

doi:10.3799/dqkx.2016.053

胶西北玲珑、焦家金矿田锆石(U-Th)/He 年龄 及其对成矿后剥露程度的指示

孙华山¹, 韩静波², 申玉科³, 刘 浏⁴, 冷双良⁵, 许 冲⁶,
杨巧梅¹, 葛风建¹, 欧阳淑冰¹, 邓 旭¹

1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074
2. 河北省地质矿产勘查开发局秦皇岛矿产水文工程地质大队, 河北秦皇岛 066000
3. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081
4. 广东省有色地质勘查院, 广东广州 510080
5. 湖北省地质调查院, 湖北武汉 430034
6. 河南省地质矿产勘查开发局第二地质勘查院, 河南许昌 461000

摘要: 玲珑和焦家矿田是胶西北地区最负盛名的两个金矿田。目前有关这两个矿田成矿研究的成果已十分丰富, 但是, 成矿后隆升剥蚀程度的研究尚属空白。为此, 利用最近兴起的低温热年代学技术, 对两个矿田成矿后剥露程度进行了尝试研究。结果表明, 玲珑矿田锆石(U-Th)/He 年龄主要为 80~100 Ma, 焦家矿田锆石(U-Th)/He 年龄主要为 90~105 Ma。这些年龄与前人运用其他方法获得的成岩成矿年龄不同, 其不是本区岩浆-热液成矿事件的年龄, 而是成矿后花岗岩隆升剥蚀的热年龄。基于锆石(U-Th)/He 年龄制约, 估算本区成矿后隆升剥蚀速率大致与全球造山型金矿剥露速率相当(大约 60 m/Ma)。玲珑矿田总体比焦家矿田成矿后多剥露了 600~900 m, 焦家矿田深部找矿潜力应比玲珑矿田大。

关键词: 锆石(U-Th)/He; 剥露程度; 胶西北金矿集中区; 矿产; 矿床学。

中图分类号: P62

文章编号: 1000-2383(2016)04-0644-11

收稿日期: 2015-06-29

Zircon (U-Th)/He Age and Its Implication for Post-Mineralization Exhumation Degree of Linglong and Jiaojia Goldfields, Northwest Jiaodong, China

Sun Huashan¹, Han Jingbo², Shen Yuke³, Liu Liu⁴, Leng Shuangliang⁵, Xu Chong⁶,
Yang Qiaomei¹, Ge Fengjian¹, Ouyang Shubing¹, Deng Xu¹

1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
2. Qinhuangdao Team of Mineral hydrological Geology, Bureau of Geology and Exploration of Hebei Province, Qinhuangdao 066000, China
3. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China
4. Guangdong Nonferrous Metals Geological Exploration Institution, Guangzhou 510080, China
5. Hubei Geological Survey, Wuhan 430034, China
6. No.2 Geo-Exploration Institute, Henan Bureau of Geo-Exploration and Mineral Development, Xuchang 461000, China

Abstract: The Linglong and Jiaojia goldfields are the two most famous goldfields in the Northwest Jiaodong with voluminous publication focused on gold mineralization. Whereas it is still a barren land as far to pay attention to the post-mineralization exhumation. Utilizing the latest low-temperature thermochronological technique, this work carries out a tentative research on the exhumation degree in the two goldfields. The results show that the zircon (U-Th)/He ages in Linglong goldfield vary predominantly between 80 and 100 Ma, while they are of significant concentration between 90 and 105 Ma in Jiaojia goldfield. These

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.41172087); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(No.CUG090102)。

作者简介: 孙华山(1969-), 男, 副教授, 主要从事成矿预测教学与科研工作。E-mail: sunhsh@cug.edu.cn

引用格式: 孙华山, 韩静波, 申玉科, 等, 2016. 胶西北玲珑、焦家金矿田锆石(U-Th)/He 年龄及其对成矿后剥露程度的指示. 地球科学, 41(4): 644-654.

ages yielded in this work are different from those of the previous obtained by other methods, they are not the geochronological ages in respond to magmatic-hydrothermal mineralization events, instead they must have recorded the thermochronological ages of the post-mineralization exhumation of the granitoid rocks. Based on the constrain of the zircon (U-Th)/He ages, it can be concluded that the degree of exhumation in this area is roughly in agreement with that from the statistics of the global orogenic gold deposits, about 60 m/Ma. The amount of post-mineralization exhumation in the Linglong goldfield is overall ca. 600—900 m more than that in the Jiaojia goldfield, so the prospecting potential at deep part is larger in the Jiaojia goldfield than that in the Linglong goldfield.

Key words: zircon (U-Th)/He; degree of exhumation; Northwest Jiaodong gold concentration area; mineral; ore deposit geology.

0 引言

矿床形成之后的隆升剥蚀程度是成矿系统研究及找矿评价的关键问题(翟裕生, 2000; 翟裕生等, 2000). 但是, 长期以来由于缺乏有效限定地质体剥露过程(时—空—体)的研究手段, 使得定量评价矿床隆升剥蚀程度一直是一个难题. 近年来, 热年代学(thermochronology), 尤其是锆石、磷灰石铀—钍—氦(ZHe、AHe)和裂变径迹(ZFT、AFT)等低温热年代学方法和技术的快速进步, 正在使时—空—体定量评价矿床隆升剥蚀程度成为可能. 例如, McInnes *et al.* (1999)首次通过磷灰石 AHe 和 AFT 低温热年龄相结合, 对智利 Chuquicamata 斑岩铜矿错断矿体断裂垂向位移量的研究, 不仅明确了该断裂上下盘位移方向, 而且明确了其垂向位移量为 600 m, 进而指明了错失矿体的可能赋存位置. Márton *et al.* (2010)通过⁴⁰Ar/³⁹Ar、ZFT 和 AFT 低温热年龄结合, 对一个沉积盆地中的金矿化系统形成、保存及剥蚀过程进行了全面恢复, 明确了矿床遭受后期构造快速隆升剥蚀的时间阶段, 指明了那些有利金矿后期保存的潜在找矿勘查靶区. 不过, 与浩如烟海的成矿年代学研究成果相比, 基于低温热年代学的矿床隆升剥蚀研究目前尚处于探索或案例积累阶段. 但是, 鉴于低温热年代学是对地质体隆升剥蚀过程的直接刻画 (Dodson, 1973; England and Molnar, 1990), 因此, 毋庸置疑, 该技术必将成为揭示矿床隆升剥蚀程度的强大工具. 本文选择的玲珑矿田和焦家矿田, 是胶西北地区最负盛名的两个金矿田. 目前有关这两个矿田成矿研究成果十分丰富, 但是, 关于成矿后矿田隆升剥蚀程度的研究基本上是空白. 这不仅限制了成矿系统研究的进一步深入, 而且更重要的是使深部找矿及资源潜力评价缺乏必要的科学依据. 为此, 本文借鉴最近兴起的低温热年代学技术, 对这两个矿田成矿后隆升剥蚀程度开展一次尝试性研究, 一方面希望能够填补两个矿田在此方面

的研究空白, 另一方面探索低温热年代学在本区应用的可行性.

