

# 胶西北新东庄金矿床蚀变岩岩石地球化学特征与成矿作用

宋志勇<sup>1</sup>, 向胤合<sup>2\*</sup>, 刘占坤<sup>3,4</sup>, 杨 斌<sup>3,4</sup>, 周 鑫<sup>3,4</sup>, 邹艳红<sup>3,4</sup>

(1. 招远市新东庄金矿有限公司; 2. 湖南五维地质科技有限公司;

3. 中南大学有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室; 4. 中南大学地球科学与信息物理学院)

**摘要:**新东庄金矿床位于招平断裂中段, 矿体主要沿中生代玲珑型花岗岩与胶东群变质岩接触带展布。黄铁绢英岩是主要矿化岩石, 矿体下盘玲珑型花岗岩主要发育红化蚀变, 上盘胶东群变质岩发育青磐岩化蚀变。主量元素分析结果显示, 红化花岗岩、黄铁绢英岩、绢英岩中  $K_2O$ 、 $SiO_2$ 、 $SO_3$  含量及  $LOI$  较原岩玲珑型花岗岩普遍增加, 为带入成分, 且在黄铁绢英岩、绢英岩等与矿化密切相关的岩石中增幅更大。在微量元素中,  $Rb$ 、 $U$  在红化花岗岩和黄铁绢英岩、绢英岩中普遍带入。新东庄金矿床的金成矿与氧逸度、酸碱性条件的变化密切相关, 金富集主要发生在还原性和偏酸性条件。

**关键词:**岩石地球化学; 蚀变岩; 成矿作用; 新东庄金矿床; 招平断裂; 玲珑型花岗岩

中图分类号: TD11 P618.51

文章编号: 1001-1277(2024)08-0089-05

文献标志码: A

doi: 10.11792/hj20240815

## 引 言

胶西北是中国最大的金矿集中区, 该区金矿的集中形成具有相似的成矿地质特征、成矿流体性质、同位素特征<sup>[1-9]</sup>。前人对胶西北金矿围岩蚀变的性质及其与成矿内在关系的研究较多, 但至今仍存在一些分歧。例如: 胶西北金矿的中生代花岗岩类围岩中普遍发育红化蚀变, 较普遍的观点称之为钾化<sup>[10-14]</sup>; 也有学者认为其是赤铁矿金红石化蚀变, 是暗色造岩矿物彻底蚀变的标志<sup>[15]</sup>; 还有学者提出其是一种组合蚀变, 蚀变矿物组合为钾长石、钠长石、赤铁矿、金红石、绿泥石、方解石<sup>[16]</sup>。因此, 尽管胶西北金矿的研究程度较高, 但关于蚀变矿物组合和成矿作用机理还有待进一步研究。

新东庄金矿床是胶西北典型构造蚀变岩型金矿床, 蚀变分带发育明显, 为研究热液蚀变作用与成矿作用机理提供了良好的地质条件。本文对新东庄金矿床红化花岗岩、黄铁绢英岩、绢英岩等主要蚀变岩的岩石地球化学特征进行研究, 分析不同蚀变岩的元素组成特点, 对比不同蚀变岩的差异, 探讨成矿作用机理。

## 1 矿区地质概况

新东庄金矿床位于招平断裂中段, 矿区内主要出露地层为太古界胶东群变质岩 ( $Arj$ ), 主要岩石组合

为斜长角闪岩、黑云母斜长变粒岩和黑云母斜长片麻岩等, 岩石发育不同程度的混合岩化。胶东群变质岩主要分布于矿区东部、招平断裂上盘。在矿区西部的中生代玲珑型花岗岩中可见其呈残留体状分布。矿区主要容矿构造为招平断裂, 走向北北东, 倾向南东东, 大致沿玲珑型花岗岩与胶东群变质岩接触带展布。除招平断裂外, 矿区内还发育 3 组次级断裂, 按走向大体可分为北北东向、北西向和近南北向。矿区内岩浆岩广布, 主要为中生代玲珑型花岗岩, 分布于矿区西部的招平断裂下盘。另外, 矿区内还有各种岩脉出露 (见图 1)。

矿区内矿体产于招平断裂主裂面下盘的蚀变岩——黄铁绢英岩中, 矿体形态、产状严格受招平断裂制约。矿体及其上、下盘围岩中发育明显蚀变分带, 从下盘向上盘依次出现: 玲珑型花岗岩→红化花岗岩→黄铁绢英岩 (或绢英岩)→断层泥→青磐岩化胶东群变质岩。其中, 断层泥是招平断裂主裂面的标志, 厚度数厘米至数十厘米, 发育黏土化蚀变。

