教授,博士,从事矿床地质、找矿勘探研究及《矿床学》的教学工作.ORCID:0000-0003-1763-8273. E-mail: hemch@126.com

in Heilongjiang Province, in which mesothermal hydrothermal vein dominates, followed by porphyry, epithermal and magmatic type deposits. The Lower Permian Shuangqiaozi Formation (P_1s) is widely developed in this region, and is composed of pelite, siltstone, and sandstone, with multiple layers of intermediate-felsic volcanic rocks. The contents of Au, P, and Fe are relatively high in this stratum. In recent years, small scale gold deposits such as Lujiaoling, Wudaogou-23 Gongli have been found in Dongning County and Muleng City. The gold ore bodies are developed in $P_{1\delta}$ as veins, but the grade of gold is low, which directly affects the next step of exploration. Based on field investigations, in this paper it uses rock geochemistry, X-ray powder diffraction, and organic carbon analysis to determine the rock types, sedimentary sources, and sources of ore-forming elements such as Au. The contents of major elements display small variations. Compared with PAAS, the rocks are slightly depleted in Al₂O₃, P₂O₅, CaO, and MnO₂, and moderately depleted in Na₂O, MgO, TiO₂, and Fe₂O₃. All trace elements except Zn yield lower contents. The total amount of rare earth elements is equivalent to that of North American shale, and the differentiation of light and heavy rare earth elements is slightly lower than that of North American shale. The rocks are dominated by clay minerals (illite, chlorite) and quartz, with various amounts of albite and minor carbonate minerals and pyrite. The TOC contents of the rock range from 0.22% to 2.52%, with an average of 1.10%. There is no correlation between the contents of Au and TOC and clay minerals. It is suggested that P_{1s} in the area is composed of carbonaceous slate, and the sediments were mainly derived from the weathering products of quartzose sedimentary rocks, with a small amount derived from femic igneous rocks. The deposition environment is near-shore. The high contents of gold in the stratum were not brought by the fluids after diagenesis and adsorbed by the rich organic compounds or clay minerals, but derived from terrigenous weathering products. This indicates that the gold deposits developed in P₁s in this area are not stratabound gold deposits, but hydrothermal vein type deposits controlled by faults. Key words: carbonaceous slate; Shuangqiaozi Formation; sediment provenance; metallogenic belt in the Taiping Mountains; Heilongjiang Province; mineral deposit.

东北地区地块群位于西伯利亚板块、华北板块和太平洋板块之间,为"中亚造山带"的东段与鄂霍茨克和太平洋构造域的叠加部位,对于该区大地构造形迹存在较大的认识分歧(Sengör et al.,1993; 唐克东等,1995;任纪舜等,1999; Zhou et al.,2011; Zhou and Wilde,2013;周建波等,2016).

区内古生代主要表现为多个微陆块(额尔古 纳地块、兴安地块、松辽地块、佳木斯一兴凯地块) 之间的拼合和古亚洲洋的闭合(任纪舜等,1999; Wilde et al.,2003;Wu et al.,2007).古生代早期松 辽地块与佳木斯地块碰撞一拼合历史和古生代 末期到早中生代古亚洲洋体系与太平洋构造体 系的转化机制为本区研究的热点和焦点问题 (许文良等,2012).目前对两地块之间的碰撞一 拼合时间主要有早古生代晚期(颉颃强等, 2008a,2008b;Meng et al.,2010;王浩等,2012)和 早中生代(Wu et al.,2007;Zhou et al.,2009)两 种不同认识.同样,对古亚洲洋构造体系与环太 平洋构造体系的叠加和构造体制转换时间也有 三叠纪和早中生代两种不同观点(Wu et al., 2007;Zhou et al.,2009;许文良,2019).

太平岭成矿带位于佳木斯-兴凯地块南部, 敦密断裂带东南侧,其大地构造单元为太平岭 新元古代陆缘活动带,并由太平岭新元古代隆 起和老黑山晚古生代断陷构成.带内经历了多 期构造一岩浆活动,产有隐爆角砾岩型、斑岩型、浅成低温热液型以及岩浆型矿床(点).其中,隆起带内以铜、镍、钴和铂族元素以及银、金矿床(点)为主,而断陷内则以金及多金属矿床为主,是黑龙江省重要的铜金多金属成矿带.

下二叠统双桥子组(P₁s)分布于东宁县双桥 子及鸡东县大营山等地,沿太平岭呈北东向展布, 整合于平阳镇组之上,原岩以泥质岩、粉砂岩及砂 岩为主,夹多层中性、中酸性火山岩.主要岩石有 含石榴黑云碳质绢云千枚岩、石英千枚岩、碳质绢 云千枚岩、绢云石英千枚岩、浅灰绿色安山岩、安 山质凝灰熔岩、碳质板岩和变质凝灰质粉砂岩.碳 质板岩中产植物化石:Cordaites(?)sp.,Alethopteris(?)sp.,变质凝灰熔岩岩石普遍发生了变质, 但不同地区变质程度不同,且横向上厚度变化较 大.其中含碳质岩石中Au、P、Fe等元素含量较 高,Au含量一般在几至几十ng/g之间.

近年来,在东宁县及穆棱市境内相继发现了陆 角岭、五道沟一二十三公里等小型金矿床,金矿体 均呈脉状产于 P₁s中,但品位较低.目前,对于这些 矿床的成因类型及赋矿岩石类型还存在着不同认 识,有人认为双桥子组为一套黑色岩系,矿床为变 质-热液型金矿,归并到穆龙套式金矿类型.也有 人认为双桥子组为碳质板岩,矿床为蚀变岩型金 矿(黑龙江省有色金属地质勘查703队,2015.黑 1

龙江省穆棱市陆角岭金多金属普查报告).而方 焱等(2020)通过成矿流体及稳定同位素分析认 为五道沟金矿属于造山型金矿.不同认识决定了 不同找矿思路,更直接影响到找矿效果.

鉴于该区研究程度低,进一步找矿效果不尽 人意的实际情况,本文拟通过对赋矿地层(P₁s) 岩石地球化学、岩石有机碳含量以及岩石中矿 物成分等分析,厘定双桥子组(P₁s)岩石类型、分 析岩石中Au的来源,明确金矿成因类型,为区 内下一步金矿找矿提供理论依据.

研究区位于中国东北部、兴蒙造山带东段,被

区域及矿区地质

西伯利亚板块、华北板块和西太平洋板块所挟持, 处于佳木斯地块-兴凯地块南部,敦(化)-密 (山)断裂东南侧(图1),是一个经历了古亚洲洋 演化、中生代古太平洋板块俯冲以及新生代超壳 断裂叠加的复合构造区,构造-岩浆活动强烈.

区内地层区划属兴凯地层大区(Ⅲ)、延边地 层区(Ⅲ₁)、东宁~汪清地层分区(Ⅲ¹)、老黑山地 层小区(Ⅲ¹⁻²).出露的地层主要有古生界二叠 系、中生界三叠系、侏罗系及新近系和第四系.

区域上岩浆活动频繁,侵入岩分布广泛,从晚 三叠世到早白垩世的侵入岩均有分布.区内主要有 晚三叠一早侏罗世的花岗斑岩(γπT₃J₁)、二长花岗 岩(ηγT₃J₁)、正长花岗岩(γξT₃J₁)、花岗闪长岩 (γδT₃J₁)、石英闪长岩(δoT₃J₁)和闪长岩(δT₃J₁),早



Fig.1 Regional geological map of Northeast China

据黑龙江省地质调查研究总院,2007.黑龙江1:25万牡丹江市、绥芬河市幅区调报告.1.船底山组;2.富锦组;3.宝泉灵组;4.海浪组;5.松木河 组西格木段;6.猴石沟组;7.东山组;8.城子河组;9.绥芬河组;10.罗圈站组;11.南村组;12.俯冲增生杂岩;13.红山组;14.高压-超高压变质 带;15.杨木岩组;16.洞子沟组;17.亮子川组;18.双桥子组;19.红叶桥组;20.平阳镇组;21.早白垩世花岗斑岩;22.早白垩世石英闪长岩;23. 晚三叠世-早侏罗世花岗斑岩;24.晚三叠世-早侏罗世二长花岗岩;25.晚三叠世-早侏罗世正长花岗岩;26.晚三叠世-早侏罗世花岗闪长岩; 27.晚三叠世-早侏罗世石英闪长岩;28.晚三叠世-早侏罗世闪长岩;29.地堑构造;30.地质界线;31.实测、推测断层;32.岩相界线;33.角度不 整合界线;34.韧性剪切带;35.金矿;36.铜矿 白 垩 世 花 岗 岩 斑 岩 (γπK₁)和 石 英 闪 长 岩 (δoK₁),另外有少量时代不明的脉岩.