1 矿田地质概况

关于玲珑、焦家两个金矿田成矿地质特征的参考文献已十分丰富(裘有守, 1988; 吕古贤和孔庆存, 1993; Qiu *et al.*, 2002), 在此仅作简要概述.

1.1 玲珑金矿田

玲珑金矿田位于招远市区东北部, 向北及向东延出招远进入龙口市, 面积约 70 km² (图 1). 矿田出露地层主要为太古界胶东群变质岩系和第四系. 胶东群呈残留体状分布于中生代花岗岩内部, 主要由黑云斜长片麻岩、角闪黑云斜长片麻岩、斜长角闪岩、浅粒岩和黑云母石英片岩组成. 矿田大面积出露中生代花岗岩, 主要有 3 种: 玲珑片麻状中细粒黑云母花岗岩、滦家河中粗粒二长花岗岩和郭家岭似斑状花岗闪长岩. 玲珑花岗岩出露面积约占 70%. 滦家河花岗岩主要分布在矿田东南部, 侵入到玲珑花岗岩内部. 郭家岭花岗岩发育于矿田东北部, 形成时期晚于玲珑花岗岩与滦家河花岗岩. 矿田内断裂构造发育, 按规模及空间结构关系, 可分为 3 个等级: I 级为破头青断裂, 分布在矿田东南部, 沿玲珑花岗岩和滦家河花岗岩接触带分布, 属于区域性招平断裂北延部分, 长约 7.5 km, 宽 100~200 m, 走向 NEE—NNE 向, 倾向 SE 向, 倾角为 30°~60°, 平面上呈弧形延伸, 是区内最大的控矿和容矿构造, 沿其内部, 自南向北依次产出有台上(即岭南)、九曲、阜山超大型—大型构造蚀变岩型金矿床; II 级断裂构造为数众多, 均属破头青断裂下盘的次级断裂, 长几百米至数千米, 宽数米至数十米, 走向 NE—NEE 向. 自破头青断裂向外, II 级断裂倾向具有由 SE→近直立→NW 的变化规律(吕古贤和孔庆存, 1993). 沿这些断裂构造产出有双顶、大开头、108 号脉组及欧家夤等大中型金矿床. 其中, 108 号脉是石英脉型金矿的典

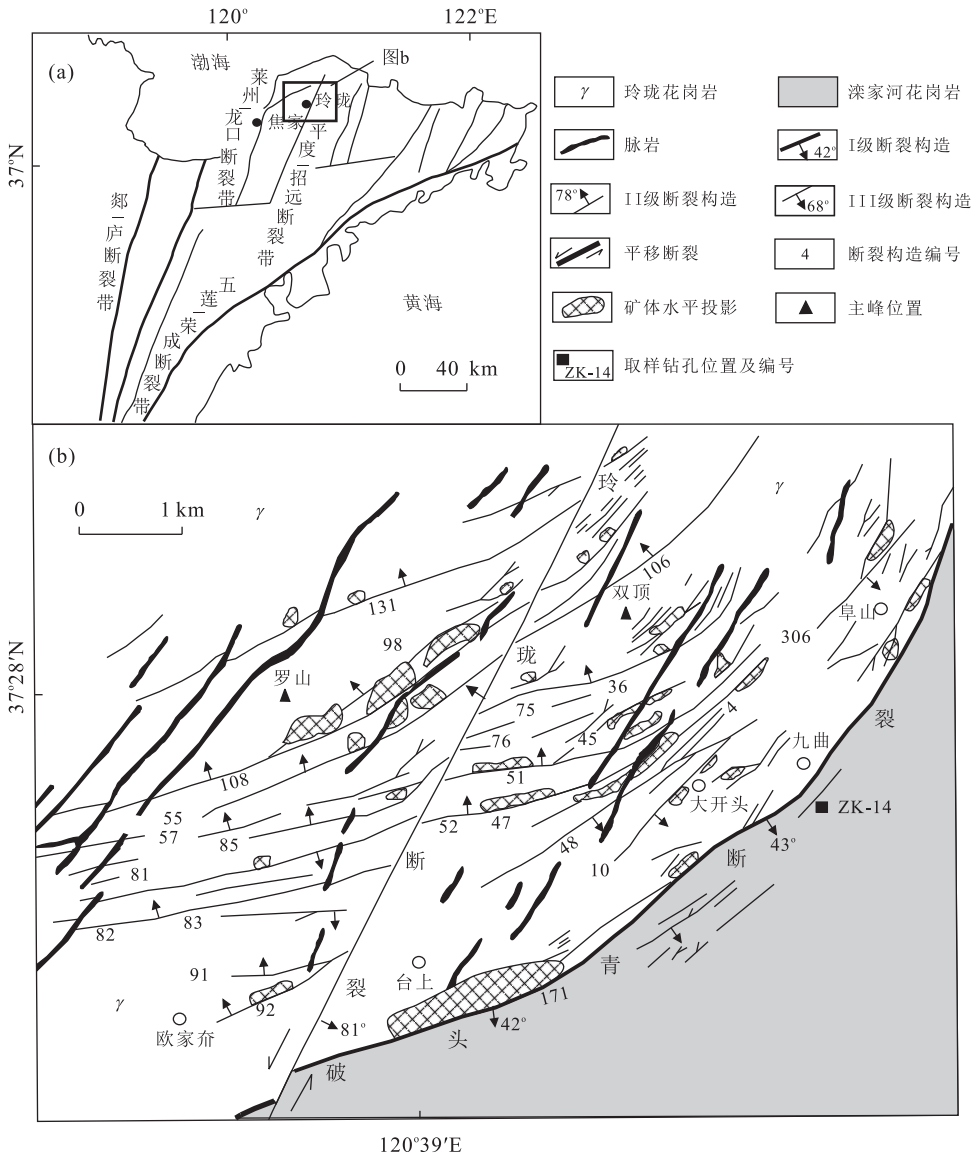


图 1 玲珑矿田位置(a)和地质图(b)

Fig.1 Location (a) and geological sketch (b) of Linglong goldfield

据吕古贤和孔庆存(1993);图中图例均为图 b 的图例

型代表;III级断裂构造属于II级断裂构造的分支断裂,走向NE-NNE,倾向SE或NW,倾角为70°~80°,走向长度一般不过数百米,宽多不足1m,这些断裂与II级断裂构造交汇部位常形成富矿体.玲珑金矿田发育的石英脉型矿体大都赋存于II级断裂和III级断裂构造形成的张扭性空间内.玲珑断裂属于成矿后断裂,产状陡直,具左行平移性质,在矿田南部将破头青断裂西段向南平移了大约400m.