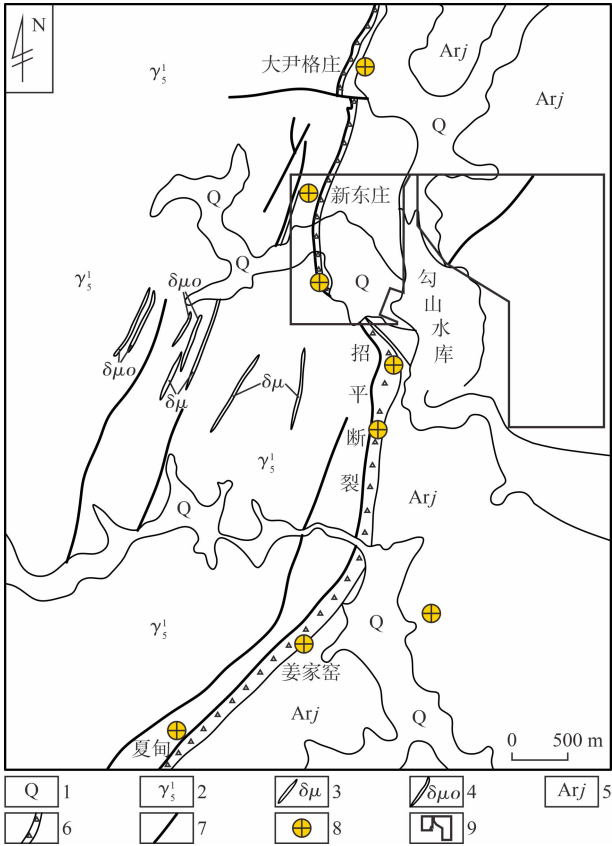
红化花岗岩和黄铁绢英岩 (或绢英岩) 的原岩主要为玲珑型花岗岩 (见图 2-a), 红化花岗岩 (见图 2-b) 出现了明显的红色特征, 较原岩中的暗色矿物如黑云母明显减少。在显微镜下, 红化花岗岩主要由石英、钾长石、钠长石组成, 见少量绢云母化 (见图 2-c)。黄铁绢英岩是新东庄金矿床的主要载金岩石, 该类岩石主要呈灰黑色, 矿物鉴定特征肉眼看不明

收稿日期: 2024-02-03; 修回日期: 2024-05-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42372346, 41872249)

作者简介: 宋志勇 (1982—), 男, 工程师, 从事矿山地质及采矿工作; E-mail: songzhiyong462@163.com

\* 通信作者: 向胤合 (1991—), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为矿产地质勘查; E-mail: 429428197@qq.com



1—第四系 2—中生代玲珑型花岗岩  
3—闪长玢岩脉 4—石英闪长玢岩脉  
5—胶东群变质岩 6—断裂破碎蚀变带  
7—断裂 8—金矿床(点) 9—新东庄金矿床勘查登记区

图1 新东庄金矿区地质简图

Fig. 1 Geological sketch of Xindongzhuang Gold District

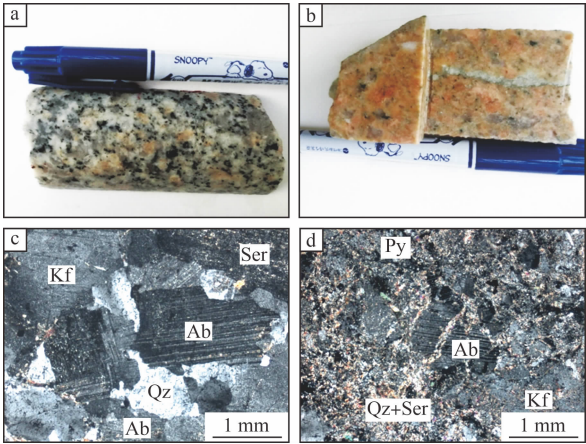
显,在显微镜下,能见到早期蚀变形成的钾长石、钠长石(见图2-d)发育强烈脆性碎裂特征,并且绢云母化蚀变十分强烈,常见黄铁矿。

2 蚀变岩石地球化学特征

本次研究的岩石样品类型主要包括玲珑型花岗岩等新鲜的中生代花岗岩类、胶东群变质岩,以及红化花岗岩、黄铁绢英岩和绢英岩等蚀变岩。其中,玲珑型花岗岩、红化花岗岩样品取自钻孔19ZK3,绢英岩和胶东群变质岩样品取自钻孔46ZK4,黄铁绢英岩样品取自新东庄金矿床井下巷道。

2.1 主量元素特征

新东庄金矿床岩石主量元素分析结果见表1。  
红化花岗岩、绢英岩和黄铁绢英岩的原岩均为玲珑型花岗岩。由表1可知:与玲珑型花岗岩相比,红化花岗岩中K<sub>2</sub>O含量明显升高,表明K<sub>2</sub>O为红化蚀变过程中的带入组分;红化花岗岩中SO<sub>3</sub>和LOI(烧失量)显著升高,显示红化蚀变过程中的S显著带入,H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>等挥发性组分也有显著带入<sup>[17]</sup>;红化



a—玲珑型花岗岩 b—红化花岗岩  
c—红化花岗岩中钾长石(Kf)、钠长石(Al)及局部发育绢云母(Ser)化蚀变  
d—黄铁绢英岩局部残留钠长石(Al)晶体,微细粒石英、绢云母(Qz + Ser)交代长石

图2 新东庄金矿床岩石标本与显微照片

Fig. 2 Rock specimen photos and micrographs in Xindongzhuang Gold Deposit

花岗岩中SiO<sub>2</sub>含量略有升高,也为红化蚀变中的带入组分;红化花岗岩中Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Na<sub>2</sub>O含量略显降低,CaO、MgO、TF<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MnO、TiO<sub>2</sub>、BaO、SrO含量普遍降低,为红化蚀变过程中的带出组分。