区内构造形迹为NE向,并且以断裂构造为 主,主要有敦一密断裂、共和一双桥子断裂带和 青山林场一金厂断裂带等,次为北西向和南北向 断裂.褶皱主要有太平岭复式背斜以及双桥子向 斜、黑瞎子沟向斜、南大山向斜等.

区内构造岩浆活动强烈,成矿条件优越.新元 古代时期,本区为活动大陆边缘环境,新元古代末 期,张广才岭运动形成中酸性和基性一超基性侵 入岩,发育有岩浆型铜镍矿床,晚印支运动有大量 的中酸性侵入岩和火山岩,同期形成了火山热液 型铜、金、锌矿床.燕山早期岩浆活动主要表现为 中性火山岩和侵入岩,形成了与侵入岩有关的铜、 铁、铅、锌等矿床,燕山晚期火山岩分布广,侵入岩 以浅成岩为主,形成了区内主要的斑岩型、浅成低 温热液型铜金矿床.因此,该带是黑龙江省重要的 金、银、铜、铅、锌、镍成矿带.主要矿床由北至南 依次有四排南山铂钯铜镍矿床、金场沟东区铜钼 金矿床、四山林场金银矿床、洋灰洞子铜矿床、金 厂半截沟金矿床、金厂八号铜金矿床、九佛沟金银 多金属矿床等,近年来,又发现了产于双桥子组中 的陆角岭、五道沟一二十三公里小型金矿床.

2 样品概况及分析方法

2.1 样品概况

2.1.1 样品采集 本次研究所用的样品取自五道沟、 二十三公里、陆角岭3个金矿区不同钻孔中,位置见图 2.本文对样品分别进行了有机碳(TOC)、X粉晶衍 射、常量元素、稀土微量元素和成矿元素的测定.

2.1.2 样品岩石学特征 本次研究主要针对 P₁s 中的碳质板岩和碳质砂板岩开展了研究.

(1)碳质板岩.岩石呈褐灰色、风化呈褐黄色、 板理发育、千枚状构造,丝绢光泽.主要矿物有石 英、斜长石、泥质物和碳质物、绢云母.碳质物和泥 质物呈条带状分布,含量约为45%(图3).

(2)砂质板岩.岩石呈褐灰色,风化为褐黄色, 板理发育,变余砂状结构,丝绢光泽,可见明显的变 余层理(图4左下).主要矿物有石英(80%)、绢云母 (15%)以及泥质成分和碳质物(5%)(图4).

2.2 分析方法

2.2.1 主量元素分析 主量元素分析由自然资源部武汉矿产资源监督检测中心完成.碎样前

先切除表面风化层,对样品进行破碎处理,选 取新鲜无次生脉体岩块,然后在振动式磨样机 内磨至 200 目以下.主量元素测试每件样品 50 g左右,采用X射线荧光熔片法(XRF),即将 4.0 g四硼酸锂与 0.4 g样混合后置于 AAG50 熔 样器上制成玻璃后在 X 荧光仪上测定.

2.2.2 微量稀土元素分析 微量和稀土元素测试 在中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点 实验室完成,仪器为美国 Agilent 公司的 Agilent 7500a 等离子体质谱仪(ICP-MS).分析步骤和 方法为:首先称取粉碎至大约 200 目的岩石粉 末 50 mg 于 Teflon 溶样器中;然后采用 Teflon 溶 样 弹将样品用 1.5 mL HF +1.5 mL HNO₃ 在 195℃条件下消解 48 h;最后将在 120℃条件下 蒸 干除 Si 后的样品用 2%HNO₃ 稀释 2 000 倍, 定容于干净的聚酯瓶中,待仪器测定.

2.2.3 成矿元素分析 成矿元素是在自然资源部 武汉矿产资源监督检测中心完成,使用仪器主 要有 X2型电感耦合等离子体质谱仪、XRF-1800 型 X 荧光光谱仪、ICAP6300型等离子发射光谱 仪以及 WP1-米平面光栅摄谱仪等.

2.2.4 有机碳(TOC)分析 TOC分析是在中国 地质大学(武汉)生物地质与环境地质国家重点 实验室所属的碳硫分析仪 Multi EA4000上完成. 测试步骤如下:称量约2g样品至50mL离心管 中,加入6mol/L的盐酸,待完全反应后,利用高 纯水不断稀释,随后利用离心机离心,一直到中 性时,去除上清液,将装有残余固体样品的试管 置于烘箱中烘干,将烘干后的样品称取一定量 放入瓷舟,后在碳硫分析仪 MultiEA4000中的高 纯氧气中燃烧6min进行测试分析.

2.2.5 粉晶衍射分析 粉晶衍射是在中国地质大 学地质过程与矿产资源国家重点实验室完成,仪器 为荷兰帕纳科 Panalytical公司 X'Pert Pro X射线粉 晶衍射仪;测试条件:工作电压为 40 kV,工作电流 为 40 mA;Cu K_a射线,波长为 0.154 16 nm,Ni 滤波 (filter), 3°~65°;扫描方式:连续式步进扫描,步 长:0.017°;扫描速度:0.417 782°/s,预置时间: 2′36″;定量分析方法:K值法.

3 分析结果

3.1 岩石化学成分

3.1.1 常量元素地球化学成分特征 常量元素分





析结果见附表1,从表中可知,ω(SiO₂+Al₂O₃+ K₂O+Na₂O)为79.82%~90.55%,其中ω(K₂O)= 2.68%~6.89%,平均值为4.10%,ω(Al₂O₃)= 11.10%~22.93%,平均值为16.80%,ω(SiO₂)= 49.44%~72.56%,平均值为64.70%,ω(SiO₂+ Al₂O₃)=72.00%~86.03%,平均值为81.51%;ω (SiO₂)/ω(Al₂O₃)=2.33~4.38,平均值为3.95,ω (Al₂O₃)/ω(Al₂O₃+Fe₂O₃)=0.75~0.97,平均值 为0.87;ω(Al)/ω(Al+Fe+Mn)=0.63~0.86,平 均值为0.78;其中,ω(MnO)相对较低,ω(Si)/ω (Si+Al+Fe)=0.62~0.81,平均值为0.75.总体 而言,样品成分比较稳定.与PAAS相比,岩石轻 度亏损 Al_2O_3 、 P_2O_5 、CaO和 MnO_2 ,中度亏损 Na_2O 、MgO、TiO₂和 Fe_2O_3 (图5).

Na₂O、CaO的亏损说明原岩碎屑中斜长石的数量较少或者碎屑在搬运过程中风化较强烈, K₂O、TiO₂、Fe₂O₃的亏损说明碎屑中层状硅酸盐和铁镁质矿物较少(Moosavirad *et al.*,2011).

3.1.2 微量元素特征 从微量元素分析结果(附表 2)可知,除了Zn含量较高外,其他Co、Ni、Cu、Cr、V、U和Th等质量分数都较低.V/(V+Ni)比值为 0.15~0.82,平均值为 0.56,U/Th 比值为 0.01~



图 3 碳质板岩岩石特征 Fig.3 The photographs of carbonaceous slate rocks Q.石英;Pl.斜长石;Ser.绢云母;Ms.白云母



图 4 碳质砂板岩岩石特征 Fig.4 The photographs of carbonaceous sand-slate rocks Q.石英;Ser.绢云母





0.30,平均值为0.14; V/Cr比值为0.10~2.79,平 均值为1.0; Ni/Co比值为0.21~2.92,平均值为 0.91; δU为0.09~0.99,平均值为0.48.微量元素 的含量在剖面上变化不大,但在不同矿区有比较 大的差别,在五道沟矿区样品中Th、Hf的含量比 二十三公里和陆角岭两个矿区高一个数量级以 上,相反,二十三公里和陆角岭两个矿区样品中 Zr、V、Zn的含量比五道沟矿区高一个数量级.

3.1.3 稀土元素地球化学特征 稀土元素分析结 果见表3,从表中可知,稀土元素总量ΣREE为 118.99~313.69 μg/g,平均值为206.84 μg/g,与北 美页岩稀土总量(200.21 μg/g)相当.LREE/ HREE=5.60~9.18,平均值为7.22,略低于北美页 岩的比值(7.50),轻、重稀土分异程度较低.经北 美页岩标准化计算获得δEu值为0.67~1.24,平均 值为0.88,略高于北美页岩标准值(δEu=0.70), δCe变化值为0.99~1.10,平均值为1.03,略低于北 美页岩标准值(δCe=1.11),二者异常表现均不明 显;(La/Yb)_N的变化范围为0.62~1.27,平均值为 0.94,明显低于北美页岩组合样(La/Yb)_N=5.13; 岩石经北美页岩标准化后曲线呈平坦状(图6).

