



引文格式: 周彬, 朱毓, 高沛, 等. 秦岭造山带凤县-山阳地区富钴-镍钠长角砾岩年代学研究及地质意义[J]. 西北地质, 2025, 58(4): 174-196. DOI: 10.12401/j.nwg.2024134

Citation: ZHOU Bin, ZHU Yu, GAO Pei, et al. Geochronology Study and Geological Significance of Cobalt-Nickel-Rich Albite Breccia in the Fengxian-Shanyang, Qinling Orogenic Belt[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(4): 174-196. DOI: 10.12401/j.nwg.2024134

秦岭造山带凤县-山阳地区富钴-镍钠长角砾岩 年代学研究及地质意义

周彬¹, 朱毓^{2,*}, 高沛¹, 李华南¹, 刘振军¹, 王旭斌¹, 马宏民¹

(1. 陕西矿业开发工贸有限公司, 陕西 西安 710054; 2. 西北大学 地质学系大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069)

摘要: 秦岭造山带内沿凤县-山阳断裂两侧分布大面积钠长角砾岩, 这些钠长角砾岩的钴、镍等元素含量普遍较高, 因此具有良好的研究价值。笔者通过野外地质考察发现与钠长岩有关的镍钴矿床、矿化点共 6 处(商南县博鱼沟钠长角砾岩、商南县过凤楼白云石钠长角砾岩、商南县开河白云石钠长角砾岩、商南县开河铁白云石方解石钠长角砾岩、山阳县桐木沟铁白云石钠长角砾岩和柞水县凤凰镇水滴沟白云石钠长角砾岩)。对此开展系统的岩石学、锆石 U-Pb 年代学和锆石微量元素研究, 研究表明: 这些富钴-镍钠长角砾岩主要呈浅灰白色和青灰色, 块状构造, 可见角砾状构造, 部分区域可见黄铁矿、方解石、石英及钠长石脉。钠长角砾岩样品的锆石多呈现自形-半自形, 年龄集中分布在 375~543 Ma、665~959 Ma 和 963~1155 Ma, 其年龄峰值分别对应早泥盆世、志留纪、奥陶纪、新元古代、中元古代、古元古代。综合研究表明, 这些富钴-镍的钠长角砾岩年龄和该区泥盆系地层年龄一致, 不同时期壳源沉积物对泥盆纪钠长角砾岩沉积过程均有贡献, 成岩后期的岩浆-热液作用对镍-钴矿有明显的富集作用, 综上所述, 研究区出露的钠长角砾岩具有钴-镍矿化的潜力。

关键词: 岩石地球化学; 富钴-镍钠长岩; 锆石年代学; 地质意义; 凤县-山阳地区; 秦岭造山带

中图分类号: P58

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)04-0174-23

Geochronology Study and Geological Significance of Cobalt-Nickel-Rich Albite Breccia in the Fengxian-Shanyang, Qinling Orogenic Belt

ZHOU Bin¹, ZHU Yu^{2,*}, GAO Pei¹, LI Huanan¹, LIU Zhenjun¹, WANG Xubin¹, MA Hongmin¹

收稿日期: 2024-07-02; 修回日期: 2024-09-11; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 国家自然科学基金“西秦岭新生代钾霞橄黄长岩中地幔捕虏体与深部碳循环研究”、“扬子西缘新元古代沱定花岗质杂岩矿物化学研究及其对穿地壳岩浆系统的约束”(42172056、42202048), 陕西地矿集团有限公司科研专项资金项目“秦岭造山带陕西段钠长角砾岩型镍钴矿成矿作用及找矿前景”、“秦岭造山带陕西段钠长角砾岩型钴矿成矿作用及找矿前景研究”、“陕西省秦巴地区钴矿成矿条件及选区研究”(KY202223、KY202006、KY201906)联合资助。

作者简介: 周彬(1996-), 男, 助理工程师, 本科, 研究方向为钠长(角砾)岩型镍钴矿及相关地质矿产, 主要从事地质矿产(固体)勘查工作。E-mail: xd1123961591@163.com。

*** 通讯作者:** 朱毓(1993-), 男, 讲师, 博士, 研究方向为扬子西缘新元古代火成岩地球化学及构造-岩浆演化过程, 主要从事岩石地球化学研究。E-mail: yuzhunwu@163.com。

(1. Shaanxi Mining Industry and Trade Co, Ltd, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China)

Abstract: In the Fengxian-Shanyang, Qinling orogenic belt, there are large amounts of albites breccia that show the obvious enrichment of cobalt and nickel elements, which therefore are important for the ore probe. In this paper, a total of 6 albite breccia related to Co-Ni deposits and mineralization points have been found through field geological investigation (Boyugou albite breccia in the Shangnan County, Guofenglou dolomite-bearing albite breccia in the Shangnan County, Kaihe dolomite-bearing albite breccia in the Shangnan County, Kaihe iron-dolomite- and calcite-bearing albite breccia in the Shangnan County, Tongmugou iron-dolomite-bearing albite breccia in the Shanyang County and Shuidigou dolomitbearing albite breccia in the Fenghuang Town of the Zhashui County). Systematic studies of petrology, zircon U-Pb chronology, and zircon trace elements display that these cobalt-nickel-rich albite breccia are mainly grayish white and bluish gray with massive structure and brecciated structure, and some areas occasionally exist the pyrite, calcite, quartz and albite veins. The zircons of albite breccia are mostly idiomorphic and semi-idiomorphic, and their ages are concentrated in 375~543 Ma, 665~959 Ma, and 963~1 155 Ma. Their age peaks are corresponding to the Early Devonian, Silurian, Ordovician, Neoproterozoic, Mesoproterozoic, and Paleoproterozoic. The comprehensive studies demonstrate that the zircon ages of these cobalt-nickel-rich albite breccia are consistent with the age of Devonian strata. Crust-derived sediments of different periods are contributed to the sedimentary process of Devonian albite breccia, and the later magmatic -hydrothermal processes are responsible for the enrichment of nickel-cobalt breccia deposits. In conclusion, the albite breccia exposed in the study area has the potential for cobalt-nickel mineralization.

Keywords: lithogeochemistry; cobalt-nickel-rich albite; zircon U-Pb geochronology; geological implication; Fengxian-Shanyang area; Qinling orogenic belt

近年来,随着装备制造业及新兴产业的快速发展,镍-钴矿产资源的利用对于新能源领域、高科技等均具有极其重要的意义。中国现有钴-镍矿成矿规模小,矿床种类多,赋存状态不明,成矿机理不详,针对性勘查技术薄弱,亟待开展钴镍矿矿产资源勘查及成矿规律研究。此外,中国镍-钴矿对外依赖度较高,2019年钴-镍矿对外依存度均大于90%(孔令湖等, 2021; 赵强等, 2021; 于晓飞等, 2022; 韩见等, 2023)。2020~2023年,受疫情影响,钴矿资源出现供过于求的情况,镍矿资源依旧处于高度依赖进口的境况。因此,为了解决镍钴矿等关键矿产资源短缺的情况,需要加大勘查找矿研究力度。

Co、Ni主要为亲铁亲硫元素,由深部向浅部(地核向地壳)元素丰度急剧减少,在地幔岩石类型中分别达 110×10^{-6} 和 1900×10^{-6} ,而在地壳岩石类型中的丰度仅分别为 27×10^{-6} 和 59×10^{-6} (苏本勋等, 2023)。因此,钴-镍矿很少形成独立矿床,绝大多数都是以铜、铅锌及铁的伴生资源组分产出,故其矿床类型划分主要依据主矿体矿床类型划分。其中,钴矿床按照成因

类型主要划分为4种,分别是与超基性岩-基性岩有关的岩浆型、沉积-变沉积岩容岩型(层状铜钴矿)、热液型和风化壳型(红土型),仅后者可形成独立钴矿床。镍矿床主要成因类型为岩浆型、海相沉积型(黑色岩系型)和风化壳型。含镍矿物约50余种,但主要分为硫化镍矿和氧化镍矿(红土镍矿)两大类(李强等, 2011; 孔令湖等, 2021; 李小红等, 2022; 于晓飞等, 2022; 李华等, 2023; 韩见等, 2023)。中国已经探明的钴-镍资源主要以岩浆型和热液型为主,分布于中亚和东昆仑造山带内(苏本勋等, 2023; 王亚磊等, 2023; 赵达成等, 2023; 张照伟等, 2024; 钟世华等, 2025)。陕西省钴-镍矿资源较为短缺,省内镍矿均为与超基性和基性岩有关的岩浆型;钴矿多为伴生矿产,与镍矿、铁矿及铜矿等金属矿产资源伴生,仅风化壳型呈独立钴矿产出,整体研究程度较低(赵强等, 2021)。近年来,随着矿产地质调查的不断深入,在秦岭造山带南部沿凤县-山阳断裂带两侧以及镇甸盆地内的泥盆系和志留系中发现大量钠长岩类岩石(包括钠长角砾岩、钠化岩石等),这类岩石($\text{Co}=91.71\times 10^{-6}$ 、 $\text{Ni}=1\,365.54\times$

10⁻⁶)中 Ni-Co 元素相较于地层围岩 (Co = 19.76×10⁻⁶、Ni = 47.21×10⁻⁶)、脉体 (Co = 22.75×10⁻⁶、Ni = 127.23×10⁻⁶)明显较高(表 1),笔者获取的秦岭造山带内凤县—山阳地区钠长岩类岩石同样显示出较高的 Co、Ni 含量(表 2),因此推测该类钠长岩具有镍钴成矿潜力。前人研究表明,凤县—山阳地区产出的这条钠长石岩

表 1 秦岭造山带富钴-镍钠长角砾岩及其围岩 Co、Ni 等元素光谱分析结果统计表

Tab. 1 Statistical table of spectral analysis results of Co, Ni and other elements in Cobalt-Nickel-rich albites and its surrounding rocks in the Fengxian-Shanyang area, Qinling Orogenic Belt

岩石类型 (件数)	Co	Ni	Cu	Pb	Zn	Au	Ag	Ga	Cd
地层围岩 (75)	4.47~75.9 (19.76)	3.6~202 (47.21)	4.4~10 350 (175.91)	1.1~509.1 (30.65)	4.8~440 (40.07)	0.49~216.06 (11.53)	29~5 352 (180.62)	7.03~24.5 (16.34)	0.02~28.4 (1.32)
层状钠 长岩 (21)	1.43~35 (10.55)	3.45~94.3 (26.01)	3.86~769 (49.50)	1.01~147 (19.70)	7.25~283 (52.90)	0.35~92.5 (7.17)	30~2 712 (251.64)	4.31~30.1 (13.30)	0.03~4.98 (0.64)
钠化岩石 (13)	5.17~25.60 (13.74)	9.21~57.60 (31.03)	2.71~1 821 (252.08)	1.46~83.44 (15.07)	3.18~79 (21.56)	0.37~58.70 (7.53)	20.91~71.00 (40.39)	4.58~24.90 (14.96)	0.01~0.16 (0.06)
钠长角 砾岩 (112)	2.03~1 833 (91.71)	5.19~99 340 (1 365.54)	1.23~1 821 (59.81)	0.63~2 323.33 (33.48)	2.12~276 (23.57)	0.32~936 (29.69)	29~2 165 (104.01)	1.69~33.30 (13.74)	0~3.79 (0.24)
脉体 (24)	3.65~102.81 (22.75)	17.70~88.8 (127.23)	1.2~2 470 (168.25)	1.08~56.60 (11.76)	5.16~144 (46.55)	0.52~46.20 (5.22)	28.67~264 (83.37)	2.56~22.40 (11.08)	0.02~0.57 (0.18)
原始地幔	100	2 000	28	120	50	1.3	19 [*]	3	40 [*]
大陆地壳	29	105	75	80	80	3.0 [*]	80 [*]	18	98 [*]
上陆壳	10	20	25	20	71	1.8 [*]	50 [*]	17	98 [*]
下陆壳	35	135	90	4.0	83	3.4 [*]	90 [*]	18	98 [*]

注: *元素含量为10⁻⁹,其余元素含量为10⁻⁶;原始地幔及大陆地壳数据引自(Taylor, 1985)。

表 2 秦岭造山带凤县—山阳地区钠长角砾岩及其镍钴矿岩石光谱分析结果

Tab. 2 Spectral analysis results of albite breccia and its nickel-cobalt ore rock in the Fengxian-Shanyang area, Qinling Orogenic Belt

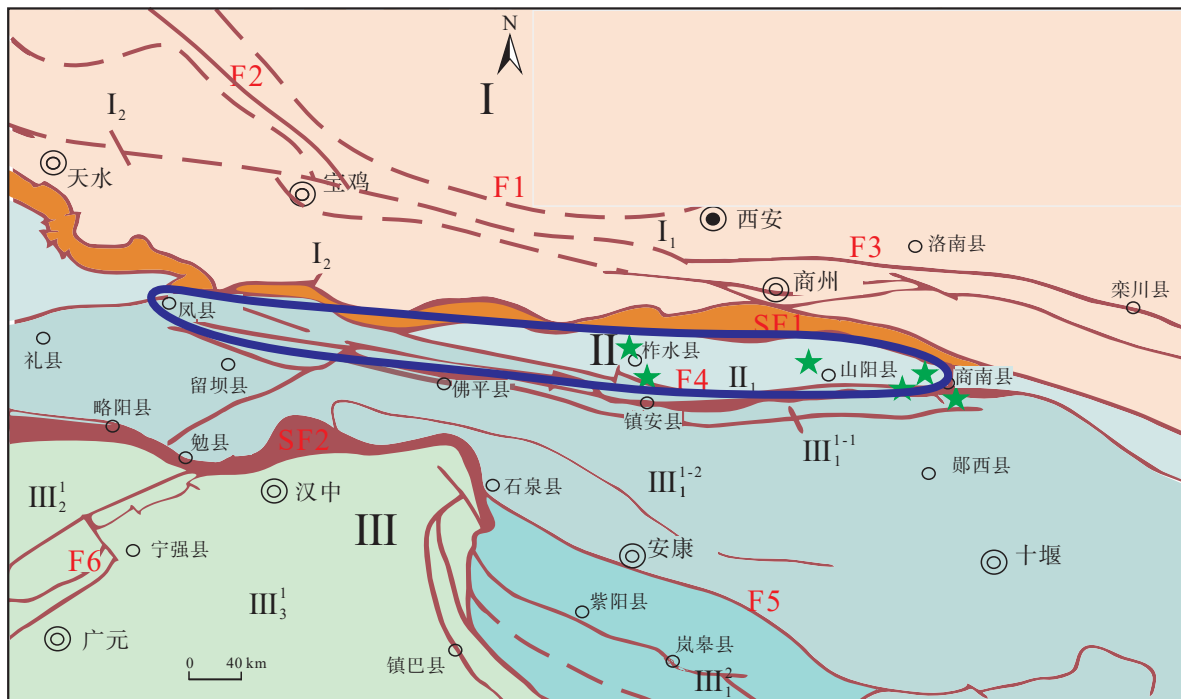
样品编号	样品名称	Ag (10 ⁻⁹)	Au (10 ⁻⁹)	Co (10 ⁻⁶)	Cu (10 ⁻⁶)	Ga (10 ⁻⁶)	Ni (10 ⁻⁶)	Pb (10 ⁻⁶)	Zn (10 ⁻⁶)	Cd (10 ⁻⁶)
BGD1-GP1	浅灰色细晶灰岩	30	0.85	16.6	13.6	12.9	35.8	2.74	26.7	0.05
BGD1-GP2	褐铁矿化变粉砂岩	46	1.06	12.9	83.4	18.9	58	2.81	161	0.2
FD11-GP1	蚀变黄铁矿化钠长岩	30	0.91	6.33	3.86	16.4	12.8	2.93	283	1.03
FD12- GP1	蚀变钠长岩	41	1.47	11.1	6.18	9.76	18.3	2.67	160	0.53
BGD3-GP1	青灰色钠化板长岩	30	58.7	8.41	1821	24.9	23.1	1.6	7.32	0.02
BGD6-GP1	青灰色蚀变钠化板岩	32	0.45	8.87	4.29	17	24.8	1.77	3.18	0.02
FD6- GP1	钠长角砾岩	53	1.27	10.5	1.23	7.52	25.5	6.22	276	1.02
BGD2-GP1	镜铁矿化钠长角砾岩	42	5.46	31.1	12.3	21.9	41.9	3.64	15.7	0.1
BGD3-GP3	青灰色蚀变钠长角砾岩	30	0.35	11.7	6.11	13.1	8.6	1.23	4.49	0.02
BGD4-GP1	褐铁矿化钠长角砾岩	29	0.72	17.7	11.4	20.7	66.3	2.05	11.5	0.06
BGD8-GP1	褐铁矿化钠长角砾岩	33	0.4	16.3	7.33	20.5	23.9	2.32	2.87	0.02
BGD11-GP1	青灰色钠长角砾岩	34	0.56	18.9	4.07	18.1	19.4	1.81	2.12	0.01
BGD11-GP2	青灰色钠长角砾岩	32	0.43	8.55	3.65	16.6	14.1	3.2	4.57	0.02
FD13-GP1	矿化铁碳酸盐岩脉	222	9.41	10.9	1821	5.08	36.5	9.3	233	0.9
BGD9-GP1	铁白云石石英脉	41	1.83	14.8	46.3	11	27.7	7.46	26.5	0.05
BGD10-GP1	铁碳酸盐岩脉	31	0.52	17.8	45	2.64	42.5	2.6	5.16	0.02