与玲珑型花岗岩相比,绢英岩和黄铁绢英岩中SO<sub>3</sub>含量大幅增加,K<sub>2</sub>O含量有显著增加,SiO<sub>2</sub>、MgO、TF<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量均有增加,表明这些组分在玲珑型花岗岩发生绢英岩化和黄铁绢英岩化过程中为带入组分;绢英岩和黄铁绢英岩中LOI大幅升高,显示H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>等挥发性组分在蚀变中有显著带入;绢英岩和黄铁绢英岩中Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Na<sub>2</sub>O、CaO、TiO<sub>2</sub>、BaO、SrO含量显示下降,与这些组分在绢英岩化和黄铁绢英岩化过程的带出有关。

绢英岩和黄铁绢英岩中K<sub>2</sub>O、MgO、TF<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SO<sub>3</sub>含量和LOI较红化花岗岩均有显著升高,显示这些组分及H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>等挥发性组分在玲珑型花岗岩发生绢英岩化和黄铁绢英岩化过程中带入的更多。绢英岩和黄铁绢英岩中Na<sub>2</sub>O、TiO<sub>2</sub>、BaO、SrO含量较红化花岗岩都有显著降低,显示这些组分在玲珑型花岗岩发生绢英岩化和黄铁绢英岩化过程中带出的更多。

2.2 微量元素特征

新东庄金矿床岩石微量元素分析结果见表2,微量元素原始地幔标准化蛛网图见图3-a)。

1)与玲珑型花岗岩相比,红化花岗岩中Rb、U、Ga含量普遍较高,显示蚀变过程中带入这些元素;Ba、Cs、Hf、Nb、Sr、Th、V、Zr含量相对较低,为蚀变作用中的带出成分。

2)与玲珑型花岗岩、红化花岗岩相比,绢英岩和

| 表 1 新东庄金矿床岩石主量元素分析结果                                                                  |        |                  |                                |                  |                   |      |      |                                 |      |                  |                               |      |       |                                |                 |      |
|---------------------------------------------------------------------------------------|--------|------------------|--------------------------------|------------------|-------------------|------|------|---------------------------------|------|------------------|-------------------------------|------|-------|--------------------------------|-----------------|------|
| Table 1 Analysis results of major elements of the rocks in Xindongzhuang Gold Deposit |        |                  |                                |                  |                   |      |      |                                 |      |                  |                               |      |       |                                |                 | %    |
| 样品编号                                                                                  | 岩性     | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | K <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O | CaO  | MgO  | TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MnO  | TiO <sub>2</sub> | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | BaO  | SrO   | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SO <sub>3</sub> | LOI  |
| 19ZK3-1                                                                               | 玲珑型花岗岩 | 68.25            | 16.40                          | 3.09             | 4.49              | 2.97 | 0.45 | 2.26                            | 0.07 | 0.20             | 0.05                          | 0.23 | 0.10  | 0.01                           | 0.03            | 0.92 |
| 19ZK3-2                                                                               | 玲珑型花岗岩 | 70.34            | 15.80                          | 2.68             | 4.50              | 2.91 | 0.43 | 2.12                            | 0.06 | 0.19             | 0.05                          | 0.19 | 0.09  | 0.01                           | 0.06            | 0.58 |
| 19ZK3-3                                                                               | 玲珑型花岗岩 | 68.75            | 16.37                          | 3.07             | 4.56              | 2.92 | 0.43 | 2.09                            | 0.07 | 0.20             | 0.05                          | 0.22 | 0.10  | 0.02                           | 0.03            | 0.66 |
| 19ZK3-4                                                                               | 玲珑型花岗岩 | 68.89            | 16.28                          | 3.36             | 4.43              | 2.85 | 0.42 | 2.20                            | 0.07 | 0.19             | 0.05                          | 0.24 | 0.12  | 0.02                           | 0.05            | 0.96 |
| 19ZK3-6                                                                               | 玲珑型花岗岩 | 67.82            | 15.70                          | 3.42             | 4.20              | 2.88 | 0.39 | 2.05                            | 0.06 | 0.19             | 0.05                          | 0.23 | 0.10  | 0.01                           | 0.06            | 2.84 |
|                                                                                       | 平均值    | 68.81            | 16.11                          | 3.12             | 4.44              | 2.91 | 0.42 | 2.14                            | 0.07 | 0.19             | 0.05                          | 0.22 | 0.10  | 0.01                           | 0.05            | 1.19 |
| 19ZK3-10                                                                              | 红化花岗岩  | 72.29            | 14.60                          | 3.95             | 4.34              | 1.42 | 0.16 | 0.99                            | 0.03 | 0.15             | 0.03                          | 0.22 | 0.05  | 0.02                           | 0.08            | 1.84 |