3.2 岩石有机碳总量

岩石有机碳总量(TOC)分析结果见表1.从 表中可知,TOC含量为0.22%~2.52%,平均值为 1.10%.三个矿区岩石有机碳总量基本相同.在有 机碳含量直方图上(图7),峰值位于0.8%~ 1.2%.其中,有47件样品有机碳总量(TOC)小于 1%,55件样品有机碳总量(TOC)大于1%.

3.3 岩石矿物成分

岩石 X 粉晶衍射分析结果见表 2,结果显示绝 大多数样品主要矿物为粘土矿物(伊利石、绿泥石) 和石英,另有不等量的钠长石、少量的碳酸盐矿物 和黄铁矿.其中,粘土矿物(伊利石+绿泥石)含量 为 31%~75%,平均值为 60%;伊利石含量为 22%~68%,平均值为 44%;绿泥石含量为 2%~ 36%,平均值为 15%;石英含量为 14%~52%,平 均值为 32%;钠长石含量为 2%~21%,平均值为 7%;碳酸盐矿物含量较少,主要是方解石,个别样 品中有白云石;大多数样品都不含黄铁矿,少数样 品中含有很少量的黄铁矿,未见有其他硫化物矿 物.在矿物三元图解(图 8)中,样品投影点集中分 布在粘土矿物一石英+长石+黄铁矿一边,属于泥 硅质岩类,反映沉积物供给比较稳定.

3.4 成矿元素特征

碳质板岩中Ag、Mo、As、Sb、Bi、Hg、Au等成矿 元素分析结果见表3.从表中可知,除Mo外其他元 素含量都高于克拉克值.其中,As和Au两种元素含 量变化非常大,其他元素变化幅度较小,尤其是Hg 的含量几乎没变化.As含量介于26.1~3913.4 μg/ g,Au含量介于0.44~2911 ng/g,且它们的含量明 显分为两组,一组含量较低,代表着区域背景值.另 外一组含量较高(Au含量通常大于100 ng/g,As含 量通常为100 μg/g),属异常高值样品,这类样品全



| | Table . | I The analytic data | i of total orga | nic carbon (TOC) to | or the study s | amples | |
|--------------|---------|---------------------|-----------------|---------------------|----------------|---------------|--------|
| 样品号 | TOC(%) | 样品号 | TOC(%) | 样品号 | TOC(%) | 样品号 | TOC(%) |
| EZK7201-3-1 | 0.45 | WZK0902-1-30 | 0.58 | EZK7401-2-2 | 1.88 | LZK110-3-2-6 | 0.87 |
| EZK7201-3-2 | 0.37 | WZK0902-1-31 | 0.48 | EZK7401-2-3 | 1.25 | LZK110-3-2-7 | 0.62 |
| EZK7201-3-3 | 0.98 | WZK0902-1-33 | 0.95 | EZK7401-2-4 | 1.05 | LZK110-3-2-8 | 0.96 |
| EZK7201-3-4 | 0.91 | WZK0902-1-35 | 0.55 | EZK7401-2-5 | 1.26 | LZK110-3-2-9 | 1.49 |
| EZK7201-4-1 | 1.16 | WZK0902-1-37 | 1.01 | EZK7401-2-6 | 2.07 | LZK110-3-2-10 | 1.12 |
| EZK7201-4-2 | 1.97 | WZK0902-1-39 | 2.00 | EZK7401-2-7 | 1.36 | LZK110-3-2-11 | 1.14 |
| EZK7201-4-3 | 1.27 | WZK0902-1-41 | 1.88 | EZK7401-2-8 | 1.71 | LZK110-3-2-12 | 2.50 |
| EZK7201-4-4 | 0.57 | WZK0902-1-43 | 1.15 | EZK7401-2-9 | 2.00 | LZK110-3-2-13 | 1.93 |
| EZK7502-2-2 | 0.62 | WZK0902-1-44 | 0.93 | WZK0902-1-1 | 0.44 | LZK110-3-2-14 | 1.12 |
| EZK7502-2-3 | 1.19 | WZK0902-1-46 | 1.51 | WZK0902-1-3 | 0.74 | LZK110-3-2-15 | 1.56 |
| EZK7502-2-4 | 0.43 | WZK0902-1-47 | 2.36 | WZK0902-1-4 | 0.60 | LZK110-3-2-16 | 1.44 |
| EZK7502-2-6 | 0.72 | WZK0902-1-49 | 1.15 | WZK0902-1-5 | 0.63 | LZK110-3-2-17 | 0.80 |
| EZK7502-2-7 | 0.25 | WZK0902-1-51 | 1.08 | WZK0902-1-7 | 1.16 | LZK110-3-2-18 | 1.38 |
| EZK7502-2-8 | 0.30 | WZK0902-1-53 | 2.26 | WZK0902-1-8 | 0.22 | LZK110-3-2-19 | 1.07 |
| EZK7502-2-10 | 0.79 | WZK0902-1-54 | 1.41 | WZK0902-1-9 | 0.35 | LZK110-3-2-20 | 1.12 |
| EZK7502-2-11 | 1.01 | WZK0902-1-55 | 2.52 | WZK0902-1-11 | 0.73 | LZK110-3-2-21 | 0.83 |
| EZK7502-2-13 | 0.32 | WZK0902-1-57 | 2.31 | WZK0902-1-14 | 0.35 | LZK110-3-2-22 | 1.27 |
| EZK7502-2-14 | 0.99 | WZK0902-1-59 | 1.88 | WZK0902-1-15 | 0.72 | LZK110-3-2-23 | 1.05 |
| EZK7502-2-15 | 0.30 | WZK0902-1-60 | 1.61 | WZK0902-1-17 | 0.71 | LZK110-3-2-24 | 1.44 |
| EZK7502-2-16 | 0.53 | WZK0902-1-62 | 0.93 | WZK0902-1-19 | 0.84 | LZK110-3-2-26 | 1.73 |
| EZK7502-2-17 | 0.61 | LZK110-3-2-1 | 0.95 | WZK0902-1-20 | 0.33 | LZK110-3-2-27 | 1.46 |
| EZK7502-2-18 | 0.45 | LZK110-3-2-2 | 0.98 | WZK0902-1-22 | 0.90 | LZK110-3-2-28 | 1.26 |
| EZK7502-2-19 | 1.35 | LZK110-3-2-3 | 1.10 | WZK0902-1-24 | 1.60 | LZK110-3-2-29 | 1.17 |
| EZK7502-2-20 | 1.55 | LZK110-3-2-4 | 1.09 | WZK0902-1-26 | 1.13 | LZK110-3-2-30 | 1.22 |
| EZK7502-2-21 | 1.30 | LZK110-3-2-5 | 0.83 | WZK0902-1-28 | 1.37 | LZK110-3-2-31 | 0.62 |
| EZK7502-2-22 | 1.32 | EZK7401-2-1 | 0.85 | | | | |

表1 研究区双桥子组(P₁s)碳质板岩有机碳(TOC)含量分析

able 1 The analytic data of total organic carbon (TOC) for the study sample

表2 双桥子组碳质板岩粉晶衍射分析结果(%)

Table 2 The analytic data of powder diffraction for the study samples (%)