1.2 焦家金矿田

焦家金矿田位于招远市区西北部,向西延出招远进入莱州市,面积约60km²(图2).矿田出露地层与玲珑矿田相似.矿田内发育的花岗岩主要为中生

代玲珑花岗岩和郭家岭花岗岩两种类型.玲珑花岗岩约占总面积的80%.郭家岭花岗岩主要出露在矿田中部,呈岩株状(即上庄岩体),该矿田发育的两类花岗岩岩性特征与玲珑矿田基本一致.断裂构造规模及结构关系亦分为3级.焦家断裂为I级构造,属区域性黄—掖弧形断裂带的中南段,走向NEE-NE,倾向NW,倾角为30°~40°,一般宽百余米,沿该断裂赋存寺庄、焦家、红埠、新城等超大型—大型构造蚀变岩型金矿床.望儿山断裂为II级构造,属焦家断裂下盘的次级构造,走向NE,倾向NW,沿该断裂发育望儿山、河东、上庄、界河等大—中型构造蚀变岩型金矿床.焦家断裂下盘的侯家、洼孙家等更

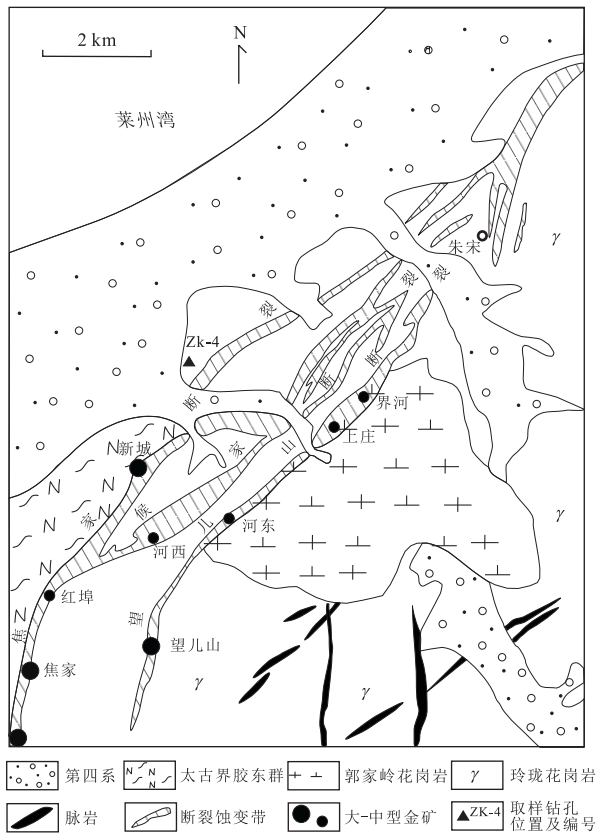


图2 焦家矿田地质图

Fig.2 Geological sketch of Jiaojia goldfield

据孙华山等(2008)修编

次级断裂为 III 级构造,走向 NE,倾向 NW,控制侯家、洼孙家等中一小型构造蚀变岩型金矿床或石英脉型金矿体的产出。

2 样品及测试分析

2.1 样品及其岩相学特征

本次工作在玲珑和焦家矿田各选择了一个千米钻孔作为研究对象。玲珑矿田取样钻孔编号 ZK14 (图 1),孔深 1 500 m 左右,自上而下采集了 4 件玲珑花岗岩样品,样品间隔大约为 400 m。其中,ZK14-2、ZK14-4 两件样品位于破头青断裂带上盘,ZK14-6 样品位于破头青断裂带内部,ZK14-8 样品位于破头青断裂带下盘。焦家矿田取样钻孔编号 ZK4 (图 2),孔深 1 000 m 左右,自上而下也采集了 4 件样品,样品间隔大约 200 m,所有样品均来自焦家断裂下盘的郭家岭花岗闪长岩。其中,ZK4-5 样品已进入焦家断裂下盘的次级构造——望儿山断裂内部。为避免成矿后期热事件的影响,所有样品采集过程中尽可能选择新鲜岩石并且离脉岩至少 20 m。图 3

进一步展示了取样钻孔坐标、采样空间分布和样品岩相学特征。由图可见,本次两个矿田采集的花岗岩样品,显微镜下花岗结构保留完整,原岩矿物遭受热液蚀变不强烈,原岩中的暗色矿物(黑云母)仍清晰可见(ZK14-2, ZK4-3),只见少量绿泥石化和粘土化,构造蚀变岩型金矿中广泛发育的绢云母化、硅化、黄铁矿化及碎裂岩结构均不发育。由此表明,本次采集的样品,后期构造变形及热液蚀变微弱。

2.2 测试分析

锆石单矿物分选在河北省廊坊区域地质调查研究所完成,采用重液—电磁联合分离技术。分离后的锆石矿物集合体在双目镜下进一步挑选,从中选取形态完整、透明、不含子矿物(富 U/Th 子矿物或包裹体对 ZHe 年龄影响显著)、裂隙不发育、粒径不小于 60 μm 的锆石颗粒(粒度越小对 ZHe 年龄 F_i 校正影响越大;Farley, 2000)。ZHe 定年在澳大利亚科庭大学 John de Laeter Centre (JDLC) 低温热年代学实验室完成。测试流程如下:首先,将双目镜下挑选出的锆石颗粒在显微下照相和测量粒径三维长度,用于测试年龄的 F_i 校正 (Farley *et al.*, 1996)。然后,将待测锆石颗粒及锆石标样 (Sailor's Creek Zircon) 分别放入金属铌箔制成的试管内,放在 1 064 nm Nd-YAG 激光器下加热,锆石脱气,抽取 ^4He ,利用同位素稀释法(纯 ^3He 做稀释剂)测量 ^4He 含量。该实验室锆石 ^4He 测量误差 $< 1\%$ 。将脱气后的铌试管(包括样品和标样)从激光器取出,分别放入 Parrish 瓶,向每个瓶内加入 350 μL 浓缩 HF 和 25 μL 浓度 15 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的 ^{235}U - ^{230}Th 混合稀释剂,将这些瓶放入一个 Parr 高压釜(可容 9 个 Parrish 瓶),为保持 Parrish 瓶内外压平衡,需要向高压釜内加入 10 mL 低浓度的 HF 和 420 μL 低浓度的 HNO_3 。封住高压釜加热至 240 $^\circ\text{C}$ 溶解 40 h,然后冷却至室温(约 5 h)。将 Parrish 瓶放在电热板上低温蒸发 2 d,这时溶液内部会有氟化物盐类沉淀。为避免沉淀盐类中有 U、Th 的析出,需要将沉淀的盐类再次溶解。向 Parrish 瓶内加入 350 μL 的 HCl,然后将 Parrish 瓶放入另一个 Parr 高压釜,注入 9 mL 的 HCl,封住高压釜加热至 200 $^\circ\text{C}$ 溶解 24 h。将 Parrish 瓶中溶液转移到一个容量 2 mL 的 Teflon 试管内,蒸发至 50 μL ,加入 300 μL 超纯水,利用 Agilent 7500CS ICPMS 质谱仪测量溶液的 U、Th 含量。总体上,JDLC 实验室 ZHe 定年误差 $< 6\%$ 。欲了解更详细的 ZHe 测试流程可参考 Evans *et al.* (2005)。