| 19ZK3-11                                                                              | 红化花岗岩  | 67.56            | 15.68                          | 3.35             | 4.76              | 3.08 | 0.40 | 1.21                            | 0.04 | 0.19             | 0.05                          | 0.22 | 0.07  | 0.02                           | 0.09            | 3.62 |
| 19ZK3-12                                                                              | 红化花岗岩  | 68.39            | 15.38                          | 3.18             | 4.38              | 2.49 | 0.40 | 1.58                            | 0.03 | 0.16             | 0.05                          | 0.13 | 0.07  | 0.02                           | 0.29            | 3.56 |
| 19ZK3-14                                                                              | 红化花岗岩  | 74.56            | 13.86                          | 4.89             | 3.74              | 1.14 | 0.07 | 0.81                            | 0.04 | 0.05             | <0.01                         | 0.05 | 0.03  | 0.01                           | <0.01           | 0.68 |
| 19ZK3-15                                                                              | 红化花岗岩  | 66.77            | 15.92                          | 2.72             | 4.81              | 2.95 | 0.35 | 1.77                            | 0.05 | 0.20             | 0.06                          | 0.23 | 0.08  | 0.04                           | 0.17            | 4.09 |
|                                                                                       | 平均值    | 69.91            | 15.09                          | 3.62             | 4.41              | 2.22 | 0.28 | 1.27                            | 0.04 | 0.15             | 0.05                          | 0.17 | 0.06  | 0.02                           | 0.16            | 2.76 |
| 46ZK4-16                                                                              | 绢英岩    | 73.13            | 12.92                          | 4.30             | 2.32              | 1.99 | 0.27 | 1.39                            | 0.10 | 0.06             | 0.01                          | 0.08 | 0.02  | 0.04                           | 0.18            | 2.93 |
| 46ZK4-21                                                                              | 绢英岩    | 67.45            | 15.47                          | 4.74             | 1.10              | 2.76 | 0.51 | 2.19                            | 0.17 | 0.15             | 0.04                          | 0.07 | 0.01  | 0.04                           | 0.34            | 4.47 |
| 46ZK4-23                                                                              | 绢英岩    | 67.82            | 12.76                          | 3.76             | 1.64              | 2.87 | 0.97 | 3.51                            | 0.33 | 0.11             | 0.03                          | 0.11 | 0.02  | 0.04                           | 1.13            | 5.26 |
|                                                                                       | 平均值    | 69.47            | 13.72                          | 4.27             | 1.69              | 2.54 | 0.58 | 2.36                            | 0.20 | 0.11             | 0.03                          | 0.09 | 0.02  | 0.04                           | 0.55            | 4.22 |
| XDZ-2153                                                                              | 黄铁绢英岩  | 72.56            | 13.00                          | 4.34             | 0.01              | 0.14 | 0.62 | 4.99                            | 0.01 | 0.15             | 0.04                          | 0.03 | 0.01  | 0.02                           | 7.09            | 3.77 |
| XDZ-2154                                                                              | 黄铁绢英岩  | 71.72            | 11.66                          | 3.83             | 0.01              | 0.25 | 0.58 | 6.53                            | 0.02 | 0.17             | 0.05                          | 0.02 | <0.01 | 0.02                           | 10.35           | 4.58 |
| XDZ-2155                                                                              | 黄铁绢英岩  | 79.77            | 10.60                          | 3.88             | <0.01             | 0.05 | 0.36 | 2.40                            | 0.01 | 0.06             | 0.01                          | 0.03 | <0.01 | 0.01                           | 2.74            | 1.84 |
| XDZ-2157                                                                              | 黄铁绢英岩  | 71.46            | 12.61                          | 4.22             | 0.01              | 0.16 | 0.61 | 6.26                            | 0.01 | 0.17             | 0.05                          | 0.03 | 0.01  | 0.01                           | 9.85            | 4.50 |
|                                                                                       | 平均值    | 73.88            | 11.97                          | 4.07             | 0.01              | 0.15 | 0.54 | 5.05                            | 0.01 | 0.14             | 0.04                          | 0.03 | 0.01  | 0.02                           | 7.51            | 3.67 |