| | 伊 | 绿 | | 钾 | 钠 | 白 | 方 | 黄 | | 伊 | 绿 | | 钾 | 钠 | 白 | 方 | 黄 |
|---------------|----|----|----|---|----|---|---|---|---------------|----|----|----|----|----|---|---|---|
| 样品编号 | 利 | 泥 | 白 | 长 | 长 | Ī | 解 | 铁 | 样品编号 | 利 | 泥 | 白 | 长 | 长 | Ī | 解 | 铁 |
| | 石 | 石 | 英 | 石 | 石 | 石 | 石 | 矿 | | 石 | 石 | 英 | 石 | 石 | 石 | 石 | 矿 |
| EZK7201-3-3 | 44 | 15 | 34 | | 3 | | 3 | 1 | LZK110-3-2-30 | 44 | 25 | 28 | | 3 | | | |
| EZK7201-3-4 | 43 | 21 | 32 | | 3 | | 1 | | LZK110-3-2-31 | 52 | 6 | 38 | | 4 | | | |
| EZK7201-4-3 | 44 | 16 | 32 | | 7 | | 1 | | WZK0902-1-4 | 42 | 29 | 24 | | 5 | | | |
| EZK7201-4-4 | 45 | 11 | 38 | | 5 | | 1 | | WZK0902-1-5 | 49 | 5 | 37 | | 7 | | 1 | 1 |
| EZK7401-2-1 | 51 | 14 | 31 | | 2 | | 1 | 1 | WZK0902-1-7 | 42 | 8 | 40 | | 9 | | | 1 |
| EZK7401-2-2 | 51 | 20 | 27 | | 2 | | | | WZK0902-1-8 | 35 | 7 | 46 | 3 | 8 | | 1 | |
| EZK7401-2-3 | 41 | 19 | 33 | | 6 | | 1 | | WZK0902-1-9 | 30 | 7 | 40 | | 21 | | 1 | 1 |
| EZK7401-2-4 | 43 | 23 | 31 | | 2 | | 1 | | WZK0902-1-14 | 34 | 9 | 41 | | 15 | | 1 | |
| EZK7401-2-7 | 37 | 26 | 32 | | 5 | | | | WZK0902-1-15 | 48 | 2 | 38 | | 11 | | 1 | |
| EZK7401-2-8 | 38 | 25 | 31 | | 6 | | | | WZK0902-1-17 | 55 | 9 | 30 | | 5 | | 1 | |
| EZK7502-2-8 | 35 | 14 | 41 | 1 | 8 | | 1 | | WZK0902-1-19 | 55 | 9 | 32 | | 4 | | | |
| EZK7502-2-14 | 53 | 14 | 28 | | 3 | | 1 | 1 | WZK0902-1-20 | 39 | 13 | 37 | | 10 | | 1 | |
| EZK7502-2-17 | 22 | 9 | 52 | | 15 | | 1 | 1 | WZK0902-1-30 | 53 | 9 | 34 | | 3 | | 1 | |
| EZK7502-2-20 | 44 | 12 | 37 | | 5 | | 1 | 1 | WZK0902-1-31 | 45 | 8 | 35 | | 11 | | 1 | |
| EZK7502-2-21 | 44 | 6 | 41 | | 7 | | 1 | 1 | WZK0902-1-39 | 68 | 4 | 19 | | 7 | 1 | | 1 |
| EZK7502-2-22 | 46 | 23 | 26 | | 4 | | 1 | | WZK0902-1-43 | 53 | 8 | 32 | | 6 | | | 1 |
| LZK110-3-2-2 | 42 | 12 | 42 | | 4 | | | | WZK0902-1-44 | 49 | 4 | 39 | | 7 | | | 1 |
| LZK110-3-2-3 | 57 | 11 | 29 | | 3 | | | | WZK0902-1-47 | 36 | 26 | 21 | | 16 | | | 1 |
| LZK110-3-2-4 | 40 | 15 | 41 | | 4 | | | | WZK0902-1-53 | 39 | 36 | 17 | 1 | 7 | | | |
| LZK110-3-2-5 | 50 | 18 | 28 | | 4 | | | | WZK0902-1-54 | 40 | 28 | 20 | | 12 | | | |
| LZK110-3-2-6 | 50 | 17 | 30 | | 3 | | | | WZK0902-1-55 | 55 | 17 | 14 | 13 | | | | 1 |
| LZK110-3-2-28 | 32 | 25 | 38 | | 4 | | 1 | | WZK0902-1-60 | 37 | 27 | 23 | 1 | 11 | | | 1 |
| LZK110-3-2-29 | 51 | 9 | 33 | | 6 | | 1 | | WZK0902-1-62 | 40 | 35 | 20 | 1 | 3 | | 1 | |





部取自矿(化)体附近,说明异常高值是后期热液活动叠加的结果.从成矿元素相关系数矩阵可以看出 (表4),碳质板岩中Au与As、Sb、Ag元素相关性较高,相关系数分别为0.84、0.75、0.64.



rite ternary diagram of carbonaceous slate for the study samples

碳质板岩中成矿元素R聚类分析表明,Au、As、Sb、Ag、Hg为一类,Mo、Bi为一类(图9),前者为指示金成矿的地球化学元素组合.

表3 碳质板岩成矿元素含量分析结果

| Т | ab | le i | 3 | Т | he | ana | lytic | data | of | ore- | forming | g e | lements | for t | he | stud | y | sampl | les |
|---|----|------|---|---|----|-----|-------|------|----|------|---------|-----|---------|-------|----|------|---|-------|-----|
|---|----|------|---|---|----|-----|-------|------|----|------|---------|-----|---------|-------|----|------|---|-------|-----|

| 长日 | Ag | Mo | As | Sb | Bi | Hg | Au | +¥ 日 | Ag | Mo | As | Sb | Bi | Hg | Au |
|--------------|------|------|----------|-------|------|------|----------|--------------|------|------|----------|-------|------|------|----------|
| 件亏 | | | μg/ | g | | | ng/g | 件亏 | μg/g | | | | | | ng/g |
| EZK7201-3-1 | 0.27 | 1.35 | 44.42 | 8.36 | 0.12 | 0.02 | 4.83 | WZK0902-1-28 | 0.20 | 1.03 | 56.45 | 2.99 | 0.90 | 0.01 | 3.54 |
| EZK7201-3-2 | 0.19 | 1.06 | 73.16 | 6.32 | 0.21 | 0.01 | 21.59 | WZK0902-1-30 | 0.15 | 1.39 | 165.82 | 2.53 | 0.41 | 0.01 | 21.62 |
| EZK7201-3-3 | 0.25 | 2.30 | 50.95 | 5.84 | 0.23 | 0.02 | 2.54 | WZK0902-1-31 | 0.09 | 2.60 | 608.46 | 3.33 | 0.34 | 0.01 | 92.26 |
| EZK7201-3-4 | 0.23 | 2.72 | 71.52 | 5.90 | 0.43 | 0.01 | 2.14 | WZK0902-1-33 | 0.12 | 1.44 | 49.82 | 2.11 | 0.53 | 0.01 | 20.19 |
| EZK7201-4-1 | 0.60 | 0.95 | 647.35 | 13.00 | 0.52 | 0.02 | 598.70 | WZK0902-1-35 | 0.14 | 2.48 | 87.15 | 2.18 | 0.24 | 0.01 | 5.36 |
| EZK7201-4-2 | 0.26 | 1.04 | 199.63 | 9.07 | 0.18 | 0.01 | 189.30 | WZK0902-1-37 | 0.13 | 1.66 | 37.79 | 1.72 | 0.54 | 0.01 | 2.47 |
| EZK7201-4-3 | 0.36 | 0.83 | 160.22 | 6.66 | 0.11 | 0.01 | 35.91 | WZK0902-1-39 | 0.99 | 1.93 | 2 516.32 | 20.56 | 0.44 | 0.03 | 2 203.00 |
| EZK7201-4-4 | 0.04 | 0.33 | 9.11 | 0.89 | 0.03 | 0.01 | 0.52 | WZK0902-1-41 | 0.57 | 1.69 | 1 185.75 | 6.72 | 0.26 | 0.03 | 118.90 |
| EZK7502-2-2 | 0.21 | 2.07 | 83.91 | 6.47 | 0.49 | 0.02 | 9.72 | WZK0902-1-43 | 0.40 | 2.07 | 445.77 | 6.07 | 0.37 | 0.01 | 225.90 |
| EZK7502-2-3 | 0.10 | 1.10 | 28.82 | 3.10 | 0.43 | 0.01 | 1.11 | WZK0902-1-44 | 0.39 | 1.47 | 1 776.95 | 6.62 | 0.18 | 0.01 | 762.90 |
| EZK7502-2-4 | 0.09 | 0.70 | 28.80 | 3.85 | 0.42 | 0.01 | 1.90 | WZK0902-1-46 | 0.14 | 1.28 | 200.34 | 1.46 | 0.30 | 0.01 | 10.27 |
| EZK7502-2-6 | 0.57 | 1.23 | 145.05 | 16.26 | 0.45 | 0.04 | 27.78 | WZK0902-1-47 | 0.07 | 0.95 | 42.53 | 1.76 | 0.26 | 0.00 | 0.95 |
| EZK7502-2-7 | 0.09 | 0.38 | 26.97 | 2.23 | 0.17 | 0.00 | 1.35 | WZK0902-1-49 | 0.21 | 1.34 | 891.08 | 9.01 | 0.93 | 0.01 | 36.78 |
| EZK7502-2-8 | 0.21 | 0.94 | 34.94 | 4.89 | 0.51 | 0.01 | 5.76 | WZK0902-1-51 | 0.13 | 1.43 | 1 293.40 | 3.87 | 0.24 | 0.01 | 15.19 |
| EZK7502-2-10 | 0.27 | 1.42 | 44.45 | 7.83 | 0.53 | 0.01 | 4.71 | WZK0902-1-53 | 0.13 | 1.10 | 43.49 | 0.87 | 0.21 | 0.00 | 0.79 |
| EZK7502-2-11 | 0.10 | 1.24 | 36.88 | 12.87 | 0.57 | 0.01 | 3.93 | WZK0902-1-54 | 0.12 | 1.38 | 169.33 | 1.62 | 0.53 | 0.01 | 12.94 |
| EZK7502-2-13 | 0.10 | 0.50 | 28.92 | 9.37 | 0.20 | 0.00 | 6.76 | WZK0902-1-55 | 0.25 | 1.55 | 183.13 | 5.25 | 0.41 | 0.01 | 3.67 |
| EZK7502-2-14 | 0.38 | 0.77 | 65.34 | 11.57 | 0.46 | 0.01 | 23.76 | WZK0902-1-57 | 0.09 | 1.37 | 194.29 | 2.92 | 0.24 | 0.00 | 3.85 |
| EZK7502-2-15 | 0.88 | 1.02 | 3 913.41 | 75.91 | 0.29 | 0.02 | 2 911.00 | WZK0902-1-59 | 0.11 | 1.44 | 752.12 | 1.73 | 0.39 | 0.00 | 3.64 |
| EZK7502-2-16 | 0.66 | 0.89 | 1 697.05 | 67.02 | 0.33 | 0.02 | 725.30 | WZK0902-1-60 | 0.10 | 1.13 | 144.71 | 0.41 | 0.14 | 0.00 | 1.70 |
| EZK7502-2-17 | 0.52 | 1.30 | 699.60 | 24.73 | 0.20 | 0.02 | 202.40 | WZK0902-1-62 | 0.33 | 0.69 | 26.89 | 1.87 | 0.58 | 0.01 | 2.84 |