带上分布着众多大中型铅锌-金矿, 是秦岭造山带内一条重要的控矿构造带(包崇高等, 1997; 胡西顺, 1998; 范玉须等, 2018), 具有钴-镍成矿潜力的地区的形成与该类钠长岩岩石密切相关(汪超等, 2017; 赵强等, 2021), 但是, 目前对于秦岭造山带该类钠长岩形成时代的认识较为有限。为了进一步研究秦岭造山带凤县-山阳断裂两侧富钴-镍钠长岩类岩石形成时代和大地构造背景以及相关的镍-钴成矿物质来源等问题, 笔者选取了秦岭造山带凤县-山阳地区 6 处钠长岩, 对其进行系统的锆石 U-Pb 定年学研究, 旨在明确秦岭造山带凤县-山阳地区富钴-镍钠长岩的年代学格架及其地质意义。

1 区域地质背景

秦岭造山带东西方向延伸大约 2 000 km, 南北宽度大约 100~300 km。作为中国大陆的南北分界线及重要的多金属成矿带, 秦岭造山带历来为众多地质学者所关注(方维萱等, 2000; Dong et al., 2016; 范玉须等,

2018)。秦岭造山带具有 3 个一级构造单元和两个缝合带组成的“两带三块”构造格局, 包括华北板块、扬子板块和夹持于其间后期独立出来的秦岭地块以及商丹缝合带和勉略缝合带(张国伟等, 1996; 叶霖等, 1997; 赖绍聪等, 2003; Dong et al., 2015, 2016; 张国伟等, 2019)。作为多阶段的复合型大陆造山带(陈龙龙等, 2024; 田智博等, 2025), 秦岭造山带从早期到晚期经历了前寒武纪结晶基底演化阶段、新元古代—中三叠世板块构造体制下的多阶段碰撞造山阶段以及中生代陆内造山阶段 3 个主要的演化阶段(张国伟等, 1995, 1996, 2019)。钠长角砾岩是秦岭造山带中的一类特色岩石, 该类岩石主要沿凤县-山阳断裂分布(图 1), 该地区产出丰富的多金属矿床, 且矿化类型多样(包崇高等, 1997), 具有集中成带分布的特点。秦岭造山带凤县-山阳地区钠长岩主要与众多大中型铅锌矿、金矿关系密切, 分布在双王地区、柞水凤凰镇、纸房沟、万丈沟、二台子等地区。钠长石岩呈层状、似层状产于碎屑岩或碳酸盐岩岩系中, 与区域地层整合产出, 渐变过渡(包崇高等, 1997; 胡西顺, 1998; 李



SF1. 商丹蛇绿构造混杂岩带; SF2. 勉略蛇绿构造混杂岩带; F1. 太要-鲁山断裂; F2. 六盘山断裂; F3. 洛南-栾川断裂; F4. 凤县-山阳断裂; F5. 石泉-安康断裂; F6. 宽川铺断裂; ★. 样品主要位置; ○. 研究区; I. 柴达木-华北地层大区; I₁. 晋冀鲁豫地层区; I₂. 秦祁昆地层区; II. 中秦岭地层大区; II₁. 太白-柞水地层分区; III. 羌塘-扬子华南地层大区; III₁. 南秦岭-大别山地层区; III₂. 巴彦克拉地槽区; III₃. 扬子地层区; III¹. 迭部-旬阳地层分区; III¹⁻¹. 镇安地层小区

图1 秦岭造山带凤县-山阳地区富钴-镍钠长岩样品分布图

Fig. 1 Distribution map of Cobalt-Nickel-rich albites in the Fengxian-Shanyang area of Qinling orogenic belt

强等, 2011; 罗金海等, 2017; 汪超等, 2017)。与钠长角砾岩有关的矿产种类包括: 铀、钍、钽、锆、铌、铍、锂和稀土等元素, 均具有较好的成矿潜力和找矿前景(范玉须等, 2018; 陈擎等, 2021; 李小亮等, 2022; 于晓飞等, 2022)。该类钠长岩在区域上呈 NWW-近 EW 方向断续延伸达 400 余 km, 赋存地层主要为泥盆系, 走向总体与地层产状一致, 其内部发育各类原生沉积构造。钠长岩类岩石赋存地层主要为泥盆系牛耳川组、池沟组、青石垭组、古道岭组、星红铺组和九里坪组。这些地层的岩性主要为泥质粉砂岩、粉砂质板岩、绢云母板岩、绢云母千枚岩等, 以及浅变质细碎屑岩和碳酸盐岩等(张复新, 1997; 方维萱等, 2000; 李建波等, 2006; Dong et al., 2016; 罗金海等, 2017; 魏小昭等, 2017; 汪超等, 2017; 谷玉明等, 2018; 范玉须等, 2018; 李树雷等, 2022)。

基于前人研究基础, 本次系统的野外调查及综合研究发现, 与钠长岩类有关的镍钴矿床和矿化点共有 6 处: 柞水县凤凰镇水滴沟地区的粒状铁方解石白云石钠长角砾岩(FD6-TW1)、柞水县凤凰镇万丈沟西沟地区的含方解石脉钠长角砾岩(FD13-TW1)、山阳县金钱河桐木沟地区铁白云石钠长角砾岩(TD2-TW2)、商南博渔沟口郭家坪地区的青灰色钠长角砾岩(BGD11-TW3)、商南县开河地区的含铁白云石方解石的钠长角砾岩(KD1-TW3)和商南过风楼柳树湾地区的白云石钠长角砾岩(GD1-TW1)(图 1)。其中, 柞水凤凰镇镍矿床产于秦岭造山带南秦岭印支褶皱带内, 为比较少见的中低温热液型镍矿(汪昭祥, 1987; 石准立等, 1989)。矿床主要以浸染状、网脉状、脉状或块状产于蚀变的超基性岩石中。凤凰镇钴镍矿圈定镍矿体 7 条, 矿体厚度 0.83~2.57 m, 镍品位达到 1.58%~2.23%, 伴生钴品位为 0.017%, 为小型镍矿床。山阳县金钱河地区已经圈定钴镍矿体 3 条, 镍品位达到 0.2%~12.5%, 平均品位为 2.4%, 钴品位为 0.012%~0.3%。该地区钴镍矿一般呈似层状、脉状和透镜状产出, 矿石类型主要为蚀变钠长岩及钠长角砾岩, 非金属矿物主要为钠长石、石英及方解石, 金属矿物有镍黄铁矿、镍黄铜矿、磁黄铁矿、黄铜矿、辉砷镍矿、硫镍钴矿、辉砷钴矿、钴黄铁矿及毒砂。纸房沟-万丈沟一带发现了富钴、镍和金矿体 6 个, 构成了一条长 13 km, 宽 1~3 km 的铜-金-钴-镍矿化带(包崇高等, 1997)。桐木沟位于山阳县东北约 30 km 处, 以铅锌矿为主, 是秦岭泥盆系多金属成矿带最东部的矿床, 其

为富钴伴生镍的中型矿床。该矿床区内岩浆活动不显著, 仅在矿区外围有小岩体和凝灰岩出露(马国良, 1993a), 钠长石角砾岩是沉积喷气成矿作用的早期产物(马国良, 1993b)。此外, 丹凤县竹林关和商南县青山一带钠长岩类岩石与钴镍富集相关性较强, 具有明显的钴镍矿成矿潜力(张复新, 1997; 方维萱等, 2000; 李建波等, 2006; 耿艳光, 2018; 谷玉明等, 2018; 赵强等, 2021; 李树雷等, 2022)。

2 研究区富钴-镍钠长岩岩相学特征

秦岭造山带凤县-山阳地区内富钴-镍钠长岩的热液胶结物成分主要以碳酸盐类的含铁白云石为主, 其次为方解石和钠长石, 还有少量石英、黄铁矿和金红石等。尤其在双王和二台子钠长岩内角砾岩胶结物中有微量的六方硫镍矿、紫硫镍矿、钒云母、铬云母和氟碳钙铈矿, 黄铁矿中 Pt、Pd 含量较高。商南过风楼钠长岩中可见独居石等稀土矿物, 硫化物中 Pt、Pd 含量较高。秦岭造山带凤县-山阳地区内富钴-镍钠长岩产出特征详情可见表 3。

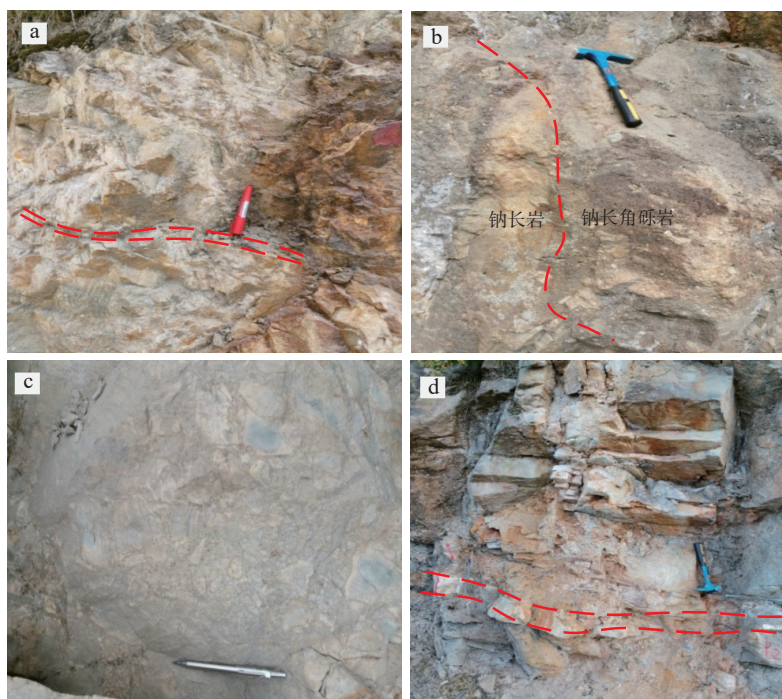
秦岭造山带凤县-山阳地区富钴-镍钠长岩呈浅灰白色和青灰色, 具有角砾状结构, 显示块状构造(图 2)。岩石矿物组分主要为微粒钠长石、石英、绢云母和胶结物以及少量小于 2 mm 岩石碎屑等。角砾呈棱角状或次棱角状, 个别可达 20~45 mm。胶结物主要为方解石、石英、铁白云石和钠长石。胶结物主要呈不规则脉状和集合体分布于角砾之间; 铁白云石呈半自形-菱形粒状和他形粒状, 粒径一般为 0.10~0.12 mm; 石英呈他形粒状, 粒径一般为 0.54~3.50 mm。此外, 可见方解石、石英脉及钠长石细脉呈网脉状穿插分布于钠长角砾岩间。钠长石细脉仅局部出现, 脉体最大宽度大约为 0.75 mm, 钠长石粒径一般为 0.15~0.30 mm, 可见聚片双晶发育(图 3)。不透明矿物有两种, 呈微粒状分散于钠长岩角砾和胶结物中。绢云母多呈集合体分布于与钠长岩角砾的接触部位, 具蚀变矿物特征。