注:测试单位为澳实分析检测(广州)有限公司。

| 表 2 新东庄金矿床岩石微量元素分析结果                                                                |        |       |     |      |      |     |      |        |         |     |       |      |     |     |    |                   |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------|-------|-----|------|------|-----|------|--------|---------|-----|-------|------|-----|-----|----|-------------------|
| Table 2 Analysis result of microelements of the rocks in Xindongzhuang Gold Deposit |        |       |     |      |      |     |      |        |         |     |       |      |     |     |    | ×10 <sup>-6</sup> |
| 样品编号                                                                                | 岩性     | Ba    | Cr  | Cs   | Ga   | Hf  | Nb   | Rb     | Sr      | Ta  | Th    | U    | V   | Zr  | Sn |                   |
| 19ZK3-1                                                                             | 玲珑型花岗岩 | 2 170 | 20  | 1.20 | 18.8 | 3.4 | 7.3  | 86.2   | 955.0   | 0.4 | 4.30  | 1.13 | 30  | 151 | 1  |                   |
| 19ZK3-2                                                                             | 玲珑型花岗岩 | 1 855 | 20  | 0.81 | 18.4 | 4.0 | 7.8  | 89.3   | 898.0   | 0.5 | 4.63  | 1.48 | 25  | 175 | 1  |                   |
| 19ZK3-3                                                                             | 玲珑型花岗岩 | 2 180 | 20  | 1.30 | 18.7 | 3.6 | 7.1  | 87.9   | 956.0   | 0.4 | 4.14  | 1.01 | 26  | 156 | 1  |                   |
| 19ZK3-4                                                                             | 玲珑型花岗岩 | 2 300 | 20  | 1.43 | 18.4 | 3.5 | 7.4  | 97.4   | 1 175.0 | 0.4 | 4.30  | 1.00 | 28  | 150 | 1  |                   |
| 19ZK3-6                                                                             | 玲珑型花岗岩 | 2 290 | 20  | 2.56 | 17.9 | 3.1 | 7.4  | 98.9   | 1 010.0 | 0.4 | 4.26  | 0.90 | 26  | 135 | 1  |                   |
|                                                                                     | 平均值    | 2 159 | 20  | 1.46 | 18.4 | 3.5 | 7.4  | 91.9   | 999.0   | 0.4 | 4.33  | 1.10 | 27  | 153 | 1  |                   |
| 19ZK3-10                                                                            | 红化花岗岩  | 2 150 | 20  | 0.31 | 18.4 | 3.7 | 5.0  | 90.4   | 494.0   | 0.1 | 6.07  | 1.08 | 8   | 139 | 1  |                   |
| 19ZK3-11                                                                            | 红化花岗岩  | 2 140 | 20  | 1.27 | 19.5 | 3.2 | 8.7  | 110.0  | 720.0   | 0.5 | 4.02  | 4.18 | 23  | 139 | 1  |                   |
| 19ZK3-12                                                                            | 红化花岗岩  | 1 300 | 20  | 2.04 | 19.4 | 3.2 | 7.2  | 104.0  | 646.0   | 0.4 | 3.43  | 1.63 | 23  | 128 | 2  |                   |
| 19ZK3-14                                                                            | 红化花岗岩  | 639   | 20  | 0.58 | 19.1 | 1.7 | 6.0  | 153.05 | 283.0   | 0.4 | 1.47  | 0.99 | 7   | 46  | 1  |                   |
|                                                                                     | 平均值    | 1 557 | 20  | 1.05 | 19.1 | 3.0 | 6.7  | 114.0  | 536.0   | 0.4 | 3.75  | 1.97 | 15  | 113 | 1  |                   |
| 46ZK4-21                                                                            | 绢英岩    | 754   | 20  | 1.58 | 21.3 | 3.0 | 10.2 | 217.0  | 110.5   | 0.7 | 3.50  | 2.24 | 22  | 120 | 2  |                   |
| 46ZK4-23                                                                            | 绢英岩    | 1 105 | 20  | 1.07 | 14.7 | 2.2 | 8.0  | 139.0  | 186.0   | 0.5 | 2.78  | 1.05 | 17  | 89  | 1  |                   |
|                                                                                     | 平均值    | 930   | 20  | 1.33 | 18.0 | 2.6 | 9.1  | 178.0  | 148.3   | 0.6 | 3.14  | 1.65 | 20  | 105 | 2  |                   |
| XDZ-2153                                                                            | 黄铁绢英岩  | 387   | 50  | 1.90 | 36.6 | 2.3 | 8.9  | 216.0  | 21.6    | 0.6 | 2.87  | 3.62 | 58  | 72  | 7  |                   |
| XDZ-2154                                                                            | 黄铁绢英岩  | 350   | 50  | 1.54 | 29.7 | 1.9 | 7.4  | 181.5  | 23.9    | 0.4 | 2.06  | 2.11 | 54  | 64  | 3  |                   |
|                                                                                     | 平均值    | 369   | 50  | 1.72 | 33.2 | 2.1 | 8.2  | 198.8  | 22.8    | 0.5 | 2.47  | 2.87 | 56  | 68  | 5  |                   |
| 46ZK4-26                                                                            | 胶东群变质岩 | 453   | 130 | 1.32 | 23.6 | 3.1 | 11.0 | 103.0  | 393.0   | 0.7 | 15.60 | 1.73 | 107 | 119 | 1  |                   |
| 46ZK4-28                                                                            | 胶东群变质岩 | 348   | 200 | 0.96 | 30.2 | 4.0 | 13.8 | 107.0  | 179.5   | 0.6 | 17.35 | 1.39 | 168 | 153 | 1  |                   |
| 46ZK4-30                                                                            | 胶东群变质岩 | 300   | 130 | 1.86 | 23.4 | 3.1 | 10.0 | 149.5  | 186.5   | 0.7 | 16.45 | 2.14 | 101 | 114 | 2  |                   |
|                                                                                     | 平均值    | 367   | 153 | 1.38 | 25.7 | 3.4 | 11.6 | 119.8  | 253.0   | 0.7 | 16.47 | 1.75 | 125 | 129 | 1  |                   |

注:测试单位为澳实分析检测(广州)有限公司。

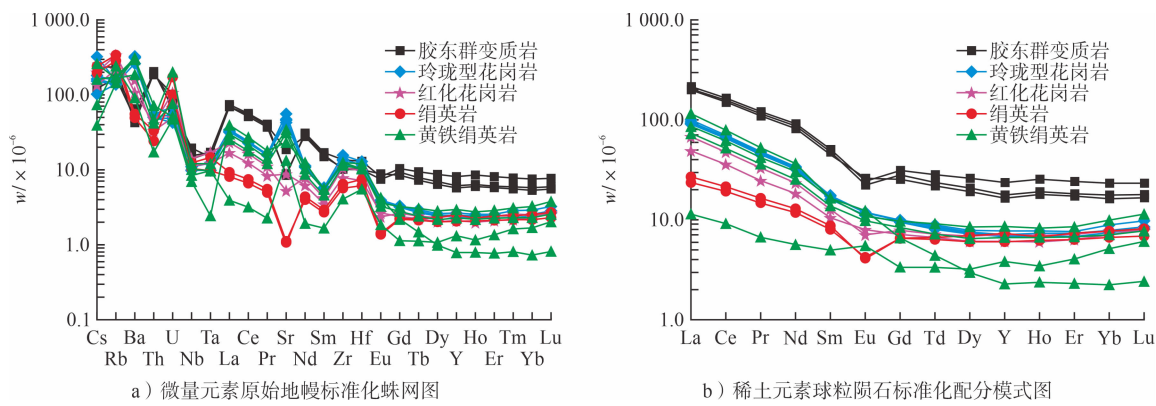


图3 新东庄金矿床岩石微量元素和稀土元素模式图

Fig.3 Patterns of microelements and rare earth elements of the rocks in Xindongzhuang Gold Deposit