续表3

| 世旦 | Ag | Мо | As | Sb | Bi | Hg | Au | 世旦 | Ag | Mo | As | Sb | Bi | Hg | Au |
|--------------|------|------|----------|-------|------|------|----------|---------------|------|------|--------|------|------|------|------|
| 14 5 | | | μg/ | g | | | ng/g | 14-5 | | | μg/ | g | | | ng/g |
| EZK7502-2-18 | 0.07 | 0.81 | 212.15 | 0.99 | 0.10 | 0.01 | 3.70 | LZK110-3-2-1 | 0.06 | 1.45 | 28.22 | 1.11 | 0.26 | 0.01 | 2.44 |
| EZK7502-2-19 | 0.35 | 1.09 | 801.85 | 27.78 | 0.61 | 0.02 | 232.20 | LZK110-3-2-2 | 0.04 | 0.92 | 35.40 | 0.61 | 0.14 | 0.01 | 3.41 |
| EZK7502-2-20 | 0.15 | 0.68 | 40.42 | 7.19 | 0.19 | 0.01 | 9.70 | LZK110-3-2-3 | 0.06 | 0.80 | 61.56 | 1.08 | 0.27 | 0.02 | 2.05 |
| EZK7502-2-21 | 0.17 | 0.67 | 119.12 | 2.99 | 0.21 | 0.01 | 44.14 | LZK110-3-2-4 | 0.05 | 0.83 | 80.79 | 1.00 | 0.33 | 0.02 | 7.90 |
| EZK7502-2-22 | 0.18 | 1.38 | 161.79 | 8.98 | 0.58 | 0.10 | 3.39 | LZK110-3-2-5 | 0.05 | 1.17 | 53.80 | 1.12 | 0.42 | 0.01 | 1.71 |
| EZK7401-2-1 | 0.73 | 1.01 | 119.56 | 5.16 | 0.49 | 0.01 | 341.10 | LZK110-3-2-6 | 0.04 | 2.37 | 26.48 | 0.56 | 0.56 | 0.01 | 1.23 |
| EZK7401-2-2 | 0.18 | 0.86 | 76.16 | 6.61 | 0.25 | 0.01 | 8.07 | LZK110-3-2-7 | 0.06 | 0.65 | 43.78 | 1.06 | 0.41 | 0.02 | 1.92 |
| EZK7401-2-3 | 0.37 | 1.45 | 75.42 | 10.21 | 0.59 | 0.01 | 44.48 | LZK110-3-2-8 | 0.04 | 1.24 | 52.39 | 0.31 | 0.18 | 0.01 | 1.52 |
| EZK7401-2-4 | 0.11 | 0.80 | 99.17 | 6.97 | 0.21 | 0.01 | 99.79 | LZK110-3-2-9 | 0.19 | 0.89 | 48.18 | 0.49 | 0.42 | 0.01 | 0.77 |
| EZK7401-2-5 | 0.79 | 1.26 | 805.07 | 16.28 | 0.41 | 0.02 | 160.90 | LZK110-3-2-10 | 0.07 | 0.56 | 35.08 | 0.46 | 0.20 | 0.01 | 0.74 |
| EZK7401-2-6 | 0.18 | 0.96 | 96.03 | 3.35 | 0.25 | 0.02 | 9.00 | LZK110-3-2-11 | 0.11 | 1.78 | 39.13 | 0.56 | 0.26 | 0.01 | 1.49 |
| EZK7401-2-7 | 0.17 | 0.56 | 151.48 | 3.90 | 0.36 | 0.02 | 51.30 | LZK110-3-2-12 | 0.31 | 1.61 | 18.39 | 0.35 | 2.16 | 0.01 | 1.64 |
| EZK7401-2-8 | 0.26 | 1.02 | 26.11 | 2.01 | 0.49 | 0.01 | 1.90 | LZK110-3-2-13 | 0.08 | 1.35 | 53.62 | 0.26 | 0.24 | 0.01 | 0.84 |
| EZK7401-2-9 | 0.19 | 0.73 | 39.41 | 0.61 | 0.25 | 0.01 | 4.90 | LZK110-3-2-14 | 0.05 | 1.25 | 45.52 | 0.40 | 0.13 | 0.01 | 3.53 |
| WZK0902-1-1 | 0.18 | 0.59 | 1 161.85 | 6.11 | 0.52 | 0.01 | 177.40 | LZK110-3-2-15 | 0.05 | 1.61 | 55.34 | 0.58 | 0.16 | 0.02 | 0.97 |
| WZK0902-1-3 | 0.04 | 1.41 | 23.66 | 1.73 | 0.27 | 0.01 | 1.60 | LZK110-3-2-16 | 0.06 | 1.37 | 36.56 | 0.43 | 0.16 | 0.01 | 0.69 |
| WZK0902-1-4 | 0.26 | 0.73 | 198.32 | 2.42 | 1.19 | 0.01 | 9.66 | LZK110-3-2-17 | 0.17 | 1.07 | 57.77 | 0.79 | 0.31 | 0.01 | 1.09 |
| WZK0902-1-5 | 0.66 | 1.43 | 2 644.91 | 20.38 | 0.38 | 0.04 | 1 262.00 | LZK110-3-2-18 | 0.04 | 0.89 | 32.49 | 0.39 | 0.13 | 0.01 | 0.48 |
| WZK0902-1-7 | 0.42 | 1.47 | 1 205.04 | 11.49 | 0.35 | 0.02 | 271.40 | LZK110-3-2-19 | 0.12 | 0.94 | 56.06 | 0.50 | 0.25 | 0.01 | 1.01 |
| WZK0902-1-8 | 0.43 | 0.71 | 2 195.58 | 15.78 | 0.32 | 0.02 | 433.50 | LZK110-3-2-20 | 0.07 | 1.37 | 31.22 | 0.39 | 0.12 | 0.01 | 0.44 |
| WZK0902-1-9 | 0.36 | 3.16 | 1 698.57 | 10.46 | 0.38 | 0.02 | 211.00 | LZK110-3-2-21 | 0.28 | 0.53 | 40.47 | 0.94 | 0.62 | 0.03 | 3.36 |
| WZK0902-1-11 | 0.14 | 1.12 | 56.80 | 1.99 | 0.35 | 0.01 | 10.52 | LZK110-3-2-22 | 0.06 | 0.89 | 43.16 | 0.43 | 0.25 | 0.00 | 4.70 |
| WZK0902-1-14 | 0.10 | 0.80 | 33.95 | 1.90 | 0.36 | 0.01 | 4.00 | LZK110-3-2-23 | 0.22 | 2.28 | 109.87 | 1.06 | 0.69 | 0.02 | 5.79 |
| WZK0902-1-15 | 0.41 | 1.87 | 2 424.06 | 20.33 | 0.29 | 0.03 | 658.10 | LZK110-3-2-24 | 0.10 | 1.03 | 79.72 | 0.67 | 0.32 | 0.01 | 1.40 |
| WZK0902-1-17 | 0.25 | 1.41 | 943.60 | 5.88 | 0.47 | 0.01 | 107.60 | LZK110-3-2-26 | 0.14 | 1.06 | 73.15 | 0.78 | 0.33 | 0.01 | 1.55 |
| WZK0902-1-19 | 0.17 | 1.28 | 1 401.50 | 6.68 | 0.43 | 0.01 | 154.50 | LZK110-3-2-27 | 1.05 | 1.05 | 44.08 | 0.55 | 1.26 | 0.02 | 0.71 |
| WZK0902-1-20 | 0.13 | 0.99 | 64.59 | 2.44 | 0.35 | 0.01 | 12.90 | LZK110-3-2-28 | 0.26 | 1.01 | 54.75 | 0.73 | 0.56 | 0.01 | 0.71 |
| WZK0902-1-22 | 0.16 | 1.86 | 79.13 | 3.52 | 0.56 | 0.01 | 23.01 | LZK110-3-2-29 | 0.25 | 2.16 | 56.51 | 1.82 | 0.63 | 0.01 | 8.02 |
| WZK0902-1-24 | 0.13 | 1.31 | 76.62 | 2.18 | 0.53 | 0.01 | 26.65 | LZK110-3-2-30 | 0.40 | 0.67 | 59.27 | 0.54 | 0.97 | 0.01 | 2.99 |
| WZK0902-1-26 | 0.18 | 2.42 | 63.47 | 1.88 | 0.70 | 0.01 | 6.15 | LZK110-3-2-31 | 0.10 | 1.26 | 45.30 | 0.36 | 0.33 | 0.01 | 2.65 |