3 研究方法

秦岭造山带凤县-山阳地区内富钴-镍钠长岩的锆石由西安阿伯特资环分析测试技术有限公司挑选, 锆石的制靶与测试工作在西北大学大陆动力学国家

续表 3

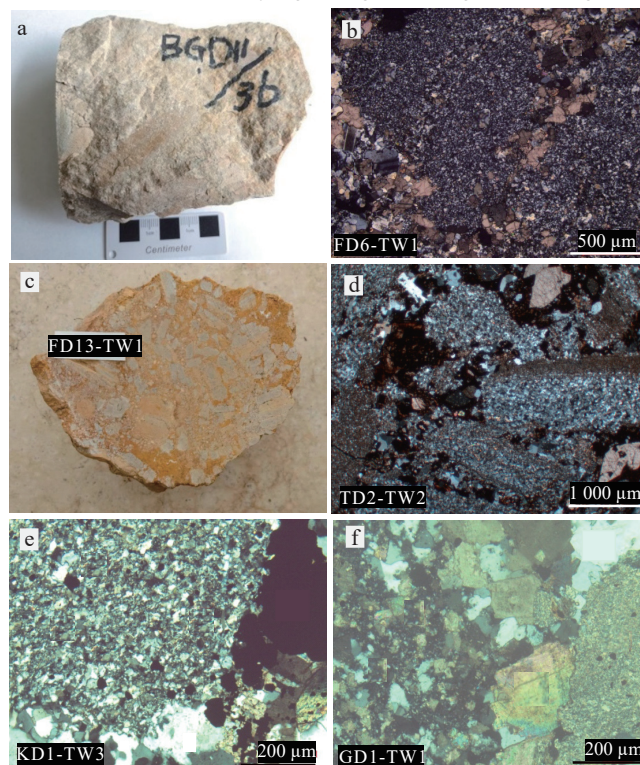
区段	位置	构造	层位及围岩	规模		形态	产状	角砾特征		胶结物	类型	矿化
				长 (km)	宽 (m)			成分	形状			
镇安县二 台子-山阳 县桐木沟	柞水县凤镇 万丈沟到金 钱河蛇形地	蔡窑-西芦山复 式向斜-南翼	牛耳川组	5	100	透镜状, 由多 个角砾岩体组 成, 长数十至 数百米	与岩层产状一 致, 受层控制, 产状 20°~30° ∠50°~60°, 角 砾岩与碎裂岩 混杂产出	粉砂质绢云板岩, 粉砂岩, 白云质 钠长板岩、钠长 石白云岩, 黄铁 矿块	次棱角状、不 规则状、卵状	含铁白云石、 白云石、方解 石、石英、钠 长石	钠化岩石为主, 次为钠长角砾 岩, 脉状钠 长岩	镍钴矿、 金矿、 铜矿
	山阳县色河 铺干沟到板 板山	峪峪沟-色河 铺复向斜东围 合部位的干沟 背斜两翼	绢云板岩、铁 白云质绢云板 岩、微晶白云 岩、泥灰岩、 粉砂岩、砂岩、 含碳质板岩	14	1 500~3 500	多呈不规则脉 状, 似层状, 有分枝, 复合 及膨胀现象, 单体者 200~500 m, 长 10 km	总体走向为 EW, 单体有 NW和NE向者, 且将EW方向 者串通, 走向 随地层而转, 倾向多切穿地 层, 产状十分 复杂	主要为灰质砂岩、 铁白云质粉砂绢 云板岩、含碳板 岩、粉砂岩、泥 灰岩、白云岩。 次为白云母石英 片岩、白云斜长 片岩、石英岩、 钠长岩、角砾含 量 15%~30%	不规则棱角状、 板状	主要为铁白云 石、方解石、 次为石英、岩 粉、黄铁矿等	以钠长角砾岩、 钠化岩石为主, 次为脉状钠 长岩	金矿化弱
	山阳县晚阳 沟-小西沟- 桐木沟	野人沟-九岔 沟复背斜及黄 土包-崖家庄 背斜北翼	晚阳沟-碾盘 断裂带充填在 青石坪组 and 池 沟组之间绢云 母板岩、粉砂 质绢云母板岩、 粉砂岩、铁白 云岩及钠长岩	25	5~700	脉状、沿断裂 带断续产出, 单体大者长 4 km, 宽 200 m	总体走向近 EW向, 倾向 与地层基本 一致	铁白云石、石 英、方解石、 白云母、钾长 石、钠长石、 黑云母、方柱 石、黄铁矿、 磷灰石、锆石、 电气石	不规则次棱角 状、浑圆状及 板状	见脉状钠长岩 磷灰石、锆石、 电气石	以层状钠长岩、 钠长角砾岩及 钠化岩石为主, 见脉状钠长岩	锌矿
	山阳县高坝 到中村	两岭街-竹林 关背斜南翼, 沿高坝-竹林 关-青山断裂 带北侧分布	高坝-银花主 要赋存于牛耳 川组及池沟组, 岩性主要为铁 白云质绢云板 岩、铁白云质 粉砂岩、千枚 岩、绢云板岩、 白云岩、钠长 板岩	18	1 000~2 000	由大小不等的 9个平行排列 的脉状体组成。 长数十米到 8 km, 宽 1~300 m	走向NNW-SEE, 与地层一致, 倾向 10°~30°。 倾向 50°~60°。 与地层基本 一致	铁白云质粉砂岩、 铁白云质绢云板 岩及千枚岩、铁 白云岩、粉砂岩、 少量钠长岩类。 角砾含量 15%~60%	不规则次棱角 状, 浑圆状	主要为铁白云 石、方解石、 次为石英、钠 长石、少量的 黄铁矿、微量 磷灰石、锆石、 电气石、金红 石、黄铜矿、 黝铜矿	以钠化岩石为 主, 次为脉状 钠长岩、钠长 角砾岩	
山阳县中 村-商南县 过风楼	丹凤竹林关 到商南县 青山	单斜构造, 沿 竹林关-青山 断裂南侧分布	赋存于星红铺 组, 岩性主要 为粉砂质绢云 板岩、变粉砂 岩、薄层泥质	58	100~1 000	脉状、似层状, 单个角砾岩体 长度不详, 其 厚度一般小于 20 m	走向延伸与地 层一致, 为 EW向, 倾向 10°~360°, 倾 角 50°~70°	主要为铁白云 石、次为钠长 石、方解石、 石英、微量黄 铁矿、黑云母、	不规则次棱角 状, 浑圆状	主要为铁白云 石、次为钠长 石、方解石、 石英、微量黄 铁矿、黑云母、	以钠长角砾岩、 钠化岩石为主, 次为脉状钠 长岩	商南开河、 商南过风 楼 2 处钴矿 点; 韭菜 沟中型金



a. 山阳牛耳川侵入石英钠长岩脉; b. 色河铺钠长岩与钠长角砾岩渐变关系; c. 商南郭家坪钠长岩与钠长角砾岩渐变关系; d. 商南柳树湾侵入白云石钠长岩脉

图2 秦岭造山带山阳中村-商南过风楼区段钠长岩和钠长角砾岩产出照片

Fig. 2 Photographs of albite and albite breccia in Shanyang Zhongcun-Shangnan Guofenglou section of Qinling orogenic belt



a. 青灰色钠长角砾岩手标本; b. 钠长角砾岩镜下照片; c. 角砾状白云石钠长岩手标本; d. 角砾状白云石钠长岩镜下照片; e. 黄铁矿化微粒钠长角砾岩镜下照片; f. 含砾白云石钠长岩镜下照片

图3 秦岭造山带凤县-山阳地区钠长岩手标本及镜下显微照片

Fig. 3 Hand specimens and microscopic photographs of albite in the Fengxian-Shanyang area of Qinling orogenic belt

重点实验室完成, 锆石阴极发光(CL)发光仪为加载于扫描电镜上的英国 Gatan 公司的 Mono CL3+型阴极荧光探头, U-Pb 分析采用激光烧蚀多接收器等离子体质谱仪(LA-MC-ICP-MS)进行微区原位分析, 分析仪器为 Geo-Las 200 M 型激光剥蚀系统和 Elan 6100DRC 型四级杆质谱仪, 配有 193 nmA Rf-excimer 准分子激光器, 分析过程激光剥蚀孔径 30 μm, 激光脉冲为 10 Hz, 能量为 32~36 mJ, U-Pb 同位素组成用锆石 91 500 进行外标校正。采用 ICP-MS DataCal 程序 (Liu et al., 2010) 进行数据处理, 采用 ²⁰⁸Pb 校正法对普通铅进行校正, 年龄计算和和谐年龄图绘制采用 Iso-plot (Ludwig, 2001) 程序。具体实验方法参见李怀坤

等(2009)。

4 富钴-镍钠长岩锆石微量元素及 U-Pb 年代学特征

文中选取秦岭造山带凤县-山阳地区 6 个不同区块内富钴-镍钠长岩样品 (BDG11、FD6、FD13、GD1、KD1 和 TD2) 作为锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素测试对象, 每件样品进行 30 个 U-Pb 测点的分析。锆石 U-Pb 年代学结果可见表 4~表 9。

部分锆石表现出岩浆锆石的特征 (Rubatto et al., 2000; 吴元保等, 2004): 即明显 Ce 正异常、Eu 负异

表 4 秦岭造山带凤县-山阳地区钠长角砾岩 (BGD11) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测试结果

Tab. 4 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotope results of albite breccia (BGD11) in the Fengxian-Shanyang area, Qinling Orogenic Belt

点号	含量 (10 ⁻⁶)		Th/U	同位素比值						年龄 (Ma)					
	Th	U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ
1	59	47	1.25	0.355 5	0.007 6	6.096 1	0.141 5	0.124 4	0.002 8	1 961	36	1 990	20	2 020	18
2	219	192	1.14	0.065 2	0.001 4	0.505 2	0.013 1	0.056 2	0.001 4	407	8	415	9	459	26
3	197	235	0.84	0.131 8	0.002 8	1.222 3	0.028 0	0.067 3	0.001 5	798	16	811	13	846	21
4	192	181	1.06	0.072 9	0.001 6	0.587 2	0.017 5	0.058 4	0.001 7	454	9	469	11	545	31
5	185	809	0.23	0.083 8	0.001 8	0.762 8	0.016 5	0.066 0	0.001 4	519	10	576	10	807	20
7	84	148	0.57	0.116 3	0.002 5	1.092 5	0.026 1	0.068 1	0.001 6	709	14	750	13	872	22
8	217	313	0.69	0.113 2	0.002 4	1.074 2	0.024 3	0.068 8	0.001 5	691	14	741	12	893	21
9	103	246	0.42	0.340 3	0.007 2	5.039 1	0.107 4	0.107 4	0.002 2	1 888	34	1 826	18	1 755	18
11	319	345	0.92	0.068 9	0.001 5	0.529 0	0.012 5	0.055 7	0.001 3	430	9	431	8	439	24
12	84	628	0.13	0.074 5	0.001 6	0.576 4	0.017 5	0.056 2	0.002 1	463	9	462	11	458	84
13	112	183	0.61	0.292 4	0.006 6	4.143 1	0.154 0	0.102 8	0.004 5	1 653	33	1 663	30	1 675	82
14	122	135	0.90	0.467 0	0.009 9	10.416 8	0.222 1	0.161 8	0.003 3	2 471	44	2 473	20	2 474	16
15	105	224	0.47	0.073 3	0.001 6	0.564 6	0.013 8	0.055 9	0.001 3	456	9	454	9	447	24
18	109	162	0.67	0.130 8	0.002 8	1.183 3	0.028 4	0.065 6	0.001 5	793	16	793	13	793	22
19	88	113	0.78	0.115 9	0.002 5	0.975 9	0.024 7	0.061 1	0.001 5	707	14	692	13	641	24
20	415	455	0.91	0.067 1	0.001 4	0.517 6	0.012 2	0.056 0	0.001 3	418	9	424	8	452	23
21	137	211	0.65	0.072 2	0.001 6	0.556 5	0.013 8	0.055 9	0.001 3	449	9	449	9	449	25
22	58	191	0.30	0.110 0	0.002 4	0.938 0	0.022 9	0.061 9	0.001 5	673	14	672	12	669	23
23	324	300	1.08	0.139 2	0.003 0	1.306 1	0.029 2	0.068 0	0.001 5	840	17	848	13	870	21
26	217	338	0.64	0.072 8	0.001 6	0.581 7	0.013 8	0.057 9	0.001 3	453	9	466	9	527	23
27	252	494	0.51	0.067 2	0.001 4	0.531 7	0.012 5	0.057 4	0.001 3	419	9	433	8	507	23
28	151	333	0.45	0.161 1	0.003 4	1.578 0	0.034 7	0.071 0	0.001 5	963	19	962	14	958	20
30	214	755	0.28	0.068 7	0.001 5	0.526 5	0.011 9	0.055 6	0.001 2	428	9	430	8	436	23

表5 秦岭造山带凤县-山阳地区钠长角砾岩(FD6) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测试结果

Tab. 5 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotope results of albite breccia (FD6) in the Fengxian-Shanyang area, Qinling Orogenic Belt

点号	含量 (10^{-6})		Th/U	同位素比值						年龄 (Ma)					
	Th	U		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ
1	81	256	0.32	0.077 0	0.001 6	0.600 4	0.014 0	0.056 6	0.001 3	478	10	478	9	474	23
2	98	188	0.52	0.317 6	0.006 6	4.744 1	0.100 3	0.108 4	0.002 2	1 778	32	1 775	18	1 772	18
3	241	236	1.02	0.069 2	0.001 5	0.502 2	0.012 0	0.052 7	0.001 2	431	9	413	8	315	24
4	76	99	0.77	0.115 3	0.002 5	1.029 6	0.028 3	0.064 8	0.001 8	703	14	719	14	767	27
5	128	72	1.78	0.252 4	0.005 4	3.225 0	0.076 1	0.092 7	0.002 2	1 451	28	1 463	18	1 481	20
6	545	403	1.35	0.129 9	0.002 7	1.192 9	0.025 8	0.066 6	0.001 4	787	15	797	12	826	20
7	208	313	0.66	0.073 2	0.001 5	0.557 6	0.012 9	0.055 3	0.001 3	455	9	450	8	423	23
8	327	472	0.69	0.067 5	0.001 4	0.523 3	0.011 7	0.056 2	0.001 2	421	9	427	8	461	22
9	126	276	0.46	0.290 5	0.006 0	3.956 0	0.081 6	0.098 8	0.002 0	1 644	30	1 625	17	1 601	18
10	274	471	0.58	0.072 8	0.001 5	0.545 3	0.012 0	0.054 4	0.001 2	453	9	442	8	386	22
11	162	321	0.50	0.068 1	0.001 5	0.508 5	0.031 1	0.054 2	0.003 5	425	9	417	21	378	151
12	136	440	0.31	0.130 8	0.002 7	1.179 6	0.025 0	0.065 4	0.001 4	792	15	791	12	788	20
13	368	476	0.77	0.069 6	0.001 5	0.528 9	0.012 1	0.055 1	0.001 2	434	9	431	8	417	23
14	117	158	0.74	0.066 7	0.001 4	0.503 0	0.012 8	0.054 7	0.001 4	416	8	414	9	399	26
15	231	261	0.89	0.116 7	0.002 7	1.035 5	0.064 7	0.064 4	0.004 3	711	15	722	32	754	145
16	6	322	0.02	0.284 7	0.005 9	3.915 5	0.082 3	0.099 7	0.002 1	1 615	30	1 617	17	1 619	18
17	127	166	0.77	0.123 7	0.002 6	1.154 6	0.027 7	0.067 7	0.001 6	752	15	779	13	859	22
18	150	337	0.44	0.175 5	0.003 6	1.807 8	0.039 5	0.074 7	0.001 6	1 043	20	1 048	14	1 060	20
19	378	484	0.78	0.065 7	0.001 4	0.498 0	0.011 4	0.055 0	0.001 2	410	8	410	8	412	23
20	1 023	646	1.58	0.057 7	0.001 2	0.444 0	0.009 9	0.055 8	0.001 2	362	7	373	7	444	22
21	97	178	0.55	0.115 8	0.002 6	1.088 1	0.051 8	0.068 2	0.003 6	706	15	748	25	874	112
22	76	95	0.80	0.472 8	0.009 8	10.687 4	0.226 7	0.163 9	0.003 4	2 496	43	2 496	20	2 496	16
23	193	322	0.60	0.072 8	0.001 5	0.561 7	0.014 0	0.056 0	0.001 4	453	9	453	9	450	25
24	114	237	0.48	0.213 2	0.004 4	2.433 2	0.053 5	0.082 8	0.001 8	1 246	23	1 252	16	1 264	19
25	181	227	0.80	0.065 3	0.001 4	0.510 9	0.012 8	0.056 8	0.001 4	408	8	419	9	482	25
26	87	127	0.68	0.087 9	0.001 8	0.702 3	0.018 2	0.058 0	0.001 5	543	11	540	11	528	26
27	68	186	0.36	0.135 3	0.002 9	1.249 5	0.046 9	0.067 0	0.002 9	818	16	823	21	838	92
28	57	148	0.38	0.348 2	0.007 2	5.675 9	0.120 7	0.118 2	0.002 5	1 926	34	1 928	18	1 929	17
29	192	415	0.46	0.066 3	0.001 4	0.528 9	0.023 3	0.057 8	0.002 8	414	9	431	15	523	110
30	61	138	0.44	0.165 2	0.003 4	1.649 4	0.038 4	0.072 4	0.001 7	986	19	989	15	997	21