表 1 玲珑和焦家矿田花岗岩锆石(U-Th)/He 测试结果

Table 1 The results of zircon (U-Th)/He dating for the Linglong and Jiaojia goldfields

矿田	样品	高程(m)	U(10^{-6})	Th(10^{-6})	Th/U	He(mL/min)	未校正年龄	2σ	F_1	校正年龄(Ma)	2σ
玲珑矿田	ZK14-2	-150.8	900	220	0.24	28.30	61.45	5.0	0.74	83.4	7.6
	ZK14-2		1 290	323	0.25	27.40	70.67	5.4	0.71	99.9	8.8
	权重平均		—	—	—	—	65.70	3.8	—	90.6	5.8
	ZK14-4	-511.8	219	103	0.47	8.73	60.24	4.0	0.79	76.7	5.2
	ZK14-4		995	322	0.32	27.20	66.62	5.0	0.74	89.8	7.6
	ZK14-4		182	49	0.27	2.86	54.30	3.8	0.72	75.9	6.2
	权重平均		—	—	—	—	59.45	2.4	—	79.3	3.6
	ZK14-6	-966.8	340	153	0.45	7.53	63.85	4.0	0.73	88.0	6.4
	ZK14-6		421	119	0.28	6.60	59.12	3.8	0.71	83.3	6.2
	ZK14-6		619	135	0.22	11.70	60.80	4.6	0.72	84.1	7.2
	权重平均		—	—	—	—	61.22	2.4	—	85.2	3.8
	ZK14-8	-1 369.8	550	145	0.26	21.40	73.38	5.6	0.78	93.7	7.0
	ZK14-8		704	169	0.24	29.80	74.91	6.8	0.79	95.1	8.6
	ZK14-8		593	140	0.24	22.40	71.64	5.6	0.79	90.5	7.2
权重平均	—		—	—	—	73.13	3.4	—	92.7	4.4	
焦家矿田	ZK4-2	-315.8	1 062	241	0.23	10.60	70.28	6.4	0.69	102.3	10.2
	ZK4-2		1 055	245	0.23	6.71	64.93	4.0	0.64	102.2	12.0
	权重平均		—	—	—	—	66.44	3.4	—	102.2	7.8
	ZK4-3	-505.8	1 292	130	0.10	54.90	84.65	7.2	0.76	112.0	10.4
	ZK4-3		541	93.3	0.17	16.40	80.83	6.2	0.74	109.9	9.6
	ZK4-3		831	109	0.13	11.70	59.34	4.8	0.69	85.4	7.6
	权重平均		—	—	—	—	67.21	3.8	—	99.1	5.2
	ZK4-4	-720.8	1 085	134	0.12	27.00	69.33	5.2	0.74	93.3	7.8
	ZK4-4		932	172	0.18	9.05	62.38	4.0	0.66	95.0	7.0
	ZK4-4		444	86	0.19	6.14	67.01	4.6	0.66	101.0	8.0
权重平均	—		—	—	—	64.36	3.0	—	96.3	4.4	
ZK4-5	-970.8	2 225	177	0.08	23.40	51.94	4.0	0.66	78.4	6.8	
ZK4-5		365	110	0.30	6.80	51.65	3.4	0.75	69.2	5.2	
权重平均		—	—	—	—	51.77	2.6	—	72.6	4.2	

注:权重平均年龄 $=Y/X$;其中, $X=\text{SUM}(X_1, \dots, X_n)$, X_n 为第 n 个样品测试误差平方的倒数。 $Y=\text{SUM}(Y_1, \dots, Y_n)$, Y_n 为第 n 个样品测试年龄与 X_n 的乘积;权重平均误差为 X 平方根的倒数。

2006)研究表明,影响 ZHe 年龄变化的因素很多,包括晶体形态、粒径大小、破损程度、裂隙、赋含 U、Th 元素的子矿物包裹体及 U、Th 等放射性元素的均匀分布程度.因此,在当前技术水平下,即使在前期锆石颗粒选择过程中考虑了以上因素的影响,仍然难以杜绝这些影响因素的出现.尽管如此,从所测试颗粒年龄分布来看(图 3,表 1),焦家矿田锆石颗粒 ZHe 年龄主要为 90~105 Ma,而玲珑矿田 ZHe 年龄主要为 80~100 Ma,玲珑矿田总体比焦家矿田 ZHe 年龄小的趋势还是比较清楚的。

4 讨论

4.1 ZHe 年龄的地质意义

众所周知,放射性同位素年龄代表了相应同位素体系降至其封闭温度的时间.锆石(U-Th)/He 同

位素封闭温度范围为 200~160 °C(Reiners *et al.*, 2004).因此,本文获得的花岗岩 ZHe 年龄代表了赋含锆石的花岗岩温度降至 200 °C 左右时的时间.由于锆石(U-Th)/He 同位素封闭温度相对较低,很容易受到多种地质因素的影响,如岩浆—热液作用、脉体侵位、构造运动、埋藏作用等.因此,本文获得的 ZHe 年龄代表了哪种地质作用需要明确.不可否认,本次获得的 ZHe 年龄明显比玲珑和郭家岭花岗岩成岩年龄(锆石 SHRIMP, 160~153 Ma 和 130±3 Ma;苗来成等,1997;Wang *et al.*,1998)小,也比本区金矿床成矿年龄(绢云母 Ar-Ar, 120±2 Ma;Li *et al.*,2003;Zhang *et al.*,2003)小.但是,由于锆石(U-Th)/He 同位素封闭温度远低于锆石 U-Pb 同位素封闭温度(750±50 °C;Lee *et al.*,1997)和绢云母 Ar-Ar 同位素封闭温度(350±50 °C;Harrison *et al.*,1985),ZHe 年龄与花岗岩成岩和热液成矿年