黄铁绢英岩中 Nb、Rb、Ta、U、Sn 含量普遍较高,显示这些元素在矿化过程中带入的更多;然而,Ba、Hf、Sr、Th、Zr 和重稀土元素(如 Ho、Yb、Lu 等)明显带出更多。

Nb、Ta、Th、V、稀土元素含量普遍较高,Ba、Sr、Hf、Zr 含量普遍较低。

2.3 稀土元素特征

新东庄金矿床岩石稀土元素分析结果见表3,稀土元素球粒陨石标准化配分模式图见图3-b)。

3)与玲珑型花岗岩相比,胶东群变质岩中 Cr、

表3 新东庄金矿床岩石稀土元素分析结果

| Table 3 Analysis results of rare earth elements of the rocks in Xindongzhuang Gold Deposit |        |      |       |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | × 10 <sup>-6</sup> |      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|--------|------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------------------|------|
| 样品编号                                                                                       | 岩性     | La   | Ce    | Pr    | Nd   | Sm   | Eu   | Gd   | Tb   | Dy   | Ho   | Er   | Tm   | Yb   | Lu                 | Y    |
| 19ZK3-1                                                                                    | 玲珑型花岗岩 | 22.1 | 40.7  | 4.29  | 15.2 | 2.54 | 0.66 | 1.95 | 0.31 | 1.85 | 0.40 | 1.18 | 0.18 | 1.26 | 0.20               | 11.2 |
| 19ZK3-2                                                                                    | 玲珑型花岗岩 | 23.6 | 43.0  | 4.46  | 15.6 | 2.59 | 0.67 | 1.98 | 0.32 | 1.93 | 0.42 | 1.22 | 0.21 | 1.43 | 0.24               | 12.1 |
| 19ZK3-3                                                                                    | 玲珑型花岗岩 | 21.3 | 39.7  | 4.17  | 14.7 | 2.39 | 0.63 | 1.88 | 0.29 | 1.80 | 0.38 | 1.14 | 0.19 | 1.24 | 0.21               | 10.6 |
| 19ZK3-4                                                                                    | 玲珑型花岗岩 | 22.6 | 41.6  | 4.30  | 15.0 | 2.40 | 0.63 | 1.88 | 0.30 | 1.76 | 0.37 | 1.10 | 0.17 | 1.20 | 0.20               | 10.7 |
| 19ZK3-6                                                                                    | 玲珑型花岗岩 | 21.5 | 39.7  | 4.20  | 14.6 | 2.42 | 0.64 | 1.88 | 0.30 | 1.83 | 0.38 | 1.14 | 0.18 | 1.26 | 0.20               | 10.9 |
| 平均值                                                                                        |        | 22.2 | 40.9  | 4.28  | 15.0 | 2.47 | 0.65 | 1.91 | 0.30 | 1.83 | 0.39 | 1.16 | 0.19 | 1.28 | 0.21               | 11.1 |
| 19ZK3-10                                                                                   | 红化花岗岩  | 27.3 | 48.5  | 4.94  | 16.9 | 2.46 | 0.70 | 1.32 | 0.16 | 0.73 | 0.13 | 0.37 | 0.06 | 0.36 | 0.06               | 3.6  |
| 19ZK3-11                                                                                   | 红化花岗岩  | 20.5 | 37.8  | 3.92  | 14.0 | 2.45 | 0.61 | 1.93 | 0.33 | 2.08 | 0.45 | 1.37 | 0.23 | 1.60 | 0.28               | 13.4 |
| 19ZK3-12                                                                                   | 红化花岗岩  | 17.4 | 31.7  | 3.34  | 11.7 | 2.04 | 0.55 | 1.66 | 0.26 | 1.60 | 0.36 | 1.08 | 0.17 | 1.14 | 0.19               | 10.4 |
| 19ZK3-14                                                                                   | 红化花岗岩  | 2.7  | 5.6   | 0.62  | 2.6  | 0.74 | 0.31 | 0.67 | 0.12 | 0.79 | 0.19 | 0.65 | 0.12 | 0.83 | 0.15               | 6.0  |
| 平均值                                                                                        |        | 17.0 | 30.9  | 3.21  | 11.3 | 1.92 | 0.54 | 1.40 | 0.22 | 1.30 | 0.28 | 0.87 | 0.15 | 0.98 | 0.17               | 8.4  |
| 46ZK4-21                                                                                   | 绢英岩    | 16.0 | 29.3  | 3.08  | 10.8 | 1.88 | 0.40 | 1.56 | 0.26 | 1.69 | 0.38 | 1.15 | 0.19 | 1.24 | 0.19               | 11.2 |
| 46ZK4-23                                                                                   | 绢英岩    | 11.6 | 22.0  | 2.30  | 8.4  | 1.56 | 0.45 | 1.42 | 0.24 | 1.50 | 0.33 | 1.02 | 0.16 | 1.14 | 0.20               | 9.6  |
| 平均值                                                                                        |        | 13.8 | 25.7  | 2.69  | 9.6  | 1.72 | 0.43 | 1.49 | 0.25 | 1.60 | 0.36 | 1.09 | 0.18 | 1.19 | 0.20               | 10.4 |
| XDZ-2153                                                                                   | 黄铁绢英岩  | 6.4  | 13.2  | 1.53  | 5.9  | 1.30 | 0.23 | 1.30 | 0.23 | 1.49 | 0.34 | 1.01 | 0.16 | 1.08 | 0.17               | 9.4  |
| XDZ-2154                                                                                   | 黄铁绢英岩  | 5.6  | 11.8  | 1.38  | 5.4  | 1.19 | 0.24 | 1.32 | 0.24 | 1.71 | 0.37 | 1.18 | 0.18 | 1.25 | 0.20               | 11.5 |
| 平均值                                                                                        |        | 6.0  | 12.5  | 1.46  | 5.7  | 1.25 | 0.24 | 1.31 | 0.24 | 1.60 | 0.36 | 1.10 | 0.17 | 1.17 | 0.19               | 10.5 |
| 46ZK4-26                                                                                   | 胶东群变质岩 | 47.2 | 91.8  | 10.15 | 37.5 | 6.66 | 1.48 | 5.06 | 0.79 | 4.70 | 0.98 | 2.77 | 0.41 | 2.61 | 0.41               | 26.0 |
| 46ZK4-28                                                                                   | 胶东群变质岩 | 51.0 | 101.0 | 11.20 | 41.7 | 7.49 | 1.38 | 6.20 | 1.02 | 6.44 | 1.39 | 3.87 | 0.58 | 3.73 | 0.57               | 37.0 |
| 46ZK4-30                                                                                   | 胶东群变质岩 | 48.0 | 96.2  | 10.60 | 39.5 | 7.07 | 1.26 | 5.56 | 0.85 | 5.13 | 1.04 | 2.92 | 0.44 | 2.84 | 0.44               | 27.9 |
| 平均值                                                                                        |        | 48.7 | 96.3  | 10.65 | 39.6 | 7.10 | 1.37 | 5.60 | 0.89 | 5.42 | 1.14 | 3.19 | 0.48 | 3.06 | 0.47               | 30.3 |