常及较高的 Th/U 值 (BDG11: Th/U=0.13~1.25; FD6: Th/U=0.02~1.78; FD13: 0.13~1.36; GD1: Th/U=0.45~1.05; KD1: Th/U=0.10~1.63; TD2: Th/U=0.28~1.70) (图 4)。锆石阴极发光图像显示 (图 5、图 6): 这些样品的锆石大多数为自形-半自形晶, 粒径集中在 45~60 μm , 长宽比大于 2:1。一些锆石具有显著的岩浆振荡环带, 少部分锆石经历了不同程度的溶蚀、

破碎及磨圆。部分锆石具有核幔结构, 中间为不规则的核, 有一定程度磨圆度, 阴极发光下较暗, 应为继承锆石。少数浑圆或短柱状的碎屑锆石。自形晶锆石的柱面和锥面结构较发育, 局部见很薄的热液增生边。浑圆状-次棱角状锆石应包含沉积地层中的碎屑锆石, 因此, 所测得锆石的年龄区间跨度较大 (表 4~表 9)。对于 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄 < 1 000 Ma 的样品, 一般无 Pb 丢失,

且²⁰⁷Pb 积累较少以及普遍 Pb 校正的不确定性,因而采用²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄更为可靠;但对²⁰⁶Pb/²³⁸U>1 000 Ma 的样品,由于含大量放射成因 Pb 而采用²⁰⁷Pb/²⁰⁶U 年龄 (Sircombe et al., 1999; Cawood et al., 2000)。在样品的 U-Pb 年龄谐和图中,锆石年龄基本上分布于和谐线上或其附近,表明锆石没有明显的 Pb 丢失,测试数据可信度较高。

样品 BDG11 的岩性为青灰色钠长角砾岩,采自于商南县博鱼沟地区。锆石的阴极发光(CL)图像见图 5,样品的锆石 U-Pb 同位素测试结果见表 4。在总共 30 个测试点中,大多数²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄测试点的数据

都位于谐和线上(图 7a、图 7b),产生了 3 组年龄段:

- ①第一组 11 颗锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄集中在 407~519 Ma, 3 个峰值年龄分别为~420 Ma、452 Ma 和 515 Ma。
- ②第二组 4 颗锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄集中在 673~709 Ma, 峰值年龄为~694 Ma。
- ③第三组 3 颗锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄集中在 793~840 Ma, 峰值年龄为~694 Ma。其余 5 颗锆石的年龄较为分散,分别为²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄 963 Ma, ²⁰⁷Pb/²⁰⁶U 年龄 1 675 Ma、1 755 Ma、2 020 Ma、2 474 Ma。

样品 BDG11 最年轻的锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄数据为 407 Ma,最老的²⁰⁶Pb/²³⁸U 为 2 474 Ma,最年轻的一组碎屑锆石年龄为 407~519 Ma,表明该层状钠长岩的沉

表 6 秦岭造山带凤县-山阳地区钠长角砾岩(FD13) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测试结果

Tab. 6 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotope results of albite breccia (FD13) in Fengxian-Shanyang area, Qinling Orogenic Belt

点号	含量(10 ⁻⁶)		Th/U	同位素比值						年龄(Ma)					
	Th	U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ
1	58	128	0.45	0.145 9	0.003 1	1.358 1	0.033 5	0.067 5	0.001 6	878	17	871	14	854	23
2	140	187	0.75	0.151 8	0.003 2	1.513 9	0.035 3	0.072 3	0.001 6	911	18	936	14	995	21
3	166	122	1.36	0.119 3	0.002 5	1.116 5	0.027 4	0.067 9	0.001 6	726	14	761	13	865	23
4	258	282	0.91	0.132 7	0.002 8	1.195 0	0.026 8	0.065 3	0.001 4	803	16	798	12	784	21
5	86	440	0.19	0.140 1	0.002 9	1.298 6	0.028 7	0.067 2	0.001 4	845	17	845	13	845	21
6	154	350	0.44	0.145 5	0.003 0	1.337 4	0.030 4	0.066 7	0.001 5	876	17	862	13	827	21
7	142	154	0.93	0.174 8	0.003 7	1.734 2	0.039 1	0.071 9	0.001 6	1 039	20	1 021	15	984	21
8	185	386	0.48	0.120 4	0.002 5	1.139 0	0.025 1	0.068 6	0.001 5	733	14	772	12	888	20
9	96	213	0.45	0.178 1	0.003 7	1.789 3	0.039 8	0.072 9	0.001 6	1 057	20	1 042	15	1 010	20
10	58	336	0.17	0.188 8	0.003 9	1.987 4	0.042 7	0.076 3	0.001 6	1 115	21	1 111	15	1 104	19
11	289	577	0.50	0.112 0	0.002 3	1.021 8	0.022 1	0.066 2	0.001 4	684	14	715	11	811	20
12	224	208	1.07	0.195 1	0.004 1	2.107 8	0.045 8	0.078 3	0.001 6	1 149	22	1 151	15	1 155	19
13	313	351	0.89	0.068 9	0.001 5	0.553 7	0.013 0	0.058 3	0.001 3	429	9	447	8	541	23
15	89	125	0.71	0.138 9	0.002 9	1.293 3	0.030 5	0.067 5	0.001 6	838	17	843	14	854	22
16	149	140	1.07	0.119 8	0.002 5	1.049 1	0.025 0	0.063 5	0.001 5	730	15	728	12	725	23
20	52	106	0.49	0.179 9	0.003 8	1.953 7	0.044 6	0.078 8	0.001 8	1 066	21	1 100	15	1 167	20
21	90	316	0.28	0.097 7	0.002 1	0.805 5	0.018 6	0.059 8	0.001 3	601	12	600	10	595	22
22	159	269	0.59	0.155 9	0.003 3	1.499 8	0.032 2	0.069 8	0.001 4	934	18	930	13	922	20
23	32	244	0.13	0.145 6	0.003 1	1.399 5	0.031 2	0.069 7	0.001 5	876	17	889	13	920	21
25	197	253	0.78	0.068 5	0.001 5	0.514 1	0.012 4	0.054 4	0.001 3	427	9	421	8	388	24
26	112	234	0.48	0.167 1	0.003 5	1.623 9	0.035 1	0.070 5	0.001 5	996	19	980	14	943	20
27	156	247	0.63	0.129 4	0.002 7	1.175 3	0.026 2	0.065 9	0.001 4	785	16	789	12	802	21
28	88	137	0.64	0.073 8	0.001 6	0.570 2	0.015 7	0.056 1	0.001 5	459	9	458	10	455	28
29	95	140	0.68	0.182 2	0.003 9	1.891 2	0.043 2	0.075 3	0.001 7	1 079	21	1 078	15	1 077	21
30	68	112	0.61	0.390 5	0.008 2	7.104 5	0.149 1	0.132 0	0.002 7	2 125	38	2 125	19	2 125	17

表 7 秦岭造山带凤县-山阳地区钠长角砾岩(GD1) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测试结果(续)

Tab. 7 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotope results of albite breccia (GD1) in Fengxian-Shanyang area, Qinling Orogenic Belt

点号	含量(10^{-6})		Th/U	同位素比值						年龄(Ma)					
	Th	U		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ
1	56	126	0.45	0.136 8	0.002 9	1.263 9	0.029 4	0.067 0	0.001 5	826	16	830	13	836	22
2	184	344	0.53	0.071 7	0.001 5	0.557 1	0.012 8	0.056 3	0.001 3	446	9	450	8	465	23
4	217	627	0.35	0.065 6	0.001 4	0.504 8	0.011 0	0.055 8	0.001 2	410	8	415	7	443	22
5	119	191	0.62	0.075 4	0.001 6	0.572 6	0.014 2	0.055 1	0.001 3	468	10	460	9	415	25
6	94	74	1.27	0.113 2	0.002 4	0.982 1	0.026 5	0.062 9	0.001 7	691	14	695	14	705	26
7	73	408	0.18	0.127 1	0.002 7	1.163 8	0.025 5	0.066 4	0.001 4	771	15	784	12	818	21
8	148	220	0.67	0.132 7	0.002 8	1.206 9	0.027 1	0.065 9	0.001 4	803	16	804	12	804	21
9	758	1 523	0.50	0.064 8	0.001 4	0.487 9	0.010 3	0.054 6	0.001 1	405	8	403	7	396	22
10	219	225	0.97	0.086 1	0.001 8	0.665 0	0.016 0	0.056 0	0.001 3	533	11	518	10	452	24
11	198	338	0.59	0.072 1	0.001 5	0.546 5	0.012 6	0.055 0	0.001 2	449	9	443	8	411	23
12	156	174	0.90	0.350 7	0.007 4	5.322 5	0.112 4	0.110 0	0.002 2	1938	35	1872	18	1 800	18
13	348	438	0.80	0.068 7	0.001 5	0.516 8	0.011 8	0.054 6	0.001 2	428	9	423	8	396	23
14	413	617	0.67	0.064 9	0.001 4	0.486 2	0.010 7	0.054 3	0.001 2	405	8	402	7	385	22
15	137	171	0.80	0.100 5	0.002 2	0.885 1	0.023 4	0.063 9	0.001 7	617	13	644	13	739	25
17	784	1 458	0.54	0.063 6	0.001 3	0.487 5	0.010 6	0.055 7	0.001 2	397	8	403	7	438	22
18	183	274	0.67	0.068 5	0.001 5	0.548 4	0.013 6	0.058 1	0.001 4	427	9	444	9	532	24
19	113	422	0.27	0.108 8	0.002 3	0.921 7	0.020 6	0.061 5	0.001 3	665	13	663	11	656	21
21	62	85	0.73	0.160 4	0.003 5	1.446 9	0.036 3	0.065 5	0.001 6	959	19	909	15	790	24
22	1 028	760	1.35	0.152 5	0.003 3	1.505 8	0.032 5	0.071 7	0.001 5	915	18	933	13	976	20
23	186	341	0.55	0.064 5	0.001 4	0.512 2	0.012 7	0.057 7	0.001 4	403	8	420	9	517	24
24	58	243	0.24	0.200 6	0.004 3	2.191 0	0.048 7	0.079 3	0.001 7	1 179	23	1 178	16	1 178	20
25	98	96	1.02	0.320 9	0.006 9	4.874 1	0.110 6	0.110 2	0.002 4	1 794	34	1 798	19	1 803	19
26	361	441	0.82	0.066 7	0.001 4	0.524 0	0.012 5	0.057 0	0.001 3	416	9	428	8	491	24
27	127	260	0.49	0.143 9	0.003 1	1.326 7	0.030 3	0.066 9	0.001 4	867	17	857	13	835	21
28	96	366	0.26	0.162 4	0.003 5	1.609 4	0.036 3	0.071 9	0.001 5	970	19	974	14	984	21
30	443	421	1.05	0.075 8	0.001 6	0.587 3	0.013 9	0.056 3	0.001 3	471	10	469	9	463	23

积时代晚于早泥盆世,岩石形成的主体时代晚于(407 $\pm$ 8)Ma。碎屑锆石年龄显示不同时代碎屑锆石含量不同,其中以早泥盆世(407~419 Ma, 13%)、奥陶纪(449~463 Ma, 22%)、新元古代(673~963 Ma, 35%)、古元古代(1 675~2 474 Ma, 17%)为主体。

样品 FD6 的岩性为角砾状白云石钠长岩,采自于柞水县凤凰镇水滴沟。锆石的阴极发光图像见图 5,样品的锆石 U-Pb 同位素测试结果见表 5。30 个测点均得到了谐和度较好的数据且位于谐和线上(图 7c、图 7d)。样品 FD6 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄测试结果可以划分为 4 组年龄段:①第一组 12 颗锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中

在 408~478 Ma,两个峰值年龄分别为~415 Ma 和~435 Ma。②第二组 4 颗锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中在 703~752 Ma,峰值年龄为~703 Ma。③第三组 3 颗锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中在 787~818 Ma,峰值年龄为~785 Ma。④第四组 2 颗年龄集中在 1 601~1 619 Ma,峰值年龄为~1 601 Ma。其余 9 颗锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 362 Ma、543 Ma、986 Ma、1 060 Ma、1 264 Ma、1 481 Ma、1 772 Ma、1 929 Ma、2 496 Ma。

样品 FD6 碎屑锆石的最年轻 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 362 Ma,最老的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 为 2 496 Ma,最年轻的一组碎屑锆石年龄为 408~478 Ma,表明该层状钠长岩的

表 8 秦岭造山带凤县—山阳地区钠长角砾岩(KD1) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测试结果
Tab. 8 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotope results of albite breccia (KD1) in the Fengxian-Shanyang area, Qinling Orogenic Belt

点号	含量(10 ⁻⁶)		Th/U	同位素比值						年龄(Ma)					
	Th	U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ
1	23	62	0.37	0.141 6	0.003 1	1.309 8	0.036 2	0.067 1	0.001 8	854	17	850	16	840	27
2	54	74	0.73	0.134 0	0.002 9	1.197 6	0.030 4	0.064 8	0.001 6	810	16	799	14	769	24
3	227	275	0.82	0.134 1	0.002 8	1.168 4	0.025 4	0.063 2	0.001 3	811	16	786	12	714	21
5	304	619	0.49	0.071 1	0.001 5	0.529 4	0.011 4	0.054 0	0.001 1	443	9	431	8	371	22
6	87	228	0.38	0.140 1	0.003 0	1.249 7	0.027 2	0.064 7	0.001 4	845	17	823	12	765	21
7	120	188	0.64	0.341 8	0.007 2	5.472 0	0.112 1	0.116 1	0.002 3	1 895	34	1 896	18	1 898	17
8	126	187	0.67	0.071 0	0.001 5	0.523 0	0.012 9	0.053 5	0.001 3	442	9	427	9	348	25
9	251	299	0.84	0.071 7	0.001 5	0.552 8	0.012 7	0.055 9	0.001 3	447	9	447	8	449	23
10	65	187	0.35	0.308 6	0.006 5	4.513 3	0.093 1	0.106 1	0.002 1	1 734	32	1 733	17	1 734	17
11	747	1 675	0.45	0.059 8	0.001 3	0.492 9	0.010 2	0.059 8	0.001 2	375	8	407	7	596	21
12	584	751	0.78	0.060 0	0.001 3	0.465 6	0.009 9	0.056 4	0.001 2	375	8	388	7	466	21
13	461	295	1.56	0.179 8	0.003 7	1.853 1	0.037 9	0.074 8	0.001 5	1 066	20	1 065	13	1 063	19
14	66	181	0.37	0.071 0	0.001 5	0.508 3	0.012 2	0.052 0	0.001 2	442	9	417	8	284	25
15	382	841	0.45	0.062 0	0.001 3	0.453 0	0.009 3	0.053 0	0.001 1	388	8	379	7	331	21
16	172	106	1.63	0.127 2	0.002 7	1.140 0	0.027 2	0.065 1	0.001 5	772	15	772	13	777	22
17	186	334	0.56	0.071 1	0.001 5	0.520 7	0.011 6	0.053 2	0.001 2	443	9	426	8	336	23
18	97	128	0.76	0.127 5	0.002 7	1.104 1	0.024 9	0.062 9	0.001 4	774	15	755	12	704	21
19	155	118	1.31	0.130 3	0.002 7	1.173 2	0.029 0	0.065 4	0.001 6	790	16	788	14	786	23
20	64	162	0.40	0.132 0	0.002 7	1.195 3	0.027 1	0.065 8	0.001 5	799	16	798	13	799	21
21	258	409	0.63	0.070 7	0.001 5	0.530 6	0.011 3	0.054 5	0.001 2	440	9	432	8	391	22
22	181	193	0.94	0.351 8	0.007 2	5.562 1	0.109 6	0.114 8	0.002 2	1 943	34	1 910	17	1 876	17
23	260	238	1.10	0.069 9	0.001 5	0.584 3	0.013 7	0.060 7	0.001 4	435	9	467	9	629	22
24	142	224	0.63	0.071 2	0.001 5	0.526 2	0.012 0	0.053 7	0.001 2	443	9	429	8	357	23
25	291	494	0.59	0.066 3	0.001 4	0.487 7	0.010 4	0.053 4	0.001 1	414	8	403	7	346	22
27	213	357	0.60	0.066 0	0.001 4	0.481 3	0.010 8	0.053 0	0.001 2	412	8	399	7	328	23
28	92	268	0.35	0.077 0	0.001 6	0.588 9	0.012 8	0.055 5	0.001 2	478	9	470	8	434	22
30	90	874	0.10	0.131 2	0.002 7	1.187 9	0.022 9	0.065 7	0.001 3	795	15	795	11	797	19