龄不同,不表明 ZHe 年龄与成岩—成矿热事件无关,ZHe 年龄有可能是成岩—成矿热事件延续至 200 °C 左右的时间记录。

本次获得的花岗岩 ZHe 年龄是否与本区广泛发生的岩浆—热液事件有关? 已有研究表明 (McInnes *et al.*, 2005; Fu *et al.*, 2010), 一般的岩浆—热液成矿系统热史演化包含了 3 个阶段: (1) 岩浆结晶分异作用阶段; (2) 岩浆期后热液作用阶段; (3) 岩体冷却剥露阶段。其中, 前两个阶段, 岩体比围岩温度高, 热不平衡, 岩体向围岩有热传导。后一个阶段, 岩体与围岩达到了热平衡, 岩体与围岩温度相同。从岩浆—热液作用阶段到岩体冷却作用阶段是一个逐渐转变的过程, 理论上二者之间应存在一个转变温度点 (亦称冷却点, cooled point; McInnes *et al.*, 2005)。因此, 当岩体—热液成矿系统冷却点温度高于锆石 (U-Th)/He 封闭温度时, 锆石 (U-Th)/He 定年体系不受岩体—热液成矿系统影响, 仅在岩体因埋藏深度变化而冷却至锆石 (U-Th)/He 封闭温度时开始计时; 反之, 如果岩体—热液成矿系统冷却点温度低于锆石 (U-Th)/He 封闭温度时, 锆石 (U-Th)/He 定年体系会记录岩体—热液成矿系统在冷却过程中穿越其封闭温度时的时间。本区岩浆—热液成矿系统冷却点温度比锆石 (U-Th)/He 同位素封闭温度高还是低呢? 基于岩体冷却时, 岩体与围岩温度平衡的原理, 可以通过岩体侵位深度估算岩体埋藏温度, 进而限定岩体冷却温度。已有研究表明, 本区玲珑和郭家岭花岗岩侵位深度均在 10 km 以上 (陈光远, 1993; 张华锋等, 2006; 陆丽娜等, 2011), 按晚侏罗世—早白垩世本区地温梯度 35 °C/km 计算 (翟明国等, 2004), 玲珑和郭家岭岩体冷却温度在 350 °C, 远高于锆石 (U-Th)/He 同位素封闭温度。此外, 大量的成矿流体包裹体测温结果显示, 本区金矿床成矿流体温度主要变化于 250~350 °C (Fan *et al.*, 2003; Goldfarb and Santosh, 2013; Wang *et al.*, 2015; Wen *et al.*, 2015), 同样高于锆石 (U-Th)/He 同位素封闭温度, 因此, 可以肯定本文所得到的 ZHe 年龄与本区广泛存在的岩浆—热液成矿事件无关。

此外, 样品照片 (图 3) 所展示的新鲜程度和原岩结构也排除了后期热液作用的影响。Reiners (2005) 和 Evans *et al.* (2013) 均证明一条宽度数十米的脉岩对其外侧 10 m 远的地质体 ZHe 年龄没有影响。本次采样过程中, 取样位置要么没有脉岩出现, 要么样品距离脉岩 20 m 以上, 进而排除了 ZHe

年龄受脉岩侵位影响的可能。构造运动对锆石和磷灰石 (U-Th)/He 年龄有影响已被反复证实 (Stockli *et al.*, 2000; Ehlers *et al.*, 2001)。本文得到的 ZHe 年龄中, 处于焦家矿田焦家主断裂下盘次级断裂—望儿山断裂中的 ZK4-5 样品, 其 ZHe 年龄 (权重平均值为 72.6 ± 4.2 Ma) 明显小于同一个钻孔上面 3 个样品的年龄, 可能与断裂构造运动导致锆石 (U-Th)/He 同位素系统 ^4He 丢失有关。同时, 也不排除这个样品可能处于 ZHe 的部分保留带 (Partial Retention Zone) 位置, 由于 ^4He 丢失导致年龄变小。此外, 玲珑矿田 ZK14-8 样品位于破头青断裂下盘, 与破头青断裂上盘及构造带内部样品 (ZK14-2、ZK14-4 和 ZK14-6) 相比, 其年龄不降反升, 与热年代学年龄—高程分布关系不符 (Ehlers, 2005; 常远等, 2010), 是否与其所处的断裂构造下盘位置有关仍然值得探讨。综上, 笔者认为, 本次研究所得到的 ZHe 年龄主体与本区广泛存在的岩浆—热液成矿事件和脉岩侵位事件无关, 而是代表了成矿后花岗岩体隆升剥蚀的热年龄, 个别样品与构造作用关系有待进一步研究明确。

4.2 ZHe 年龄对成矿后两个矿田剥露程度及深部资源潜力的制约

由上可见, 本文获得的 ZHe 年龄与前人获得的地质年龄不同, 它代表的不是成岩、成矿热事件年龄, 而是成岩、成矿之后地质体的埋藏隆升热年龄 (thermochronological age)。其控制因素不是岩浆—热液作用, 而是构造剥露和地表侵蚀作用 (England and Molnar, 1990), 应遵循热年代学的基本原理。即埋藏在深部的地质体由地壳深部逐渐剥露到地表的过程也是岩石经由高温逐渐冷却到低温的过程, 其内部的各种同位素系统也相应冷却至各自的封闭温度并开始记录年龄 (Dodson, 1973)。据此, 不难理解, 对空间上一个如同钻孔大小的柱状地质体而言, 自上而下, 其热年龄应当具有逐渐变小的趋势。因此, 笔者可以通过两个地质体热年龄的大小对比, 推断其相对剥露程度。不过需要指出, 地质体的剥露 (exhumation, 是指深部物质向地表运移的过程) 受构造运动和地表侵蚀联合因素的影响 (England and Molnar, 1990)。由于缺乏沉积地层的制约, 笔者很难进一步区分构造运动和地表侵蚀的各自剥露量。但肯定的是: 地质体总体剥露程度越强, 其遭受的地表侵蚀也越强。柳振江等 (2010) 也是基于这一原则, 通过磷灰石裂变径迹年龄, 得出与全区平均隆升剥蚀程度相比, 本区主要金矿田空间上与隆升剥蚀程度