注:测试单位为澳实分析检测(广州)有限公司。

由图3-b)可知:岩石均呈现出右倾的稀土元素配分模式,但不同岩石的稀土含量存在明显区别。其中,胶东群变质岩含量最高。

出现了明显负异常。

3 成矿作用分析

与新鲜玲珑型花岗岩相比,红化花岗岩、绢英岩和黄铁绢英岩中稀土元素含量普遍降低,显示蚀变过程中稀土元素普遍带出,并且在黄铁矿绢英岩中 Eu

与大尹格庄金矿床蚀变岩岩石化学特征<sup>[18]</sup>相比,新东庄金矿床蚀变岩中主量元素的变化规律具有明显相似性,如红化花岗岩、黄铁绢英岩、绢英岩中

$K_2O$ 、 $SiO_2$ 、 $SO_3$  含量及  $LOI$  较原岩玲珑型花岗岩普遍增加,且在黄铁绢英岩、绢英岩中增加幅度更大。该特征与蚀变岩中钾长石、绢云母的大量形成蚀变密切相关。研究显示,钾长石和钠长石是金的“清洁矿物”,其金质量分数多为  $10^{-10} \sim 10^{-11}$  数量级,当围岩中金的载体矿物如暗色矿物等被钾长石或钠长石交代时,常迫使金从岩石中浸出,并进入热液而被活化转移<sup>[10]</sup>。因此,在红化蚀变发生时, $K$ 、 $Na$  交换过程中, $Fe$  从晶格中被释放出来,并被氧化成赤铁矿包裹体<sup>[19]</sup>,故令红化蚀变产生明显的红色特征。

同时, $CaO$ 、 $MgO$ 、 $BaO$  等含量在红化花岗岩和黄铁绢英岩、绢英岩中较原岩玲珑型花岗岩普遍降低,且在黄铁绢英岩、绢英岩中降低幅度更大。这说明在蚀变过程中,成矿流体可能偏酸性,对上述元素进行了一定程度的活化。而  $TFe_2O_3$  含量在红化花岗岩中显著降低,在黄铁绢英岩中显著增加,与蚀变岩中黄铁矿的含量增加相对应。国外学者研究了加拿大 Kerr-Addison 太古代脉状金矿床的热液蚀变分带,发现金在碳酸盐—白云母和碳酸盐—钠长石蚀变类型之间富集,指出绿泥石化和碳酸盐化产生  $K$  和  $CO_2$ ,使  $H^+$  进入流体,造成  $pH$  降低,导致金沉淀<sup>[20]</sup>。在新东庄金矿区内,矿化相关蚀变出现了  $CaO$ 、 $MgO$ 、 $BaO$  等的富集,同时微量元素  $U$  含量在红化花岗岩和黄铁绢英岩、绢英岩中普遍增加,暗示成矿过程为高氧逸度环境。因此,新东庄金矿床出现的红化、碳酸盐化、青磐岩化蚀变形成于高氧逸度和偏碱性条件<sup>[16,21]</sup>。金在该环境下表现出了明显的活动性,在热液蚀变过程的局部电场或大地电场驱动下,金的活化与富集可能伴随出现了电化学反应<sup>[22]</sup>。