沉积时代晚于早泥盆世,岩石形成的主体时代晚于408±8 Ma。碎屑锆石年龄显示不同时代碎屑锆石含量不同,其中以早泥盆世(408~416 Ma, 13%)、志留纪(421~434 Ma, 13%)、奥陶纪(453~478 Ma, 13%)、新元古代(703~986 Ma, 27%)、中元古代(1 060~1 601 Ma, 13%)、古元古代(1 619~2 496 Ma, 13%)为主体。

样品 FD13 的岩性为钠化绢云母绿泥千枚岩,采集自柞水县万丈沟西沟。测试锆石的阴极发光图像

见图 5。样品 FD13 的锆石 U-Pb 同位素测试结果见表 6。在 30 个分析测试点中,有 25 个测试点得到了谐和度较好的数据(图 7e~图 7f)。25 个测试点的结果产生了 4 组年龄段:①第一组 3 颗锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄集中在 427~459 Ma,峰值年龄为~426 Ma。②第二组 4 颗锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄集中在 726~785 Ma,峰值年龄为~727 Ma。③第三组 3 颗锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄集中在 803~878 Ma,峰值年龄为~869 Ma。④第四组 3 颗锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄集中在 984~1 010 Ma。其余锆

表 9 秦岭造山带凤县-山阳地区钠长角砾岩(TD2) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测试结果

Tab. 9 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotope results of albite breccia (TD2) in the Fengxian-Shanyang area, Qinling Orogenic Belt

点号	含量 (10 ⁻⁶)		Th/U	同位素比值						年龄 (Ma)					
	Th	U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ
1	529	578	0.91	0.076 6	0.001 7	0.601 5	0.013 9	0.056 8	0.001 2	476	10	478	9	485	23
2	251	421	0.60	0.148 5	0.003 3	1.359 0	0.030 2	0.066 3	0.001 4	892	18	871	13	816	21
3	115	153	0.76	0.358 1	0.007 9	5.983 5	0.131 4	0.121 0	0.002 5	1 973	37	1 973	19	1 971	18
4	205	362	0.57	0.075 4	0.001 7	0.579 2	0.013 5	0.055 7	0.001 2	469	10	464	9	438	23
5	228	434	0.52	0.139 1	0.003 0	1.280 5	0.028 5	0.066 7	0.001 4	839	17	837	13	829	21
6	347	619	0.56	0.075 9	0.001 7	0.575 3	0.013 0	0.055 0	0.001 2	471	10	461	8	410	23
7	163	309	0.53	0.072 7	0.001 7	0.637 8	0.035 0	0.063 6	0.003 8	453	10	501	22	728	130
8	77	280	0.28	0.082 7	0.001 8	0.629 0	0.014 9	0.055 1	0.001 2	512	11	495	9	417	24
9	91	54	1.70	0.136 2	0.003 0	1.228 8	0.034 2	0.065 4	0.001 8	823	17	814	16	789	27
10	89	196	0.46	0.074 9	0.001 6	0.554 2	0.013 9	0.053 7	0.001 3	465	10	448	9	358	25
12	167	134	1.25	0.435 3	0.009 4	9.002 8	0.190 5	0.150 0	0.003 0	2 329	42	2 338	19	2 346	17
13	999	1 413	0.71	0.121 3	0.002 6	1.182 6	0.024 9	0.070 7	0.001 4	738	15	793	12	950	20
14	472	327	1.45	0.120 8	0.002 6	1.102 9	0.024 5	0.066 3	0.001 4	735	15	755	12	815	21
15	241	223	1.08	0.155 9	0.003 4	1.506 9	0.035 1	0.070 1	0.001 6	934	19	933	14	932	21
16	142	176	0.80	0.484 1	0.010 3	11.277 3	0.234 3	0.169 0	0.003 3	2 545	45	2 546	19	2 548	16
18	88	180	0.49	0.133 4	0.002 9	1.189 4	0.026 7	0.064 7	0.001 4	807	16	796	12	765	21
19	81	129	0.63	0.218 9	0.004 7	2.474 1	0.054 4	0.082 0	0.001 7	1 276	25	1 264	16	1 246	19
20	129	311	0.42	0.075 1	0.001 6	0.583 7	0.013 9	0.056 4	0.001 3	467	10	467	9	469	24
22	399	639	0.63	0.118 0	0.002 5	1.030 9	0.021 4	0.063 5	0.001 3	719	14	719	11	723	20
23	120	128	0.94	0.105 6	0.002 6	0.909 7	0.071 6	0.062 5	0.005 2	647	15	657	38	691	182
24	165	259	0.64	0.262 2	0.005 5	3.380 8	0.069 7	0.093 6	0.001 9	1 501	28	1 500	16	1 500	18
25	132	161	0.82	0.072 6	0.001 5	0.559 5	0.014 3	0.056 0	0.001 4	452	9	451	9	450	26
28	218	223	0.97	0.456 2	0.009 5	9.948 4	0.199 2	0.158 4	0.003 1	2 423	42	2 430	18	2 439	16
30	76	98	0.78	0.117 6	0.002 5	1.009 3	0.029 3	0.062 3	0.001 8	717	15	709	15	685	29

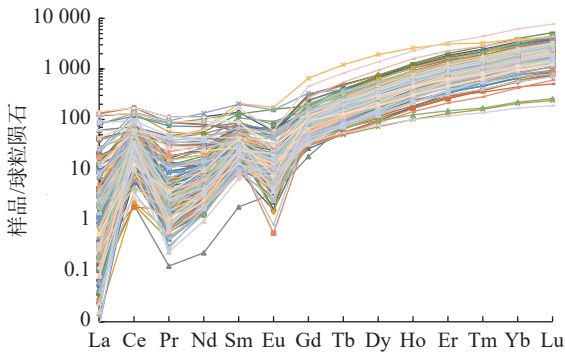


图4 秦岭造山带凤县-山阳地区富钴-镍钠长岩
(6个样品)锆石稀土元素标准化配分模式图
(据 Sun et al. 1989)

Fig. 4 REEs (rare earth elements) patterns of zircons for Cobalt-Nickel-rich albites (6 samples) in the Fengxian-Shanyang area, Qinling Orogenic Belt

石²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄主要为601 Ma、684 Ma、911 Ma、934 Ma。

样品 FD13 的碎屑锆石最年轻²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄为 427 Ma, 最老²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄为 2 125 Ma, 最年轻的一组碎屑锆石年龄为 427~459 Ma, 表明该层状钠长岩的沉积时代晚于晚志留世, 岩石形成的主体时代晚于 (427±9) Ma。碎屑锆石年龄显示不同时代碎屑锆石含量不同, 其中以志留纪(427~429 Ma, 8%)、新元古代(601~996 Ma, 64%)、中元古代(1 010~1 167 Ma, 20%)为主体。

样品 GD1 的岩性为白云石钠长岩, 采自商南县过凤楼。测试锆石的阴极发光图像见图 6。样品的锆石 U-Pb 同位素测试结果见表 7。30 个测点得到了 26 个谐和度较好的数据(图 8a、图 8b)。26 个²⁰⁶Pb/²³⁸U

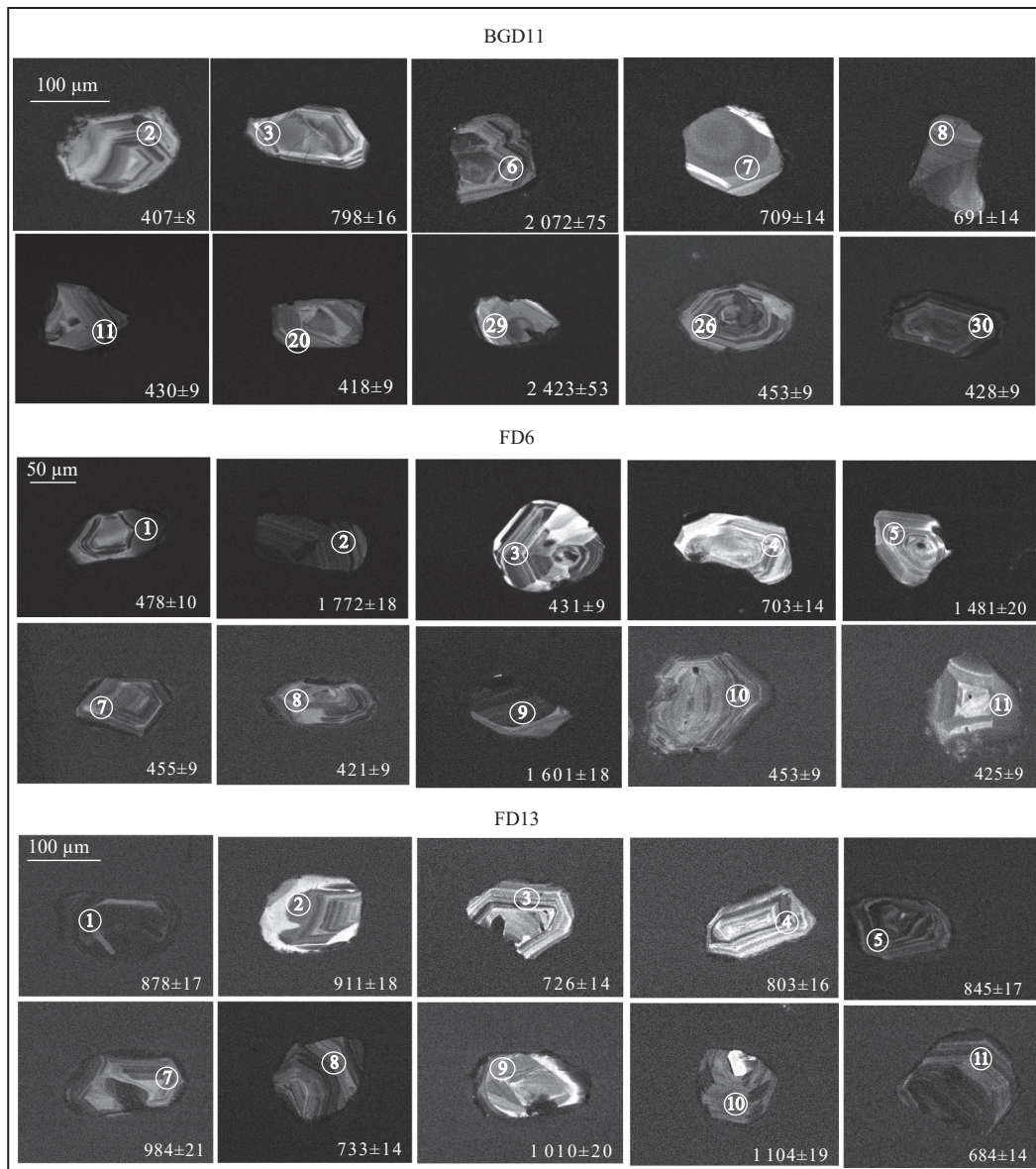


图5 秦岭造山带凤县-山阳地区富钴-镍钠长岩样品 BGD11、FD6 和 FD13 锆石阴极发光照片
Fig. 5 Cathodoluminescence images of zircon BGD11, FD6 and FD13 from Cobalt-Nickel-rich albite in the Fengxian-Shanyang area, Qinling Orogenic Belt

年龄值可划分为 3 组: ①第一组 12 颗锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中在 397~471 Ma, 两个峰值年龄分别为 ~403 Ma、434 Ma。②第二组 9 颗锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中在 662~954 Ma, 峰值年龄为 ~662 Ma、~800 Ma、954 Ma。③第三组 2 颗锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{U}$ 年龄集中在 1 800~1 803 Ma, 峰值年龄为 ~1 793 Ma。其余 3 颗锆石中 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄 533 Ma、617 Ma, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{U}$ 年龄为 1 178 Ma。

样品 GD1 碎屑锆石的最年轻 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 397 Ma, 最老年龄为 1 803 Ma, 最年轻的一组碎屑锆石

年龄为 397~471 Ma, 表明该层状钠长岩的沉积时代晚于早泥盆世, 岩石形成的主体时代晚于 (397±8) Ma。碎屑锆石年龄显示不同时代碎屑锆石含量不同, 其中以早泥盆世 (397~416 Ma, 23%)、奥陶纪 (446~471 Ma, 15%)、新元古代 (617~970 Ma, 38%) 为主体。

样品 KD1 的岩性为含白云石钠长岩, 采自于商南县开河。测试锆石的阴极发光图像见图 6。样品的锆石 U-Pb 同位素测试结果见表 8。30 个测点得到了 27 个谐和度较好的数据 (图 8c、图 8d)。27 个数据的年龄值可划分为 4 组: ①第一组 3 颗锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄

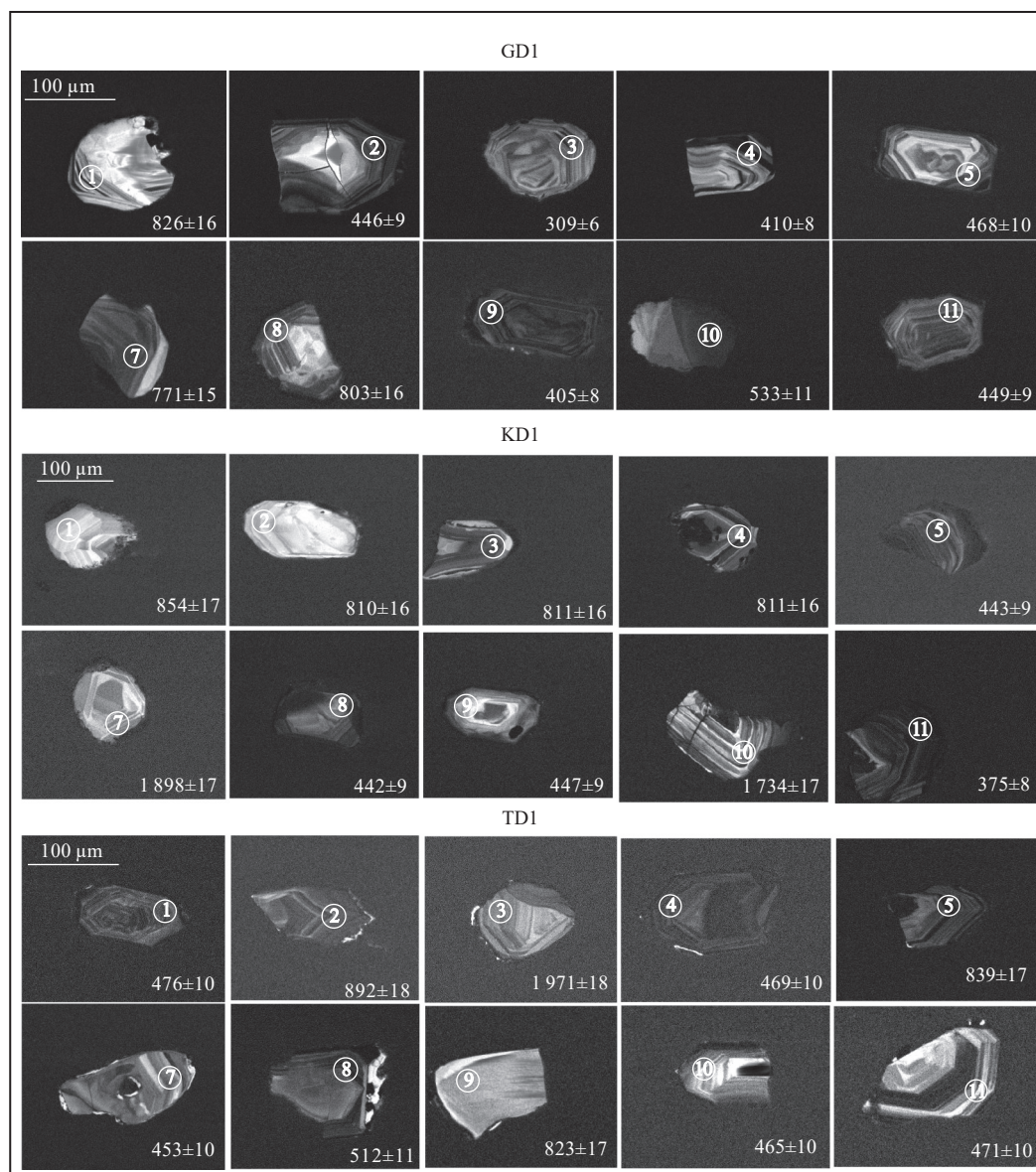


图6 秦岭造山带凤县-山阳地区富钴-镍钠长岩样品 GD1、KD1 和 TD2 锆石阴极发光照片

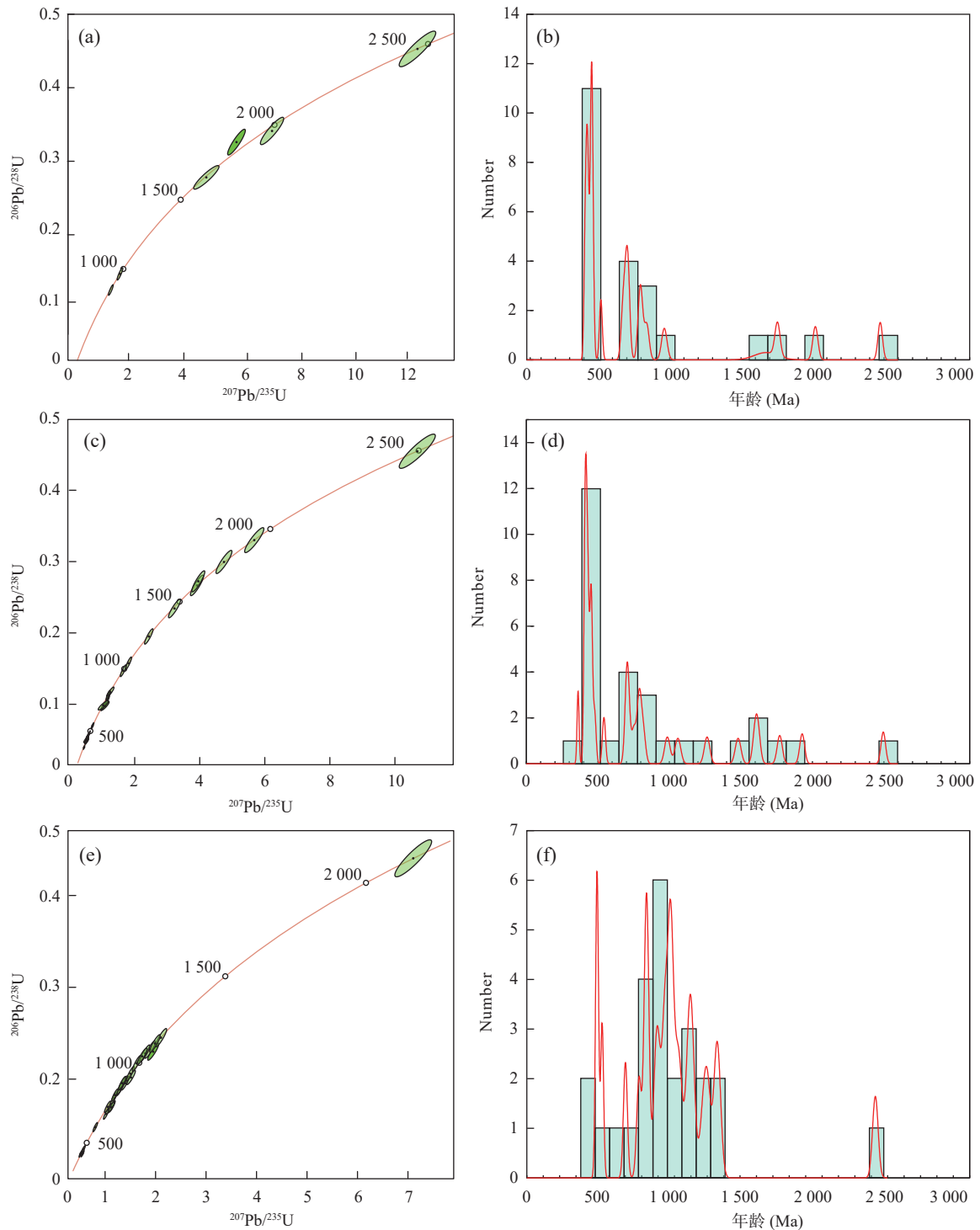
Fig. 6 Cathodoluminescence images of zircon GD1, KD1 and TD2 from Cobalt-Nickel-rich albite in the Fengxian-Shanyang area, Qinling Orogenic Belt

集中在 375~388 Ma, 峰值年龄为 ~374 Ma。②第二组 11 颗锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中在 412~478 Ma, 峰值年龄为 ~440 Ma。③第三组 9 颗锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中在 772~857 Ma, 峰值年龄为 ~786 Ma。④第四组 2 颗锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{U}$ 年龄为 1 876~1 898 Ma, 峰值年龄为 ~1 883 Ma。其余 2 颗锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{U}$ 年龄为 1 063 Ma 和 1 734 Ma。

样品 KD1 碎屑锆石最年轻年龄为 375 Ma, 最老年龄为 1 898 Ma。最年轻的一组碎屑锆石年龄为 375~388 Ma, 表明该层状钠长岩的沉积时代晚于中—晚泥盆世, 岩石形成的主体时代晚于 (375±8) Ma。碎屑锆

石年龄显示不同时代碎屑锆石含量不同, 其中以泥盆纪 (375~414 Ma, 19%)、志留纪 (435~443 Ma, 26%)、新元古代 (772~854 Ma, 33%) 和古元古代 (1 734~1 898 Ma, 11%) 为主体。

样品 TD2 的岩性为铁白云石钠长岩, 采自于山阳县桐木沟。测试锆石的阴极发光图像见图 6。样品的锆石 U-Pb 同位素测试结果见表 9。30 个测点得到了 24 个谐和度较好的数据 (图 8e、图 8f)。24 个数据的年龄值可划分为 4 组: ①第一组 8 颗锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中在 452~512 Ma, 峰值年龄为 ~464 Ma。②第二组 4 颗锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中在 717~738 Ma, 峰值



a、b.样品编号BGD11, 采自商南博鱼沟; c、d.样品编号FD6, 采自凤凰镇水滴沟; e、f.样品编号FD13, 采自凤凰镇万丈沟西沟

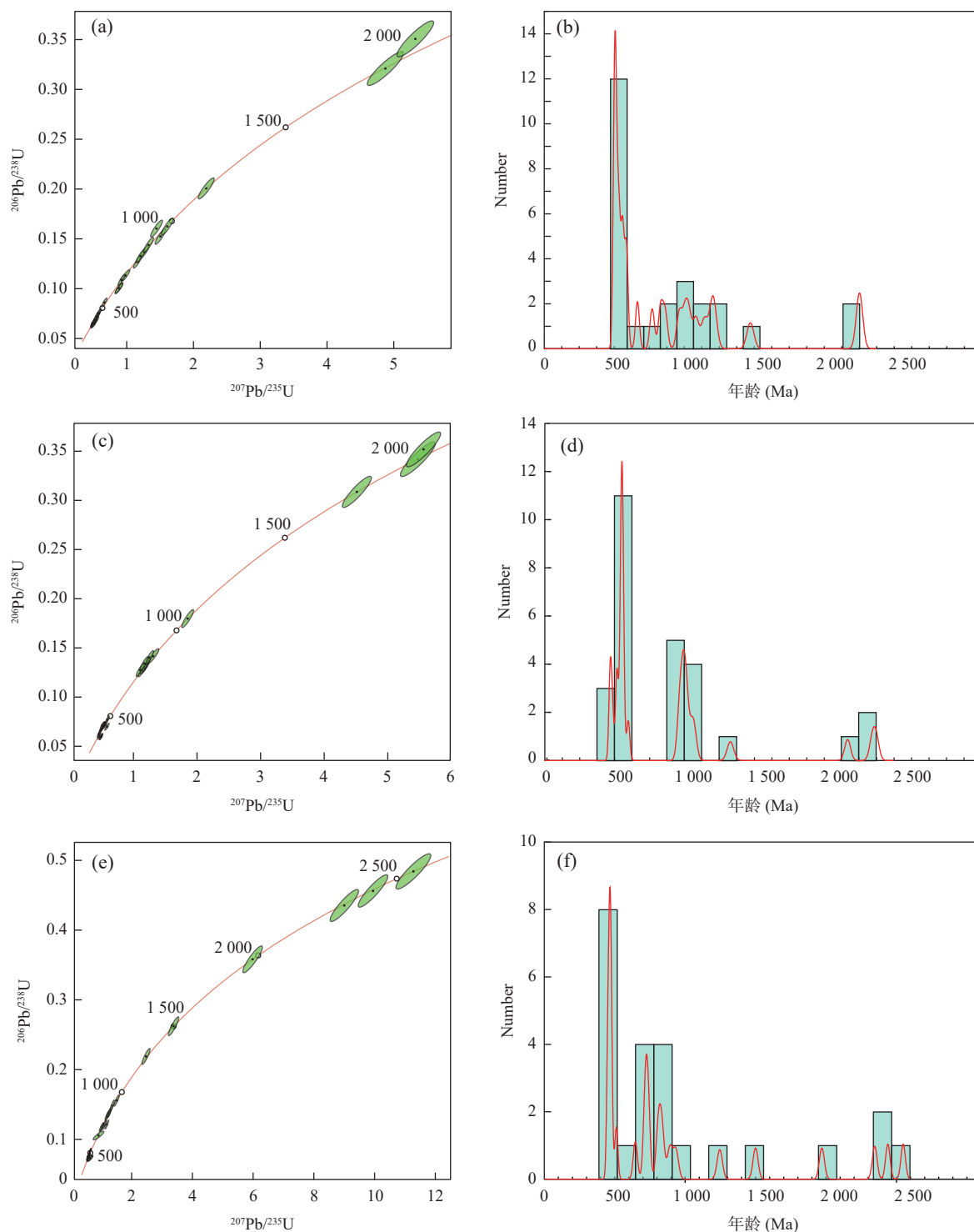
图7 秦岭造山带凤县-山阳地区富钴-镍钠长岩样品(BGD11、FD6和FD13)锆石LA-ICP-MS U-Pb谐和图和年龄谱图

Fig. 7 Zircon LA-ICP-MS U-Pb diagrams and age spectrums of Cobalt-Nickel-rich albites (BGD11, FD6, and FD13) in the Fengxian-Shanyang area, Qinling Orogenic Belt

年龄为 ~ 721 Ma。③第三组4颗锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中在 $807\sim 892$ Ma, 峰值年龄为 ~ 812 Ma。④第四组2颗锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{U}$ 年龄集中在 $2\,346\sim 2\,439$ Ma。其余

6颗锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄 647 Ma、 934 Ma, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{U}$ 年龄为 $1\,246$ Ma、 $1\,500$ Ma、 $1\,971$ Ma、 $2\,548$ Ma。

TD2样品碎屑锆石最年轻年龄为 452 Ma, 最老



a、b.样品编号 GD1, 采自商南柳树湾; c、d.样品编号 KD1, 采自商南县开河; e、f.样品编号 TD2, 采自山阳县桐木沟

图8 秦岭造山带凤县-山阳地区富钴-镍钠长岩样品(GD1、KD1 和 TD2)锆石 LA-ICP-MS U-Pb 谐和图和年龄谱图

Fig. 8 Zircon LA-ICP-MS U-Pb diagrams and age spectrums of Cobalt-Nickel-rich albites (GD1, KD1, and TD2) in the Fengxian-Shanyang area, Qinling Orogenic Belt

年龄为 2 548 Ma, 最年轻的一组碎屑锆石年龄为 452~512 Ma, 表明该层状钠长岩的沉积时代晚于晚奥陶世, 岩石形成的主体时代晚于 (452±9) Ma。碎屑

锆石年龄显示不同时代碎屑锆石含量不同, 其中以奥陶纪(452~476 Ma, 29%)、新元古代(647~934 Ma, 42%)、中元古代(1 246~1 500 Ma, 8%)和新元古代

(1 971~2 439 Ma, 13%)为主。

5 凤县-山阳地区富钴-镍钠长岩成岩年龄

秦岭造山带凤县-山阳地区富钴-镍钠长岩显示了沉积岩碎屑锆石的年代学分布特征。为了确定沉积物的源区,笔者首先讨论其物源属性。碎屑锆石的微量元素组成可以有效反应源区沉积物的属性,以此来确定其可能的源区和构造环境(王安琪, 2020)。锆石微量元素特征显示这些富钴-镍钠长岩的锆石落入陆壳和弧造山带范围内(图 9),表明秦岭造山带凤县-山阳地区富钴-镍钠长岩具有壳内地层岩石特征,且经历了多阶段造山过程。此外,野外调查显示这些钠长岩多数顺层产出,其内部各类原生沉积构造发育,同样反映其沉积岩特征,为一类介于正常沉积岩和热