4 讨论

4.1 岩石物质来源及其形成环境

现有研究结果表明,碎屑岩的化学成分明显受 它的源岩成分、源岩区构造背景和气候环境、风化 程度以及迁移过程等因素影响(Fralick and Kronberg, 1997),前人利用碎屑岩化学成分来探讨其物 质来源,并取得了很好的效果(Cullers, 2000; Alvarez and Roser, 2007; Akarish and El-Gohary, 2008; Manikyamba *et al.*, 2008; Paikaray *et al.*, 2008; Spalletti *et al.*, 2008; Dey *et al.*, 2009; Kalsbeek and Frei, 2010; Mishra and Sen, 2010; 何雨思等, 2019).

从本次研究样品主量元素特征参数表(表5)可

表4 碳质板岩成矿元素相关系数矩阵

Table 4 Correlation coefficient matrix of ore-forming elements for the study samples

| | Ag | Mo | As | Sb | Bi | Hg | Au |
|----|------|-------|-------|-------|-------|------|----|
| Ag | 1 | | | | | | |
| Mo | 0.06 | 1 | | | | | |
| As | 0.59 | 0.15 | 1 | | | | |
| Sb | 0.60 | -0.01 | 0.72 | 1 | | | |
| Bi | 0.26 | 0.10 | -0.06 | -0.05 | 1 | | |
| Hg | 0.33 | 0.10 | 0.27 | 0.25 | 0.10 | 1 | |
| Au | 0.64 | 0.06 | 0.84 | 0.75 | -0.05 | 0.24 | 1 |

以看出.岩石中Al/(Al+Fe+Mn)比值均大于0.5, SiO₂/Al₂O₃比值除少数样品小于3.6外,绝大多数大 于3.6,说明沉积物主要来自陆源,但可能有生物作





用的参与.MnO/TiO₂比值除个别样品比值大于 0.5外,其他样品均较小,反映沉积区为近岸环 境.在lg(SiO₂/Al₂O₃)-lg((CaO+Na₂O)/K₂O) 图解中(图10),样品投影点集中分布于海相正 常碎屑沉积岩区.在SiO₂-Al₂O₃判别图(图11) 中,样品点主要落在正常水沉积区,少量在深 海沉积物区内,同样说明沉积物主要来自陆源 风化产物,可能有少量的热水沉积物.

稀土元素配分模式图(图6)上较平坦的

REE 配分曲线和无明显的 Ce 异常以及 Y-Y/Ho 图解(图 12)上变化较小的 Y/Ho 比值(介于 26.0~31.7)等特征,说明其源区物质主要以陆源为主,与岩浆岩和陆源碎屑沉积物中相对稳定的 Y/Ho 比值(Y/Ho=28)相比,有较小幅度的波动,预示着在其沉积过程中可能受到海底热液的影响(Bau, 1996; Jiang *et al.*, 2006).

利用岩石主量元素、微量元素和稀土元 素还可以进一步判断原岩岩石类型(Roser and Korsch, 1986; Floyd et al., 1989; McLennan et al., 1993).Roser and Korsch(1988)根据 岩石中稳定和易迁移元素的含量构建了双 变量判别图,其中判别函数 $D_1=0.607\times$ $Al_2O_3\% - 1.773 \times TiO_2\% + 0.76 \times Fe_2O_3^T\% 1.5 \times MgO_{0}^{0} + 0.616 \times CaO_{0}^{0} + 0.509 \times Na_{2}O_{0}^{0} -$ 1.22×K₂O%-9.09;判別函数D₂=0.445×TiO₂%+ $0.07 \times \text{Al}_2\text{O}_3\% - 0.25 \times \text{Fe}_2\text{O}_3\% - 1.142 \times$ $MgO\% + 0.432 \times Na_2O\% + 1.426 \times K_2O\% - 6.861$, 在双变量判别图上(图13),样品数据投影 点绝大部分落在石英质沉积岩区,少数样品 落在铁镁质火山岩区,个别样品落在长英 质火山岩区.这说明P₁s源岩主要为石英 质沉积岩,可能有少部分来自铁镁质火成 岩和少量的长英质火成岩.

表5 碳质板岩化学成分特征参数对比

| 长标 | 4 | 步尔区间及相应地。 | 三帝以 | $\phi^* \boxtimes$ | | | | | | |
|---|--------------------|--------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|--|--|--|--|
| 1日 1小 | 1 | 守怔区间及相应有力 | > 息 乂 | 五道沟 | 陆角岭 | 二十三公里 | | | | |
| Al/ (Al+Fe+Mn) | <0.35,存在 | :热水的注入 | >0.5,来自陆源 | 0.66~0.78, 平均值为0.71 | 0.55~0.83, 平均值为0.72 | 0.67~0.79, 平均值为0.72 | | | | |
| $ m SiO_2/ m Al_2O_3$ | ≪3.6,完全। | 由陆源提供 | >3.6,生物或热水作 用的补充 | 2.14~4.88, 平均值为3.68 | 2.71~6.61, 平均值为3.73 | 3.71~5.85, 平均值为4.55 | | | | |
| Si/ (Si+Al+Fe) | <0.9,更接; | 近碎屑物源区 | 0.9~1,主要物源为生 物硅 | 0.56~0.76,平均 值为0.69 | 0.64~0.76,平均 值为0.70 | 0.70~0.79,平均 值为0.74 | | | | |
| $\begin{array}{c} \mathrm{Al_2O_3/}\\ \mathrm{(Al_2O_3+Fe_2O_3)} \end{array}$ | 0.1~0.4, 洋脊海岭环境 | 0.4~0.7, 远洋深海环境 | 0.75~0.94, 平均值为0.86 | 0.78~0.95, 平均值为0.85 | 0.75~0.94, 平均值为0.86 | 0.83~0.97, 平均值为0.91 | | | | |
| MnO/ TiO ₂ | <0.2,近岸注 | 线海陆架内 | >0.5,靠近海沟和 深海环境中 | 0~0.29, 平均值为0.12 | 0.06~0.42, 平均值为0.15 | 0.04~0.77, 平均值为0.16 | | | | |

Table 5 Characteristic of element concentration ratios of carbonaceous slate for the study samples



图 10 碳质板岩lg(SiO₂/Al₂O₃)-lg((CaO+Na₂O)/K₂O)图解 Fig.10 Bivariate lg(SiO₂/Al₂O₃) versus lg((CaO+Na₂O)/ K_2O sedimentary environment discrimination diagram













Fig.12 Y-Y/Ho covariant diagram for the study samples



岩石镜下鉴定结果也显示,无论是碳质板 岩还是砂质板岩中都含有比较多的绢云母、碳 质物和泥质成分,说明其原岩主要为粘土沉积. 另外,在镜下还见到双晶非常明显的斜长石, 说明其源岩可能有含斜长石的火成岩,因为在 这种低变质岩形成过程中不太可能形成自生的 斜长石.岩石的这些矿物成分特征进一步说明 P₁s 源岩有铁镁质或长英质火成岩.