## 4 结 论

1) 新东庄金矿床矿体及其上、下盘围岩中发育明显的蚀变分带,红化花岗岩、黄铁绢英岩、绢英岩中  $K_2O$ 、 $SiO_2$ 、 $SO_3$  含量及  $LOI$  较原岩玲珑型花岗岩普遍增加,且在黄铁绢英岩、绢英岩中增加幅度更大。 $Al_2O_3$ 、 $Na_2O$ 、 $CaO$ 、 $TiO_2$  等在红化花岗岩和黄铁绢英岩、绢英岩中含量普遍性降低。 $TFe_2O_3$  含量在红化花岗岩中显著降低,在黄铁绢英岩中显著增加。

2) 与玲珑型花岗岩相比,红化蚀变花岗岩、绢英岩和黄铁绢英岩中稀土元素含量普遍降低,显示蚀变过程中稀土元素普遍带出。与玲珑型花岗岩相比,红化花岗岩、绢英岩和黄铁绢英岩中  $Rb$ 、 $U$  含量普遍升高, $Ba$ 、 $Sr$ 、 $Hf$ 、 $Zr$  含量降低,绢英岩和黄铁绢英岩元素的带入、带出更为明显,暗示了更高的蚀变强度。

3) 新东庄金矿床金在热液蚀变过程中与氧化还原条件、酸碱性条件密切相关,在成矿早期为高氧逸

度和偏碱性条件,金出现活化;在成矿期成矿流体氧逸度降低、偏酸性,金出现沉淀。该过程可能与电化学反应作用密切相关。

## 【参考文献】

- [1] 邓军,王庆飞,张良,等. 胶东型金矿成因模型[J]. 中国科学:地球科学,2023,53(10):2 323-2 347.
- [2] 孙丰月,石淮立,冯本智. 胶东金矿地质及幔源  $C-H-O$  流体成岩成矿[M]. 长春:吉林人民出版社,1995.
- [3] ZHAI M G, YANG J H, LIU W J. Large clusters of gold deposits and large-scale metallogenesis in the Jiaodong Peninsula, Eastern China[J]. Science In China Series D: Earth Sciences, 2001, 44(8):758-768.
- [4] 黄德业. 胶东金矿成矿系列硫同位素研究[J]. 矿床地质,1994,13(1):75-87.
- [5] 张连昌,沈远超,刘铁兵,等. 山东蓬家乔金矿硫铅碳氧同位素地球化学[J]. 矿物学报,2002,22(3):255-260.
- [6] 陈光远,邵伟,孙岱生. 胶东金矿成因矿物学与找矿[M]. 重庆:重庆出版社,1988.
- [7] 林文蔚,殷秀兰. 胶东金矿成矿流体同位素的地质特征[J]. 岩石矿物学杂志,1998,17(3):249-259.
- [8] 张理刚,陈振胜,刘敬秀,等. 焦家式金矿水-岩交换作用:成流体来源及成因[J]. 矿床地质,1994,13(3):193-200.
- [9] 翟建平,胡凯,陆建军. 山东乳山金矿床的流体包裹体和氢氧同位素地球化学研究[J]. 地球化学,1995,24(增刊1):141-149.
- [10] 胡受奚,赵乙英,孙景贵,等. 华北地台重要金矿成矿过程中的流体作用及其来源研究[J]. 南京大学学报(自然科学版),2002,38(3):381-391.
- [11] 吕承训,吴淦国,陈小龙,等. 新城金矿蚀变带构造与地球化学特征[J]. 大地构造与成矿学,2011,35(4):618-627.
- [12] 张炳林,杨立强,黄锁英,等. 胶东焦家金矿床热液蚀变作用[J]. 岩石学报,2014,30(9):2 533-2 545.
- [13] CAI Y C, FAN H R, SANTOSH M, et al. Decratonic gold mineralization: Evidence from the Shangzhuang Gold Deposit, eastern North China Craton[J]. Gondwana Research, 2018, 54:1-22.
- [14] ZHU Z Y, JIANG Y J, MATHUR R, et al. Iron isotope behavior during fluid/rock interaction in K-feldspar alteration zone—A model for pyrite in gold deposits from the Jiaodong Peninsula, East China[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2018, 222:94-116.
- [15] 陈光远,孙岱生,邵伟. 胶东金矿红化蚀变的实质与成因及其找矿意义[C]//地质出版社. 中国地质科学院地质研究所文集(29—30). 北京:地质出版社,1997:128-135.
- [16] 叶晓玉. 胶西北金矿床蚀变岩石学与矿物学研究[D]. 长沙:中南大学,2019.
- [17] 刘庚寅,杨斌,彭省临,等. 胶西北大尹格庄金矿岩石化学与成矿作用[J]. 中国有色金属学报,2012,22(3):743-750.
- [18] 朱兴明,周鑫,杨斌,等. 胶东金矿床蚀变岩石地球化学特征与水岩反应机理分析[J]. 黄金,2021,42(9):12-17.
- [19] KINNAIRD J. Hydrothermal alteration and mineralization of the alkaline anorogenic ring complexes of Nigeria[J]. Journal of African Earth Sciences, 1985, 3(1/2):229-251.
- [20] KISHIDA A, KERRICH R. Hydrothermal alteration zoning and gold concentration at the Kerr-Addison Archean lode gold deposit, Kirkland Lake, Ontario[J]. Economic Geology, 1987, 82(3):649-690.
- [21] 周鑫,杨斌,刘占坤,等. 胶西北大尹格庄金矿区青磐岩化与金成矿关系[J]. 黄金,2019,40(6):13-17.
- [22] 段磊,周鑫,杨斌,等. 胶西北金成矿电化学作用探析[J]. 黄金,2020,41(7):12-16.

(下转第98页)