较低部位吻合的结论。

本文获得的 8 个 ZHe 年龄,排除两个可能由构造运动导致的异常年龄(ZK14-8 和 ZK4-5),其他 6 个 ZHe 年龄基本上遵循了上述热年代学的原理,尤其是焦家矿田的 3 个样品,自上而下,其 ZHe 权重平均年龄由 102.3 ± 7.8 Ma \rightarrow 99.1 ± 5.2 Ma \rightarrow 96.3 ± 4.4 Ma,尽管在误差允许范围内相同,但总体上具有由大变小的趋势。玲珑矿田 ZHe 年龄,自上而下,没有严格遵循由大至小的规律, 90.6 ± 5.8 Ma \rightarrow 79.3 ± 3.6 Ma \rightarrow 85.2 ± 3.8 Ma,但仍然具有由大变小的趋势。尤其明确的是,玲珑矿田 ZHe 年龄总体比焦家矿田小了 10 ~ 15 Ma,由此可以判断玲珑矿田总体要比焦家矿田剥露程度大。此外,根据获得的 ZHe 年龄,可以对成矿后隆升剥蚀速率进行估算。其一,利用焦家矿田上面 3 个遵循热年代学原理的样品做年龄-高程图解(图 4),其拟合直线斜率 67 m/Ma,大致代表了成矿后 110~95 Ma 时间段的剥露速率。其二,根据锆石(U-Th)/He 封闭温度(200 °C; Reiners *et al.*, 2004),结合古地温梯度(其中,早白垩纪 35 °C/km,据翟明国等, 2004; 目前 28 °C/km,引自汪集旸和黄少鹏, 1990; 100 Ma 以来地温梯度大约 30 °C/km,地表温度为 15 °C),估算 100 Ma 锆石(U-Th)/He 计时时的埋藏深度大约为 6 km, 100 Ma 以来隆升剥蚀速率大约为 60 m/Ma。二者虽然有所不同,但是,考虑到晚白垩纪以来(<75 Ma),本区总体处于构造稳定阶段(大规模岩石圈减薄导致的快速构造剥露作用已经不存在; Xu, 2001; Xu *et al.*, 2004, 2009), 100 Ma 以来的隆升剥蚀速率比 110~95 Ma 时间段低是很有可能的。此外,尤其值得指出的是,由本文 ZHe 年龄制约得到的成矿后剥露速率也与 Kesler and Wilkinson (2006, 2009) 统计得出的世界范围内造山型金矿平均剥露速率相当(63 m/Ma)。故此,笔者认为本区成矿后总体隆升剥蚀速率大致与全球统计的造山型金矿平均剥露速率相当。据此隆升剥蚀速率,鉴于玲珑矿田 ZHe 年龄普遍较焦家矿田年轻了 10~15 Ma,估算玲珑矿田成矿后总体剥露量可能比焦家矿田多了 600~900 m。

此外,值得关注的是,近年来在危机矿山深部找矿项目资助下,胶西北地区实施了一批深部找矿钻孔工程。初步揭露显示,玲珑矿田地表之下 2 000 m 左右金矿化已显著变弱,焦家矿田 2 000 m 以下金矿化仍然较强,尤其是山东黄金在三山岛和焦家矿田之间实施的 3 000 m 钻孔,在 2 600 m 左右仍然见到厚度达

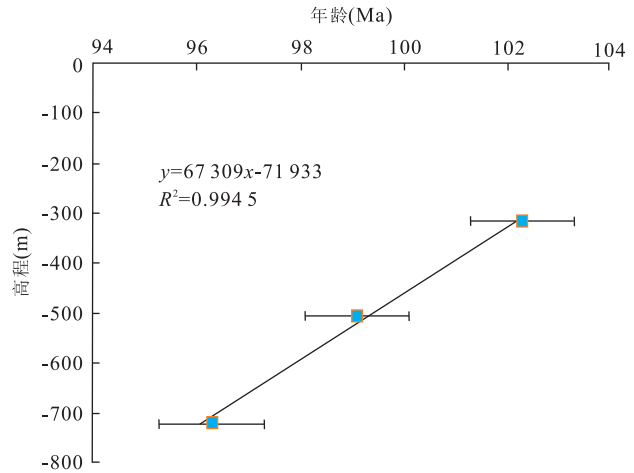


图 4 焦家矿田 ZK4 上部 3 个样品 ZHe 年龄-高程图解
Fig.4 Age-elevation plot of the upper three samples from the borehole ZK4 in Jiaojia goldfield

30 余米的金矿化(据山东黄金总地质师王昭坤介绍),表明焦家矿田金矿化比玲珑矿田向下多延伸了至少 700 m,这个数值恰好落在了本文得到的两个矿田成矿后剥露量变化范围之内,在一定程度上支持了本文关于 2 个矿田隆升剥露程度的认识。

5 结论

通过本文研究,得到的主要结论包括:(1)胶西北地区中生代花岗岩大面积出露,岩浆-热液成矿事件对锆石(U-Th)/He 同位素体系影响不大,因此,本文得到的 ZHe 年龄与前人得到的成岩、成矿年龄不同,ZHe 年龄是记录成矿后花岗岩体隆升剥蚀过程的热年龄。(2)基于 ZHe 年龄制约,估算本区成矿后剥露速率大致与全球造山型金矿隆升剥蚀率相当,玲珑矿田比焦家矿田估计多剥露了 600~900 m,焦家矿田深部应比玲珑矿田有更大的找矿潜力。

致谢:感谢两位匿名审稿人为论文质量提高所给予的建设性意见。在野外钻孔取样过程中得到了山东黄金玲珑金矿、招金股份蚕庄金矿及山东地质矿产勘查开发局第三地质队的大力帮助。期间与山东黄金王昭坤总地质师及招金集团勘探部丛培章总经理进行了有益探讨。在此对以上单位及个人深表谢忱!