4.2 岩石中有机碳含量和粘土矿物含量与金等成 矿元素含量关系

有机碳含量是评价地层中有机质丰度的一 个有效指标,因而,它不仅仅是页岩油气"甜点" 预测、资源评价的重要评价依据(王鹏威等, 2019), 也是Au、Pb、Zn、Ni、Mo、U等众多金属 矿床成矿的重要影响因素 (Disnar and Surean, 1990;朱弟成等,2003;刘家军等,2007),还是判 断岩石是否是黑色岩系的重要参数.

对于P₁s岩石类型目前还没统一认识,有人认 为是碳质板岩,也有人为是黑色岩系.从本次岩石 有机碳含量分析结果看,岩石中有机碳总量(TOC) 变化比较大,介于0.22%~2.52%,平均含量达 1.10%,其中有54%的样品含量在1%以上(n= 102).另外,岩石粉晶衍射分析结果也表明,岩石中 矿物成分主要为粘土矿物,占比31%~75%.其中, 相当多的样品不含黄铁矿或含量甚微,事实上,笔 者在岩石样中也很少见到黄铁矿等硫化物矿物.这 些特征与黑色岩系的定义有比较大的出入,尤其是

在硫化物含量(黄铁矿)方面相差甚远,认为该套岩 石不属于黑色岩系,应属于碳质板岩或富碳板岩.

有机质和粘土矿物都有比较强的吸附性,它 们强烈的吸附作用可以导致某些金属元素的富集 成矿,岩石中 TOC 含量的高低可以用来近似地表 征岩石中有机质丰度的高低.因此,通过对金属元 素含量与 TOC 及粘土矿物含量之间的相关性分 析可以判断元素富集与它们之间是否存在依存关 系.一般认为,如果金属元素的富集是由于有机质 或粘土矿物的吸附作用所致,那么这些元素的含 量与岩石中 TOC 或粘土矿物含量之间必定呈现 明显的正相关关系.为了减少后期热液活动导致 地层中Au等成矿元素进一步富集对研究结果的 影响,本次研究对那些未明显受到后期热液影响 的样品进行了成矿元素含量与TOC含量和粘土 矿物含量相关性分析,它们的协变关系分别见图 14和图15,从两图可以看出,TOC和粘土矿物含 量与Au、Ag、As、Sb、Hg等元素之间都没有明显 的正相关关系,说明区内碳质板岩中金等元素的 高背景值并不是成岩之后流体携带而来并被岩石 中富含的有机物或粘土矿物所吸附所致,而应该 是在成岩过程中随沉积物一同沉积的结果.







图 15 粘土矿物含量与Au、Ag、Sb、As、Hg含量相关性图解 Fig.15 The relationship between the abundance of clay minerals and ore-forming elements

5 结论

(1)研究区内P₁s样品中TOC含量介于 0.22%~2.52%,峰值为0.8%~1.2%,平均含量达 1.10%.但金属硫化物含量甚微,绝大部分样品不含 黄铁矿等硫化物,所以该套岩石并不属于黑色岩 系,而应为碳质板岩或(富)碳质板岩.

(2)P₁s源岩主要为石英质沉积岩,少量为镁铁 质火成岩,极少数为长英质火成岩,沉积于近岸环 境,主要属于正常海水沉积,少数在沉积过程中可 能受到海底热水沉积的影响.

(3)区内未受到后期热液影响的样品中金

等成矿元素含量与岩石 TOC 和粘土矿物含量 之间没有相关性,表明其中高含量的金等成矿 元素并不是成岩之后由流体携带而来并被岩石 中富含的有机物或粘土矿物所吸附,而是与沉 积物一起来源于陆源石英质沉积岩和火山岩的 风化产物,指示该区产于 P₁s 中金矿并非层控型 金矿床,而是受断裂控制的热液脉型金矿床.

致谢:野外工作期间得到了黑龙江省有色金 属地质勘查局 703 队王泉总工程师和张卫民的 大力支持和帮助,两位审稿专家对本文的修改 提出了许多宝贵意见,在此一并表示感谢!

附表见本刊官网(http://www.earth-science.net).

1551

References

- Akarish, A.I.M., El-Gohary, A.M., 2008. Petrography and Geochemistry of Lower Paleozoic Sandstones, East Sinai, Egypt: Implications for Provenance and Tectonic Setting. Journal of African Earth Sciences, 52:43-54.
- Alvarez, N.O., Roser, B.P., 2007. Geochemistry of Black Shales from the Lower Cretaceous Paja Formation, Eastern Cordillera, Colombia: Source Weathering, Provenance and Tectonic Setting. Journal of South American Earth Sciences, 23 (4):271-289.
- Bau, M., 1996. Controls on the Fractionation of Isovalent Trace Elements in Magmatic and Aqueous Systems: Evidence from Y/Ho, Zr/Hf, and Lanthanide Tetrad Effect. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 123: 323-333. https://doi.org/10.1007/s004100050159.
- Brownlw, E.C., 1979. Geochemisty. Prentie-Hal, New Jersey.
- Cullers, R.L., 2000. The Geochemistry of Shales, Siltstones and Sandstones of Pennsylvanian-Permian Age, Colorado, USA: Implications for Provenance and Metamorphic Studies. *Lithos*, 51: 181–203.
- Dey, S., Rai, A.K., Chaki, A., 2009. Palaeoweathering, Composition and Tectonics of Provenance of the Proterozoic Intracratonic Kaladgi - Badami Basin, Karnataka, Southern India: Evidence from Sandstone Petrography and Geochemistry. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34 (6):703-715.
- Disnar, J.R., Sureau, J.F., 1990. Organic Matter in Ore Genesis: Progress and Perspectives. Organic Geochemistry, 16(1-3): 577-599.
- Fang, Y., He, M. C., Ding, Z. J., et al., 2020. Ore -Forming Fluid Characteristics and Genesis of the Wudaogou Gold Deposit in Dongning County, Heilongjiang Province. *Geoscience*, 34(2): 254-265 (in Chinese with English abstract).
- Floyd, P.A., Winchesrer, J.A., Park, R.G., 1989.Geochemistry and Tectonic Setting of Lewisian Clastic Metasediments from the Early Proterozoic Loch Maree Group of Gairloch, NW Scotland. *Precambrian Research*, 45(1-3):203-214.
- Fralick, P.W., Kronberg, B.I., 1997. Geochemical Discrimination of Clastic Sedimentary Rock Sources. Sedimentary Geology, 113:111-124.
- Haskin, L.A., Haskin, M.A., Frey, F.A., et al., 1968.Relative and Absolute Terrestrial Abundances of the Rare Earth Elements. Pergamon Press Ltd., Oxford.
- He, Y.S., Gao, F.H., Xiu, M., 2019. Age, Provenance and Tectonic Setting of Fuxingtun Formation in Zhangguangcai Range. *Earth Science*, 44(10): 3223-3236 (in

Chinese with English abstract).

- Jiang, S. Y., Chen, Y. Q., Ling, H. F., et al., 2006. Trace- and Rare-Earth Element Geochemistry and Pb-Pb Dating of Black Shales and Intercalated Ni-Mo-PGE-Au Sulfide Ores in Lower Cambrian Strata, Yangtze Platform, South China. *Mineralium Deposita*, 41(5): 453-467. https://doi.org/10.1007/s00126-006-0066-6
- Kalsbeek, F., Frei, R., 2010. Geochemistry of Precambrian Sedimentary Rocks Used to Solve Stratigraphical Problem: An Example from the Neoproterozoic Volta Basin, Ghana. Precambrian Research, 176:65-76.
- Li, S.R., Gao, Z.M., 1996. Silicalite of Hydrothermal Origin in Lower Cambrian Black Rock Series of South China. Acta Mineralogica Sinica, 16(4): 416-422 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J.J., Liu, Z.J., Yang, Y., et al., 2007. Research on the Organic Geochemistry and Biomarkers of the Large -Scale Barium Metallogenic Belt in the Southern Qinling Mountains, China. J. Mineral Petrol., 27(3): 39-48 (in Chinese with English abstract).
- Manikyamba, C., Kerrich, R., González-Álvarez, I., et al., 2008. Geochemistry of Paleoproterozoic Black Shales from the Intracontinental Cuddapah Basin, India: Implications for Provenance, Tectonic Setting, and Weathering Intensity. *Precambrian Research*, 162(3– 4): 424-440.
- McLennan, S. M., Hemming, S., Mcdaniel, D. K., 1993. Geochemical Approaches to Sedimentation, Provenance, and Tectonics. *Geological Society America Special Paper*, 284:21-40.
- Meng, E., Xu, W. L., Pei, F. P., et al., 2010. Detrital Zircon Geochronology of Late Paleozoic Sedimentary Rocks in Eastern Heilongjiang Province, NE China: Implications for the Tectonic Evolution of the Eastern Segment of the Central Asian Orogenic Belt. *Tectonophysics*, 485: 42–51.
- Mishra, M., Sen, S., 2010. Geological Signatures of Mesoproterozoic Siliciclastic Rocks of the Kaimur Group of the Vindhyan Supergroup, Central India. *Chin. J. Geochem.*, 20: 21-32.
- Moosavirad, S. M., Janardhana, M. R., Sethumadhav, M. S., 2011. Geochemistry of Lower Jurassic Shales of the Shemshak Formation, Kerman Province, Central Iran: Provenance, Source Weathering and Tectonic Setting. *Chemie der Erde*, 71:279-288.
- Paikaray, S., Banerjee, S., Mukherji, S., 2008. Geochemistry of Shales from Palaeoproterozoic to Neoproterozoic Vindhyan Supergroup: Implications on Provenance,

Tectonics and Paleoweathering. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32: 34–48.