水沉积岩之间的一种特殊类型沉积岩,这些岩石的锆石 U-Pb 年代学数据也显示其形成时代具有本区泥盆系地层碎屑锆石年龄分布特征,充分证明本区层状钠长岩的沉积成因(范玉须等, 2018)。

组成沉积地层的碎屑物质形成年龄一般比地层年代较老,因此碎屑锆石年龄常常被用来限制地层的沉积时代。沉积成因岩石的年龄小于或小于等于碎屑锆石群中最小的年龄(Fedo et al., 2003; Gehrels, 2011)。秦岭造山带凤县-山阳地区富钴-镍钠长岩主要赋存于中泥盆统牛耳川组、池沟组及大枫沟组,中-上泥盆统青石坪组,上泥盆统星红铺组及上泥盆-下石炭九里坪组。本次针对赋存于泥盆系的这些富钴-镍钠长岩的 180 颗锆石进行了 LA-ICP-MS U-Pb 定年,获得和谐度较好的(90%~110%)155 颗碎屑锆石年龄,其锆石年龄均分布在谐和曲线附近(图 10a)。这些富钴-镍钠长岩的锆石年龄主要分布在 375~543 Ma、

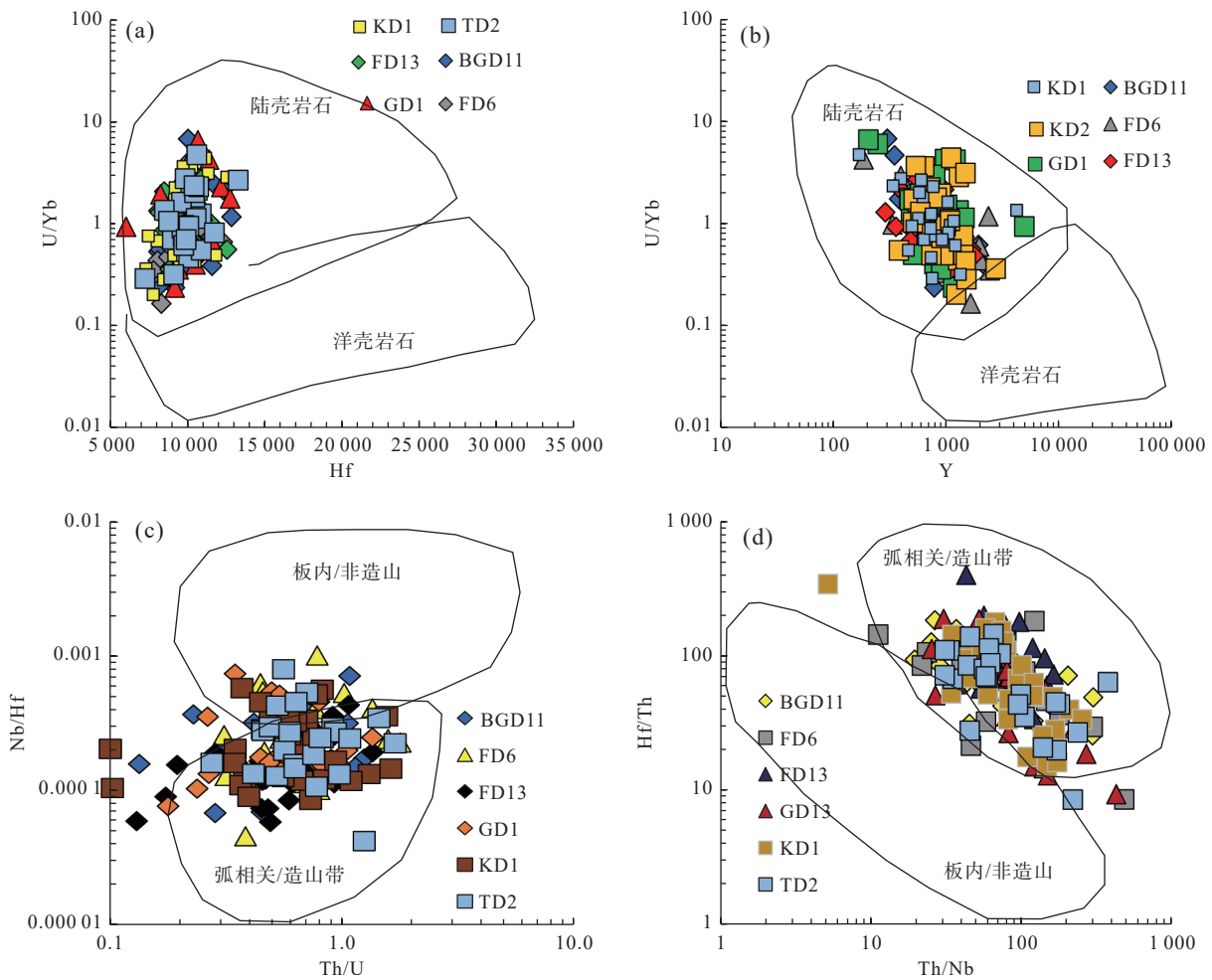


图9 秦岭造山带凤县-山阳地区富钴-镍钠长岩样品锆石成因判别图解

Fig. 9 Zircon genesis discrimination diagram of Cobalt-Nickel-rich albites in the Fengxian-Shanyang area, Qinling Orogenic Belt

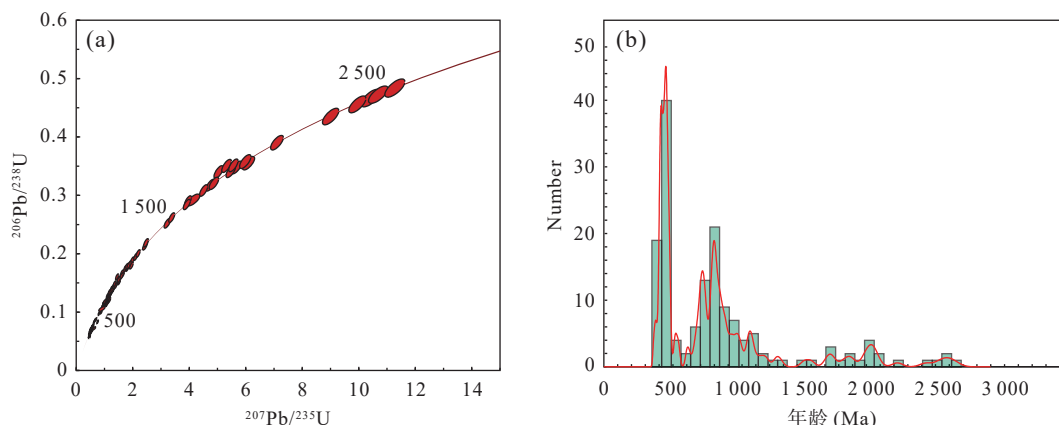


图10 秦岭造山带凤县-山阳地区富钴-镍钠长岩所有锆石年龄谐和图(a)和年龄谱图(b)

Fig. 10 (a) All the zircon U-Pb ages concordant diagram and (b) ages spectrum of Cobalt-Nickel-rich albites in the Fengxian-Shanyang area, Qinling Orogenic Belt

665~959 Ma、963~1 155 Ma 等几个区段(图 10b), 其年龄峰值主要对应早泥盆纪(397~425 Ma, 15 个, 10%)、志留纪(421~443 Ma, 17 个, 11%)、奥陶纪(446~478 Ma, 23 个, 15%)、新元古代(543~996 Ma, 62 个, 40%)、中元古代(1 010~1 500 Ma, 12 个, 8%)、古元古代(1 601~2 496 Ma, 18 个, 12%)。分布广泛的锆石年龄反应了不同时期的岩石组分对泥盆纪地层中钠长岩沉积过程均有贡献。研究区内泥盆系岩性以灰岩、白云质灰岩、泥灰岩、白云岩夹板岩、碳酸盐岩与碎屑岩为主, 与下伏地层存在平行不整合。秦岭地区丰富的金属矿产主要赋存与泥盆纪地层中。富钴-镍钠长角砾岩围岩产于上泥盆统星红铺组中, 整体上呈黄棕色, 与粉砂质板岩和绢云母板岩等变质岩及灰岩和砂岩等沉积岩互层产出。因此, 秦岭造山带凤县-山阳地区富钴-镍钠长岩成岩年代主起始于泥盆系(方维萱等, 2000, 2001)。

此外, 秦岭造山带内典型的双王及色河铺钠长角砾岩均赋存于上泥盆统星红铺组, 二台子金矿区钠长角砾岩赋存于古道岭组与星红铺组接触带, 故其形成时代应该晚于上泥盆统, 即钠长角砾岩形成年龄下限为 359 Ma。而双王金矿及二台子铜金矿 NE 向断裂构造及各类脉岩较为发育, 其中双王矿区闪斜煌斑岩和石英钠长岩呈 NE 向切割钠长角砾岩, 说明脉岩形成明显晚于钠长角砾岩。这些闪斜煌斑岩脉和石英钠长岩脉的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄分别为(214.4±2.7) Ma 和(213.0±1.5) Ma, 指示钠长角砾岩及脉岩的形成年龄上限(刘冲昊, 2016; 程锋, 2016)。

综上所述, 研究区层状钠长岩顺层产出, 其内部

各类原生沉积构造发育, 层状钠长岩产出宏观特征、岩石矿物学及岩石地球化学特征(稀土元素配分模式)、稳定同位素(C-O-S 同位素)及流体包裹体特征均显示其具有沉积岩特征, 为一类介于正常沉积岩和热水沉积岩之间的一种特殊类型沉积岩, 成岩物质来源于深部岩浆和基底地层。其锆石 U-Pb 同位素年龄数据也显示其形成时代具有本区泥盆系地层碎屑锆石年龄分布特征, 充分证明秦岭造山带凤县-山阳地区富钴-镍钠长岩为同沉积成因, 其形成年龄和该区泥盆系地层年龄一致(范玉须等, 2018)。凤县-山阳地区附近出露的钠长角砾岩及脉状钠长岩是构造-岩浆长期作用的结果, 由深部岩浆作用等成岩方式形成, 是后期(三叠纪)构造和热液沿凤县-山阳深大断裂薄弱带及 NWW-近 EW 向与 NE 向断裂叠加形成(石准立等, 1989; 胡西顺, 1998; 范玉须等, 2018)。

6 结论

(1) 秦岭造山带凤县-山阳地区富钴-镍钠长岩主要包括商南县博鱼沟青灰色钠长角砾岩、商南县过凤楼白云石钠长岩、商南县开河白云石钠长岩、商南县开河铁白云石方解石钠长岩、山阳县桐木沟铁白云石钠长岩和柞水县凤凰镇水滴沟白云石钠长岩。这些富钴-镍钠长岩主要赋存于断裂两侧出露的中泥盆统牛耳川组、池沟组及大枫沟组, 中—上泥盆统青石垭组, 上泥盆统星红铺组及上泥盆—下石炭九里坪组。因此, 这些钠长岩类主要受凤县-山阳断裂及泥盆纪地层双重控制。

(2)秦岭造山带凤县—山阳地区富钴—镍钠长岩的锆石年龄峰值主要对应早泥盆纪(397~425 Ma, 15 个, 10%)、志留纪(421~443 Ma, 17 个, 11%)、奥陶纪(446~478 Ma, 23 个, 15%)、新元古代(543~996 Ma, 62 个, 40%)、中元古代(1 010~1 500 Ma, 12 个, 8%)和古元古代(1 601~2 496 Ma, 18 个, 12%)。锆石微量元素和 U-Pb 年代学显示这些钠长岩具有壳内地层沉积成因特征,并经历了多阶段造山过程,其形成时代具有本区泥盆系地层碎屑锆石年龄分布特征。广泛的锆石年龄反应了这些富钴—镍钠长角砾岩起始形成于泥盆纪,原岩物质来源于不同时期陆壳沉积组分。

参考文献(References):

- 包崇高,黄长青,高元龙,等. 柞山地区铜银金镍钴成矿条件与找矿前景[J]. 有色金属矿产与勘查, 1997, (3): 23-27.
- BAO Chonggao, HUANG Changqing, GAO Yuanlong, et al. Metallogenic conditions and prospecting potential of copper, silver, gold, nickel and cobalt in Zhashan area[J]. Minerals Exploration, 1997, (3): 23-27.
- 陈擎,赵如意,康利刚,等. 青海查香卡铀多金属矿床钠长岩脉地质特征及其对矿床成因的约束[J]. 矿床地质, 2021, 40(5): 1029-1044.
- CHEN Qing, ZHAO Ruyi, KANG Ligang, et al. Geological characteristics of albitite dikes and its constraint on genesis of Chachaxiangka U-polymetallic deposit in Qinghai Province[J]. Mineral Deposit, 2021, 40(5): 1029-1044.
- 陈龙龙,唐利,沈彦谋,等. 秦岭造山带栾川 Mo-W 矿集区和柞水—山阳 Cu-Mo 矿集区斑岩型矿床成矿差异性对比[J]. 西北地质, 2024, 57(2): 67-89.
- CHEN Longlong, TANG Li, SHEN Yanmou, et al. Comparison on Metallogenic Differences of Porphyry Deposits between Luan-chuan Mo-W and Zhashui-Shanyang Cu-Mo Ore-clusters in Qinling Orogenic Belt: Constraints of Magmatic Source and Metallogenic Conditions[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(2): 67-89.
- 程锋. 陕西省双王金矿床物质组成与矿床成因研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.
- CHENG Feng. Studies on Material Composition and Genesis of the Shangwang Gold Deposit, Shaanxi Province[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016.
- 范玉须,方维萱,李廷栋,等. 陕西双王金矿钠长角砾岩锆石 SHRIMP U-Pb 年代学、岩石地球化学特征及其构造意义[J]. 地质学报, 2018, 92(9): 1873-1887.
- FAN Yuxu, FANG Weixuan, LI Tingdong, et al. Zircon SHRIMP Geochronology and Geochemical Characteristics of Albite-Carbonate Breccia of Shuangwang Gold Deposit in Shaanxi Province and Tectonic Significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2018, 92(9): 1873-1887.
- 方维萱,张国伟,胡瑞忠,等. 陕西二台子铜金矿床钠长石碳酸(角砾)岩类特征及形成构造背景分析[J]. 岩石学报, 2000, 16(3): 392-400.
- FANG Weixuan, ZHANG Guowei, HU Ruizhong, et al. Analysis on tectonic background of formation and characteristics of albite carbonate breccia from Ertaizi Cu-Au deposits in the Qinling orogen[J]. Acta Petrologica Sinica, 2000, 16(3): 392-400.
- 方维萱,张国伟,胡瑞忠,等. 秦岭造山带泥盆系热水沉积岩相应用研究及实例[J]. 沉积学报, 2001, 19(1): 48-54.
- FANG Weixuan, ZHANG Guowei, HU Ruizhong, et al. On Implications of the Devonian Hydrothermal Sedimentary Facies in the Qinling Orogeny[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(1): 48-54.
- 耿艳光. 中条山南河沟、桐木沟铜矿钠长岩和矿床成因研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- GENG Yanguang. Study on the albite and genesis of the Nanhegou and Tongmugou copper deposits in Zhongtiaoshan [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.
- 谷玉明,汪超,李超,等. 陕西省丹凤竹林关——商南豆腐尖地区钠长(角砾)岩型金矿的地质特征及找矿方向[J]. 世界有色金属, 2018, (14): 105-110.
- GU Yuming, WANG Chao, LI Chao, et al. Geological characteristics and prospecting direction of albite (breccia) rock type gold deposits in Zhulinguan-Doufujian area, Danfeng County, Shaanxi Province[J]. World Nonferrous Metals, 2018, (14): 105-110.
- 韩见,陈其慎,杨雪松,等. 钴资源现状及未来 5-10 年供需形势分析[J]. 中国地质, 2023, 50(3): 743-755.
- HAN Jian, CHEN Qishen, YANG Xuesong, et al. Cobalt resource status and supply and demand situation analysis in the next 5-10 years[J]. Geology in China, 2023, 50(3): 743-755.
- 胡西顺. 陕西柞山地区钠长碳酸角砾岩的成因及形成机制[J]. 有色金属矿产与勘查, 1998, (6): 37-43.
- HU Xishun. The genesis and formation mechanism of albite-carbonate breccia in Zhashan area, Shaanxi[J]. Minerals Exploration, 1998, (6): 37-43.
- 孔令湖,邓文兵,尚磊. 中国镍矿资源现状与国家级镍矿床实物地质资料筛选[J]. 有色金属(矿山部分), 2021, 73(2): 79-86.
- KONG Linghu, DENG Wenbing, SHANG Lei. Current status of nickel ore resources in China and state-level screening of geological physical samples for nickel ore deposits[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2021, 73(2): 79-86.
- 李树雷,裴春霞,杨振,等. 秦岭柞水凤凰镇地区镍矿床地质特征及找矿前景浅析[J]. 西部探矿工程, 2022, 34(03): 119-123+126.
- LI Shulei, PEI Chunxia, YANG Zhen, et al. Geological characteristics and prospecting prospects of nickel deposits in Fenghuang Town, Zhashui, Qinling Mountains[J]. West-china Exploration Engineering, 2022, 34(03): 119-123+126.
- 李华,蒋少涌,李世金,等. 东昆仑造山带岩浆型镍钴矿床地质特征、成因机制与找矿标志分析[J]. 岩石学报, 2023,