References

Boyce, J. W., Hodges, K. V., Olszewski, W. J., et al., 2006. La-

- ser Microprobe (U-Th)/He Geochronology. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70 (12): 3031 – 3039. doi: 10.1016/j.gca.2006.03.019
- Chang, Y., Wang, W., Zhou, Z. Y., 2010. Age-Elevation Relationship Method Limited by the Topographic Relief over the Sampling Transect. *Chinese Journal of Geophysics*, 53 (8): 1868 – 1874 (in Chinese with English abstract).
- Chen, G. Y., 1993. Genetic Mineralogy and Gold Mineralization of Guojialing Granodiorite in Jiaodong Region. China University of Geosciences Press, Wuhan, 131 (in Chinese).
- Dodson, M. H., 1973. Closure Temperatures in Cooling Geological and Petrological System. *Contributions Mineralogy Petrology*, 40: 259 – 274.
- Ehlers, T. A., 2005. Crustal Thermal Processes and the Interpretation of Thermochronometer Data. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 58 (1): 315 – 350. doi: 10.2138/rmg.2005.58.12
- Ehlers, T. A., Armstrong, P. A., Chapman, D. S., 2001. Normal Fault Thermal Regimes and the Interpretation of Low-Temperature Thermochronometers. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 126 (3): 179 – 194. doi: 10.1016/S0031-9201(01)00254-0
- England, P., Molnar, P., 1990. Surface Uplift, Uplift of Rocks, and Exhumation of Rocks. *Geology*, 18 (12): 1173 – 1177. doi: 10.1130/0091-7613(1990)018<1173:SUUORA>2.3.CO;2
- Evans, N. J., Byrne, J. P., Keegan, J. T., et al., 2005. Determination of Uranium and Thorium in Zircon, Apatite, and Fluorite: Application to Laser (U-Th)/He Thermochronology. *Journal of Analytical Chemistry*, 60 (12): 1159 – 1165.
- Evans, N. J., McInnes, B. I. A., McDonald, B., et al., 2013. Emplacement Age and Thermal Footprint of the Diamondiferous Ellendale E9 Lamproite Pipe, Western Australia. *Mineralium Deposita*, 48 (3): 413 – 421. doi: 10.1007/s00126-012-0430-7
- Fan, H. R., Zhai, M. G., Xie, Y. H., et al., 2003. Ore-Forming Fluids Associated with Granite-Hosted Gold Mineralization at the Sanshandao Deposit, Jiaodong Gold Province, China. *Mineralium Deposita*, 38: 739 – 750.
- Farley, K. A., 2000. Helium Diffusion from Apatite: General Behavior as Illustrated by Durango Fluorapatite. *Journal of Geophysical Research*, 105 (B2): 2903 – 2914. doi: 10.1016/1999JB900348
- Farley, K. A., Wolf, R. A., Silver, L. T., 1996. The Effects of Long Alpha-Stopping Distances on (U-Th)/He Ages. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60 (21): 4223 – 4229. doi: 10.1016/S0016-7037(96)00193-7
- Fu, F. Q., McInnes, B. I. A., Evans, N. J., et al., 2010. Numerical Modeling of Magmatic-Hydrothermal Systems Constrained by U-Th-Pb-He Time-Temperature Histories. *Journal of Geochemical Exploration*, 106 (1): 90 – 109.
- Goldfarb, R., Santosh, M., 2013. The Dilemma of the Jiaodong Gold Deposits: Are They Unique? *Geoscience Frontiers*, 5 (2): 139 – 153. doi: 10.1016/j.gsf.2013.11.001
- Harrison, T. M., Duncan, I., McDougall, I., 1985. Diffusion of ⁴⁰Ar in Biotite: Temperature, Pressure and Compositional Effects. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49 (11): 2461 – 2468. doi: 10.1016/0016-7037(85)90246-7
- Kesler, S. E., Wilkinson, B. H., 2006. The Role of Exhumation in the Temporal Distribution of Ore Deposits. *Economic Geology*, 101 (5): 919 – 922. doi: 10.2113/gsecongeo.104.5.623
- Kesler, S. E., Wilkinson, B. H., 2009. Resources of Gold in Phanerozoic Epithermal Deposits. *Economic Geology*, 104 (5): 623 – 633. doi: 10.2113/gsecongeo.102.1.155
- Lee, J. K., Williams, I. S., Ellis, D. J., 1997. Pb, U and Th Diffusion in Natural Zircon. *Nature*, 390 (6656): 159 – 162. doi: 10.1038/36554
- Liu, Z. J., Wang, J. P., Zheng, D. W., et al., 2010. Exploration Prospect and Post-Ore Denudation in the Northwestern Jiaodong Gold Province, China: Evidence from Apatite Fission Track Thermochronology. *Acta Petrologica Sinica*, 26 (12): 3597 – 3611 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. W., Vasconcelos, P. M., Zhang, J., et al., 2003. ⁴⁰Ar/³⁹Ar Constraints on a Temporal Link between Gold Mineralization, Magmatism, and Continental Margin Transtension in the Jiaodong Gold Province, Eastern China. *The Journal of Geology*, 111 (6): 741 – 751. doi: 10.1086/378486
- Lu, L. N., Fan, H. R., Hu, F. F., et al., 2011. Emplacement Depth of the Guojialing Granodiorites from the Northwestern Jiaodong Peninsula, Eastern China: Evidences from Hornblende Thermobarometry and Fluid Inclusions. *Acta Petrologica Sinica*, 27 (5): 1521 – 1532 (in Chinese with English abstract).
- Lü, G. X., Kong, Q. C., 1993. Gold Deposit Geology Series: Gold Deposit of Linglong-Jiaojia Type in Jiaodong Peninsula. Science Press, Beijing, 253 (in Chinese).
- Márton, I., Moritz, R., Spikings, R., 2010. Application of Low-Temperature Thermochronology to Hydrothermal Ore Deposits: Formation, Preservation and Exhumation