- Ren, J.S., Niu, B.G., Liu, Z.G., 1999.Soft Collision, Superposition Orogeny and Polycyclic Suturing. *Earth Science Frontiers*, 6(3):85-93 (in Chinese with English abstract).
- Roser, B.P., Korsch, R.J., 1986. Determination of Tectonic Setting of Sandstone-Mudstone Suites Using SiO₂ Content and K₂O/Na₂O Ratio. *Geology*, 94: 635-650.
- Roser, B.P., Korsch, R.J., 1988. Provenance Signatures of Sandstone-Mudstone Suites Determined Using Discriminant Function Analysis of Major-Element Data. *Chemical Geology*, 67:119-139.
- Sengör, A. M. C., Natal' in, B. A., Burtman, V. S., 1993. Evolution of the Altaid Tectonic Collage and Palaeozoic Crustal Growth in Eurasia. *Nature*, 364: 299-307. https://doi.org/10.1038/364299a0
- Spalletti, L.A., Queralt, I., Matheos, S.D., 2008. Sedimentary Petrology and Geochemistry of Siliciclastic Rocks from the Upper Jurassic Tordillo Formation (Neuquen Basin, Western Argentina): Implications for Provenance and Tectonic Setting. *Journal of South American Earth Sciences*, 25: 440-463.
- Tang, K.D., Wang, Y., He,G.Q., et al., 1995. Continental-Margin Structure of Northeast China and Its Adjacent Areas. Acta Geologica Sinica, 69(1):16-30 (in Chinese with English abstract).
- Wang, H., Ling, W.L., Duan, R.C., et al., 2012. Os Isotopic Geochemistry of Neoproterozoic - Cambrian Black Shales in Eastern Three Gorges of Yangtze Craton and Its Geological Significance. *Earth Science*, 37(3): 451– 461 (in Chinese with English abstract).
- Wang, P.W., Chen, Z.H., Jin, Z.J., et al., 2019.Optimizing Parameter "Total Organic Carbon Content" for Shale Oil and Gas Resource Assessment: Taking West Canada Sedimentary Basin Devonian Duvernay Shale as an Example. *Earth Science*, 44(2):504-512 (in Chinese with English abstract).
- Wilde, S.A., Wu, F.Y., Zhang, X.Z., 2003. Late Pan-African Magmatism in Northeastern China: SHRIMP U-Pb Zircon Evidence for Igneous Ages from the Mashan Complex. *Precambrian Research*, 122:311-327.
- Wu, F.Y., Yang, J.H., Lo, C.H., et al., 2007. The Heilongjiang Group: A Jurassic Accretionary Complex in the Jiamusi Massif at the Western Pacific Margin of Northeastern China. *The Island Arc*, 16(1):156-172.
- Xie, H.Q., Miao, L.C., Chen, F.K., et al., 2008a. Characteristics of the "Mashan Group" and Zircon SHRIMP U-Pb Dating of Granite in Muleng Area, Southeastern Hei-

longjiang Province, China: Constraint on Crustal Evolution of the Southern most of Jiamusi Massif. *Geological Bulletin of China*, 27(12):2127–2137 (in Chinese with English abstract).

- Xie, H.Q., Zhang, F.C., Miao, L.C., et al., 2008b. Zircon SHRIMP U-Pb Dating of the Amphibolite from "Heilongjiang Group" and the Granite in Mudanjiang Area, NE China, and Its Geological Significance. Acta Petrologica Sinica, 24 (6): 1237-1250 (in Chinese with English abstract).
- Xu, W.L., Sun, C.Y., Tang, J., et al., 2019. Basement Nature and Tectonic Evolution of the Xing' an-Mongolian Orogenic Belt. *Earth Science*, 44(5):1620-1646 (in Chinese with English abstract).
- Xu, W.L., Wang, F., Meng, E., et al., 2012. Paleozoic-Early Mesozoic Tectonic Evolution in the Eastern Heilongjiang Province, NE China: Evidence from Igneous Rock Association and U-Pb Geochronology of Detrital Zircons. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 42(5):1378-1389 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, J.B., Shi, A.G., Jing, Y., 2016.Combined NE China Blocks: Tectonic Evolution and Supercontinent Reconstructions. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 46(4): 1042-1055 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, J.B., Wilde, S.A., 2013. The Crustal Accretion History and Tectonic Evolution of the NE China Segment of the Central Asian Orogenic Belt. *Gondwana Research*, 23:1365-1377.
- Zhou, J.B., Wilde, S.A., Zhang, X.Z., 2009. The Onset of Pacific Margin Accretion in NE China: Evidence from the Heilongjiang High-Pressure Metamorphic Belt. *Tectonophysics*, 478: 230-246.
- Zhou, J.B., Wilde, S.A., Zhang, X.Z., et al., 2011. Early Paleozoic Metamorphic Rocks of the Erguna Block in the Great Xing'an Range, NE China: Evidence for the Timing of Magmatic and Metamorphic Events and Their Tectonic Implications. *Tectonophysics*, 499: 105-117.
- Zhu, D.C., Zhu, L.D., Lin, L., et al., 2003. Organic Mineralization of Lead-Zinc Deposits in Devonian System, Xicheng Ore Field. *Earth Science*, 28(2): 201-208 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

方焱,何谋惷,丁振举,等,2020.黑龙江省东宁县五道沟金 矿成矿流体特征及矿床成因.现代地质,34(2): 254-265.

- 何雨思,高福红,修铭,等,2019.张广才岭福兴屯组的形成 颜词
- 时代、物源及构造背景.地球科学,44(10):3223-3236. 李胜荣,高振敏,1996.华南下寒武统黑色岩系中的热水成因

硅质岩.矿物学报,16(4):416-422.

- 刘家军,柳振江,杨艳,等,2007.南秦岭大型钡成矿带有机地 球化学特征与生物标志物研究.矿物岩石,27(3): 39-48.
- 任纪舜,牛宝贵,刘志刚,1999.软碰撞、叠覆造山和多旋回缝 合作用.地学前缘,6(3):85-93.
- 唐克东,王莹,何国琦,等,1995.中国东北及邻区大陆边缘构 造.地质学报,69(1):16-30.
- 王浩,凌文黎,段瑞春,等,2012.扬子克拉通峡东地区新元古 代一寒武纪黑色岩系Os同位素地球化学特征及其地 质意义.地球科学,37(3):451-461.
- 王鹏威,谌卓恒,金之钧,等,2019.页岩油气资源评价参数之 总有机碳含量的优选:以西加盆地泥盆系 Duvernay 页 岩为例.地球科学,44(2):504-512.

- 颉颃强,苗来成,陈福坤,等,2008a.黑龙江东南部穆棱地区 "麻山群"的特征及花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定 年——对佳木斯地块最南缘地壳演化的制约.地质通 报,27(12):2127-2137.
- 颉颃强,张福成,苗来成,等,2008b.东北牡丹江地区"黑龙 江群"中斜长角闪岩与花岗岩的锆石 SHRIMP U-Pb定 年及其地质学意义.岩石学报,24(6):1237-1250.
- 许文良,孙晨阳,唐杰,等,2019.兴蒙造山带的基底属性与构 造演化过程.地球科学,44(5):1620-1646.
- 许文良, 王枫, 孟恩, 等, 2012. 黑龙江省东部古生代一早中生 代的构造演化:火成岩组合与碎屑锆石 U-Pb年代学证 据. 吉林大学学报(地球科学版), 42(5):1378-1389.
- 周建波,石爱国,景妍,2016.东北地块群:构造演化与古大陆 重建.吉林大学学报(地球科学版),46(4):1042-1055.
- 朱弟成,朱利东,林丽,等,2003.西成矿田泥盆系铅锌矿床中 的有机质成矿作用.地球科学,28(2):201-208.