- 39(4): 1041-1060.
- LI Hua, JIANG Shaoyong, LI Shijin, et al. Geological characteristics, ore genetic mechanism and exploration indicators of magmatic nickel-cobalt deposits in the East Kunlun Orogenic Belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2023, 39(4): 1041-1060.
- 李小亮, 杨乐, 张松涛, 等. 青海东昆仑驼路沟钴矿的成矿时代与成因[J]. *世界地质*, 2022, 41(3): 483-497.
- LI Xiaoliang, YANG Le, ZHANG Songtao, et al. Metallogenic age and genesis of Tuolugou cobalt deposit in East Kunlun, Qinghai[J]. *World Geology*, 2022, 41(3): 483-497.
- 李建波, 鲁勇花. 二台子金矿床构造控矿规律与成矿预测[J]. *西部探矿工程*, 2006(7): 133-135+138.
- LI Jianbo, LU Yonghua. Structural ore-controlling regularity and metallogenic prognosis of Ertaizi gold deposit[J]. *West-china Exploration Engineering*, 2006(7): 133-135+138.
- 李强. 南秦岭富钠长石岩石的岩石学和地球化学研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 2011, 30(2): 199-207.
- LI Qiang. Petrology and geochemistry of albite-rich rocks from the South Qinling[J]. *Acta Petrological Mineralogica*, 2011, 30(2): 199-207.
- 李怀坤, 耿建珍, 郝爽, 等. 用激光烧蚀多接收器等离子体质谱仪(LA-MC-ICPMS)测定锆石 U-Pb 同位素年龄的研究[J]. *矿物学报*, 2009, 29(S1): 600-601.
- LI Huaikun, GENG Jianzhen, HAO Shuang, et al. Zircon U-Pb isotopic age determination by laser ablation multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-MC-ICPMS)[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2009, 29 (S1): 600-601.
- 刘冲昊. 陕西双王金矿床成矿机制与成矿规律 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2016.
- LIU Chonghao. Metallogenic Mechanism and Regularity of the Shuangwang Gold Deposit, Shaanxi Province[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016.
- 赖绍聪, 张国伟, 董云鹏, 等. 秦岭-大别勉略构造带蛇绿岩与相关火山岩性质及其时空分布[J]. *中国科学 (D 辑: 地球科学)*, 2003, 33(12): 1174-1183.
- LAI Shaocong, ZHANG Guowei, DONG Yunpeng, et al. Characteristics and spatial-temporal distribution of ophiolite and related volcanic rocks in the Qinling-Dabie Mianlue tectonic belt[J]. *Science China Earth Sciences*, 2003, 33(12): 1174-1183.
- 罗金海, 周亚军, 徐欢, 等. 南秦岭旬阳盆地东部晚泥盆世岩浆成因钠长岩及其构造意义[J]. *地质学报*, 2017, 91(2): 302-314.
- LUO Jinhai, ZHOU Yajun, XU Huan, et al. Late Devonian Magmatic Albitites in the Eastern Xunyang Basin of the South Qinling Orogen and Their Tectonic Significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017, 91(2): 302-314.
- 马国良. 桐木沟热水沉积铅锌矿床同位素地球化学特征[J]. *长安大学学报 (地球科学版)*, 1993a(4): 103-107.
- MA Guoliang. Isotope geochemical characteristics of hydrothermal sedimentary lead-zinc deposit in Tongmugou[J]. *Journal of Chang'an University (Earth Science Edition)*, 1993a(4): 103-107.
- 马国良. 陕西桐木沟锌矿床中沉积喷气成矿作用的早期产物——钠长角砾岩[J]. *西北地质*, 1993b, 14(2): 12-17.
- MA Guoliang. The early product of sedimentary exhalation mineralization in the Tongmugou zinc deposit, Shaanxi Province-Na-feldspar breccia[J]. *Northwest Geology*, 1993b, 14(2): 12-17.
- 苏本勋, 秦克章, 蒋少涌, 等. 我国钴镍矿床的成矿规律、科学问题、勘查技术瓶颈与研究展望[J]. *岩石学报*, 2023, 39(4): 968-980.
- SU Benxun, QIN Kezhang, JIANG Shaoyong, et al. Mineralization regularity, scientific issues, prospecting technology and research prospect of Co-Ni deposits in China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2023, 39(4): 968-980.
- 石准立, 樊硕诚, 张文宣, 等. 陕西双王金矿床地质特征及其成因 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1989, 1-129.
- SHI Zhunli, FAN Shuocheng, ZHANG Wenxuan, et al. Geological characteristics and genesis of the Shuangwang gold deposit in Shaanxi[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1989, 1-129.
- 田智博, 苟龙龙, 徐晓飞, 等. 秦岭造山带涝峪地区宽坪岩群变质作用温压条件及原位 Rb-Sr 年代学研究[J]. *西北地质*, 2025, 58(1): 1-26.
- TIAN Zhibo, GOU Longlong, XU Xiaofei, et al. Metamorphic P-T Conditions and In-situ Rb-Sr Geochronology of the Kuanping Group in the Laoyu Area of the Qinling Orogenic Belt[J]. *Northwestern Geology*, 2025, 58(1): 1-26.
- 吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. *科学通报*, 2004, 49(16): 1589-1604.
- WU Yuanbao, ZHENG Yongfei. Zircon genetic mineralogy and its constraints on U-Pb age interpretation[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(16): 1589-1604.
- 汪超, 谷玉明, 胡西顺, 等. 陕西三官庙—韭菜沟地区钠长岩与金矿床地质特征及找矿方向[J]. *黄金科学技术*, 2017, 25(1): 35-45.
- WANG Chao, GU Yuming, HU Xishun, et al. Geological characteristics and prospecting direction of albite and gold deposits in Sanguanmiao-Jiucaigou area, Shaanxi[J]. *Gold Science and Technology*, 2017, 25(1): 35-45.
- 魏小昭, 任涛, 王建平, 等. 南秦岭二台子含金角砾岩地质特征及成因探讨[J]. *矿产勘查*, 2017, 8(4): 568-573.
- WEI Xiaozhao, REN Tao, WANG Jianping, et al. Geological characteristics and genesis of gold-bearing breccia in Ertaizi, South Qinling[J]. *Mineral Exploration*, 2017, 8(4): 568-573.
- 汪昭祥. 对陕西凤县-商南泥盆系中钠化特征的初步认识[J]. *陕西地质*, 1987, 5(2): 68-74.
- WANG Zhaoxiang. A Discussion on origin of sodium-rich rock in Devonian system, middle division of Qinling mts[J]. *Geology of Shaanxi*, 1987, 5(2): 68-74.
- 王安琪. 秦岭造山带晚古生代-中生代构造演化: 碎屑锆石 U-Pb 年龄与 Hf-O 同位素制约 [D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- WANG Anqi. Late Paleozoic-Mesozoic tectonic evolution of the Qinling orogenic belt: Constraints of detrital zircon U-Pb ages and Hf-O isotopes [D]. Changchun: Jilin University, 2020.

- 于晓飞, 公凡影, 李永胜, 等. 中国典型钴矿床地质特征及重点地区矿产资源预测[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(5): 1377-1418.
- YU Xiaofei, GONG Fanying, LI Yongsheng, et al. Geological characteristics of typical cobalt deposits in China and prediction of mineral resources in key areas[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(5): 1377-1418.
- 王亚磊, 李文渊, 林艳海, 等. 金川超大型铜镍矿床钴的赋存状态与富集过程研究[J]. 西北地质, 2023, 56(2): 133-150.
- WANG Yalei, LI Wenyuan, LIN Yanhai, et al. Study on the Occurrence State and Enrichment Process of Cobalt in Jinchuan Giant Magmatic Ni-Cu Sulfide Deposit[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(2): 133-150.
- 叶霖, 刘铁庚. 陕南勉略宁地区铜厂矿区的钠长岩[J]. 矿物岩石, 1997, 17(4): 10-15.
- YE Lin, LIU Tiegeng. Albite from Tongchang mining area, Mian-Lue-Ning area, southern Shaanxi[J]. Mineral Rock, 1997, 17(4): 10-15.
- 赵强, 张文峰, 王小朗, 等. 秦岭造山带(陕西段)发现新类型钴镍矿——钠长角砾岩型钴镍矿[J]. 陕西地质, 2021, 39(2): 1-3.
- ZHAO Qiang, ZHANG Wenfeng, WANG Xiaolang, et al. A new type of cobalt-nickel ore-sodium breccia type cobalt-nickel ore was found in the Qinling orogenic belt (Shaanxi section)[J]. *Geology of Shaanxi*, 2021, 39(2): 1-3.
- 张国伟, 张宗清, 董云鹏. 秦岭造山带主要构造岩石地层单元的构造性质及其大地构造意义[J]. 岩石学报, 1995, 11(2): 101-114.
- ZHANG Guowei, ZHANG Zongqing, DONG Yunpeng. The tectonic properties and tectonic significance of the main tectonic lithostratigraphic units in the Qinling orogenic belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1995, 11(2): 101-114.
- 张国伟, 孟庆任, 于在平, 等. 秦岭造山带的造山过程及其动力学特征[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 1996, 26(3): 193-200.
- ZHANG Guowei, MENG Qingren, YU Zaiping, et al. The orogenic process and dynamic characteristics of the Qinling orogenic belt[J]. Science China Earth Sciences, 1996, 26(3): 193-200.
- 张国伟, 郭安林, 董云鹏, 等. 关于秦岭造山带[J]. 地质力学学报, 2019, 25(5): 746-768.
- ZHANG Guowei, GUO Anlin, DONG Yunpeng, et al. About Qinling orogenic belt[J]. *Journal of Geomechanics*, 2019, 25(5): 746-768.
- 张复新. 陕西双王金矿床成矿作用及金的赋存状态研究[J]. 西北地质, 1997, 17(2): 28-32.
- ZHANG Fuxin. Study on the mineralization of Shuangwang gold deposit and the occurrence state of gold in Shaanxi[J]. Northwest Geology, 1997, 17(2): 28-32.
- Cawood P A, Nemchin A A. Provenance record of a rift basin: U/Pb ages of detrital zircons from the Perth Basin, Western Australia[J]. *Sedimentary Geology*, 2000, 134(3-4): 209-234.
- 张照伟, 谭文娟, 全孝勤, 等. 西北地区钴矿资源禀赋特征及产业链分析[J]. 西北地质, 2024, 57(5): 11-26.
- ZHANG Zhaowei, TAN Wenjuan, QUAN Xiaoqin, et al. Study on Cobalt Resource Endowment and Its Industry Chain in Northwestern China[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(5): 11-26.
- 赵达成, 王美乐, 李章志贤, 等. 夏日哈木岩浆硫化物矿床中钴和镍关键金属的赋存状态及分布规律[J]. 西北地质, 2023, 56(6): 17-40.
- ZHAO Dacheng, WANG Meile, LIZHANG Zhixian, et al. The Occurrence and Distribution of Cobalt and Nickel Key Metals in the Xiarihamu Magmatic Sulfide Deposit[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(6): 17-40.
- 钟世华, 黄宇, 刘永乐, 等. 东昆仑志留纪—泥盆纪关键金属成矿大爆发[J]. 地质通报, 2025, 44(4): 574-586.
- ZHONG Shihua, HUANG Yu, LIU Yongle, et al. Silurian-Devonian critical metal mineralization boom of the East Kunlun Orogenic Belt[J]. Geological Bulletin of China, 2025, 44(4): 574-586.
- Dong Y P, Zhang X M, Liu X M. Propagation tectonics and multiple accretionary processes of the Qinling Orogen[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 104: 84-98.
- Dong Y, Santosh M. Tectonic architecture and multiple orogeny of the Qinling Orogenic Belt, Central China[J]. *Gondwana Research*, 2016, 29(1): 1-40.
- Fedo C M, Sircombe K N, Rainbird R H. Detrital zircon analysis of the sedimentary record[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2003, 53(1): 277-303.
- Gehrels G. Detrital zircon U-Pb geochronology: Current methods and new opportunities[J]. Tectonics of Sedimentary Basins: Recent Advances, 2011: 45-62.
- Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, et al. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55: 1535-1546.
- Ludwig K R. Eliminating mass-fractionation effects on U-Pb isochron ages without double spiking[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, 65(18): 3139-3145.
- Rubatto D, Gebauer D. Use of cathodoluminescence for U-Pb zircon dating by IOM Microprobe: Some examples from the western Alps[J]. Cathodoluminescence in Geoscience, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 2000, 373-400.
- Sircombe K N. Tracing provenance through the isotope ages of littoral and sedimentary detrital zircon, eastern Australia[J]. *Sedimentary Geology*, 1999, 124(1-4): 47-67.
- Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1989, 42(1): 313-345.
- Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: its composition and evolution[J]. Black well Scientific Publications, Oxford, 1985: 1-328.