- of Epithermal Gold Systems from the Eastern Rhodopes, Bulgaria. *Tectonophysics*, 483: 240—254. doi: 10.1016/j.tecto.2009.10.020
- McInnes, B. I. A., Evans, N. J., Fu, F. Q. et al., 2005. Application of Thermochronology to Hydrothermal Ore Deposits. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 58(1): 467—498.
- McInnes, B. I. A., Farley, K. A., Sillitoe, R. H., et al., 1999. Application of Apatite (U-Th)/He Thermochronometry to the Determination of the Sense and Amount of Vertical Fault Displacement at the Chuquicamata Porphyry Copper Deposit, Chile. *Economic Geology*, 94: 937—948. doi: 10.2113/gsecongeo.94.6.937
- Miao, L. C., Luo, Z. K., Huang, J. Z., et al., 1997. Studies and Implication of Zircon SHRIMP of Granitic Intrusive in Zhaoye Metallogenic Belt, Shandong Province. *Science in China (Series D)*, 27(3): 207—213 (in Chinese).
- Qiu, Y. M., Groves, D. I., McNaughton, N. J., et al., 2002. Nature, Age, and Tectonic Setting of Granitoid-Hosted, Orogenic Gold Deposits of the Jiaodong Peninsula, Eastern North China Craton, China. *Mineralium Deposita*, 37(3—4): 283—305.
- Qiu, Y. S., 1988. Regional Metallogenic Condition of Gold Deposits in the Zhaoyuan-Yexian District, Shandong Province, China. Liaoning Science and Technology Press, Shenyang, 268 (in Chinese).
- Reiners, P. W., 2005. Zircon (U-Th)/He Thermochronometry. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 58(1): 151—179.
- Reiners, P. W., Spell, T. L., Nicolescu, S., et al., 2004. Zircon (U-Th)/He Thermochronometry: He Diffusion and Comparisons with $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Dating. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(8): 1857—1887.
- Stockli, D. F., Farley, K. A., Dumitru, T. A., 2000. Calibration of the Apatite (U-Th)/He Thermochronometer on an Exhumed Fault Block, White Mountains, California. *Geology*, 28(11): 983.
- Sun, H. S., Sun, L., Cao, X. Z., et al., 2008. Axial Vertical Zoning Characteristics of Primary Halos and Geochemical Exploration Indicators for Deep Ore Body Prognosis in Shangzhuang Gold Deposit, Northwest Jiaodong Peninsula, Shandong Province. *Mineral Deposits*, 27(1): 64—70 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J. Y., Huang, S. P., 1990. Geothermic Dataset in Chinese Mainland. *Seismology and Geology*, 12(4): 351—366 (in Chinese).
- Wang, L. G., Qiu, Y. M., Mcnaughton, N. J., et al., 1998. Constraints on Crustal Evolution and Gold Metallogeny in the Northwestern Jiaodong Peninsula, China, from SHRIMP U-Pb Zircon Studies of Granitoids. *Ore Geology Reviews*, 13(1): 275—291.
- Wang, Z. L., Yang, L. Q., Guo, L. N., et al., 2015. Fluid Immiscibility and Gold Deposition in the Xincheng Deposit, Jiaodong Peninsula, China: A Fluid Inclusion Study. *Ore Geology Reviews*, 65: 701—717. doi: 10.1016/j.oregeorev.2014.06.006
- Wen, B. J., Fan, H. R., Santosh, M., et al., 2015. Genesis of Two Different Types of Gold Mineralization in the Linglong Goldfield, China: Constrains from Geology, Fluid Inclusions and Stable Isotope. *Ore Geology Reviews*, 65: 643—658. doi: 10.1016/j.oregeorev.2014.03.018
- Xu, Y. G., 2001. Thermo-Tectonic Destruction of the Archaean Lithospheric Keel beneath the Sino-Korean Craton in China: Evidence, Timing and Mechanism. *Physics and Chemistry of the Earth Part A—Solid Earth and Geodesy*, 26(9—10): 747—757.
- Xu, Y. G., Huang, X. L., Ma, J. L., et al., 2004. Crust-Mantle Interaction during the Tectono-Thermal Reactivation of the North China Craton: Constraints from SHRIMP Zircon U-Pb Chronology and Geochemistry of Mesozoic Plutons from Western Shandong. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 147(6): 750—767.
- Xu, Y. G., Li, H. Y., Pang, C. J., et al., 2009. On the Timing and Duration of the Destruction of the North China Craton. *Chinese Science Bulletin*, 54(19): 3379—3396.
- Zhai, M. G., Meng, Q. R., Liu, J. M., et al., 2004. Geological Features of Mesozoic Tectonic Regime Inversion in Eastern North China and Implication for Geodynamics. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 285—297 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, Y. S., 2000. Metallogenic System and Its Evolution: From Preliminary Practice to Theoretical Consideration. *Earth Science*, 25(4): 333—339 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, Y. S., Deng, J., Peng, R. M., 2000. Research Contents and Methods for Post-Ore Changes, Modifications and Preservation. *Earth Science*, 25(4): 340—345 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H. F., Li, S. R., Zhai, M. G., et al., 2006. Crust Uplift and Implications in the Jiaodong Peninsula, Eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2): 285—295 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X. O., Cawood, P. A., Wilde, S. A., et al., 2003. Geology and Timing of Mineralization at the Cangshang Gold Deposit, North-Western Jiaodong Peninsula, China. *Mineralium Deposita*, 38(2): 141—153.

附中文参考文献

常远,王玮,周祖翼,2010.采样地形对年龄—高程法应用的限制.地球物理学报,53(8):1868—1874.

陈光远,1993.胶东郭家岭花岗闪长岩成因矿物学与金矿化.武汉:中国地质大学出版社,131.

柳振江,王建平,郑德文,等,2010.胶东西北部金矿剥蚀程度及找矿潜力和方向——来自磷灰石裂变径迹热年代学的证据.岩石学报,26(12):3597—3611.

陆丽娜,范宏瑞,胡芳芳,等,2011.胶西北郭家岭花岗闪长岩侵位深度:来自角闪石温压计和流体包裹体的证据.岩石学报,27(5):1521—1532.

吕古贤,孔庆存,1993.金矿地质研究丛书:胶东玲珑—焦家式金矿地质.北京:科学出版社,253.

苗来成,罗镇宽,黄佳展,等,1997.山东招掖金矿带内花岗岩类侵入体锆石 SHRIMP 研究及其意义.中国科学(D 辑),27(3):207—213.

裘有守,1988.山东招远—掖县地区金矿区域成矿条件.沈阳:辽宁科学技术出版社,268.

孙华山,孙林,曹新志,等,2008.胶西北上庄金矿床原生晕轴(垂)向分带特征及深部矿体预测的勘查地球化学标志.矿床地质,27(1):64—70.

汪集旻,黄少鹏,1990.中国大陆地区大地热流数据汇编(第二版).地震地质,12(4):351—366.

翟明国,孟庆任,刘建明,等,2004.华北东部中生代构造体制转折峰期的主要地质效应和形成动力学探讨.地质前缘,11(3):285—297.

翟裕生,2000.成矿系统及其演化——初步实践到理论思考.地球科学,25(4):333—339.

翟裕生,邓军,彭润民,2000.矿床变化与保存的研究内容和研究方法.地球科学,25(4):340—345.

张华锋,李胜荣,翟明国,等,2006.胶东半岛早白垩世地壳隆升剥蚀及其动力学意义.岩石学报,22(2):285—295.

本期论文推荐

本期论文“华北克拉通南缘约 2.5 Ga 构造变质事件及意义”(曹正琦等),对于探讨华北克拉通太古宙晚期的构造演化具有重要意义.华北克拉通新太古代末期到早元古代早期构造—岩浆热事件的性质,是中国早前寒武纪地质学领域的重大科学问题和区域热点之一.华北克拉通约 2.5 Ga 构造岩浆热事件广泛发育,但是目前的研究多集中于中部和北部,对于南部相关变质岩浆岩的研究则相对较少.笔者正是从这一角度入手,以华北克拉通中部造山带南缘林山岩群中斜长角闪岩为研究对象,提供了岩相学、全岩主微量元素地球化学和锆石 U-Pb 年代学的第一手资料和详实的实验数据,笔者的工作有助于深入理解华北克拉通太古宙晚期—古元古代早期的构造演化.总体来说,该文论述清晰,科学意义较为明显,具有创新性.