

文章编号:1672-6561(2012)01-0001-08

## 中条山涑水杂岩的同位素年代学研究及其地质意义

赵 斌<sup>1,2</sup>, 王登红<sup>3</sup>, 侯可军<sup>3</sup>, 刘仁亮<sup>2</sup>

(1. 长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2. 山西省地球物理化学勘查院,  
山西 运城 044004; 3. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037)

**摘 要:**中条山是中国重要的铜多金属成矿带, 拥有著名的晚太古代“变斑岩型”铜矿峪大型铜矿床和元古代“层控型”胡家峪—篦子沟铜矿床, 近年来又在中条山西南段的涑水杂岩中发现以变基性火山岩(斜长角闪岩)为容矿岩石的桃花洞铜矿。为了弄清楚该铜矿的形成时代及其成矿地质背景, 利用电感耦合等离子质谱(LA-MC-ICP-MS)方法对桃花洞铜矿容矿围岩—涑水杂岩中的寨子—西姚灰色片麻岩、斜长角闪岩及二长花岗岩进行了同位素年代学研究。结果表明:寨子—西姚灰色片麻岩、斜长角闪岩脉和二长花岗岩中锆石的岩浆结晶年龄分别为 $(2\ 625 \pm 11)$ 、 $(2\ 592 \pm 16)$ 、 $(2\ 548 \pm 15)$  Ma; 岩石中古老继承性锆石的年龄分别为 $(2\ 790 \pm 15)$ 、 $(2\ 773 \pm 24)$ 、 $(2\ 782 \pm 34)$  Ma; 三种不同成生顺序的岩石中均有大于 2 700 Ma 的锆石存在, 且年龄相当接近; 中条山地区涑水杂岩可能最初形成于太古代。涑水杂岩作为与成矿关系密切的容矿围岩, 其成岩时代可以间接指示成矿时代, 由此得出赋存在变基性火山岩层中的古火山含矿原岩建造型铜矿有可能是中国最古老的铜矿之一。

**关键词:**同位素年代学; 电感耦合等离子质谱; 锆石; 铜矿; 太古代; 容矿岩石; 涑水杂岩; 中条山  
**中图分类号:**P588.34; P597.3 **文献标志码:**A

### Isochronology study on Sushui Complex in Zhongtiao Mountains and its geological significance

ZHAO Bin<sup>1,2</sup>, WANG Deng-hong<sup>3</sup>, HOU Ke-jun<sup>3</sup>, LIU Ren-liang<sup>2</sup>

(1. School of Earth Sciences and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;  
2. Shanxi Geophysics and Geochemical Prospecting Institute, Yuncheng 044004, Shanxi, China;  
3. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

**Abstract:** Zhongtiao Mountains are the important copper-polymetallic ore belts in China, producing famous large scale Tongkuangyu copper deposit with metamorphic porphyry type formed in upper Archeozoic and Hujiayu-Bizigou copper deposit with stratabound type formed in Proterozoic. Recently, Taohuadong copper deposit of ore-bearing rock hosted in meta-basic volcanic rock(amphibolite) was discovered in Sushui Complex which located in the southwestern segment of Zhongtiao Mountains. In order to determine the ore-forming epoch and geological background for Taohuadong copper deposit, Zhaizi-Xiyao grey gneiss, amphibolite and monzogranite in Sushui Complex, which were ore-bearing wall rocks in Taohuadong copper deposit, were used for isotope dating by the method of LA-MC-ICP-MS. The results showed that the magmatic crystallization ages of zircons were  $(2\ 625 \pm 11)$ ,  $(2\ 592 \pm 16)$ ,  $(2\ 548 \pm 15)$  Ma, respectively; the ages of older inherited zircons were  $(2\ 790 \pm 15)$ ,  $(2\ 773 \pm 24)$ ,  $(2\ 782 \pm 34)$  Ma, respectively; all the three rocks crystallized in different times had the inherited zircons with

收稿日期:2011-04-15

基金项目:中国地质调查局项目(1212010633903, 1212010634002)

作者简介:赵 斌(1965-), 男, 山西沁水人, 高级工程师, 工学博士研究生, 从事地球物理勘查及矿产勘查研究, E-mail: sxwhyzb@gmail.com。

similar ages, which were more than 2 700 Ma; Sushui Complex in Zhongtiao Mountains might be initially formed in Archeozoic. The diagenesis age of Sushui Complex, which was the ore-bearing rock related with metallogenic association, could indirectly indicate the mineralogenetic epoch, so that the ore-bearing palaeovolcano copper deposit with construction type hosted in meta-basic volcanic rock could be one of the oldest copper deposits in China.

**Key words:** isochronology; LA-MC-ICP-MS; zircon; copper deposit; Archeozoic; ore-bearing rock; Sushui Complex; Zhongtiao Mountains

## 0 引言

中条山是中国重要的铜多金属成矿带,拥有著名的晚太古代“变斑岩型”铜矿峪大型铜矿床和元古代“层控型”胡家峪—篦子沟铜矿床。而在涑水期形成的岩石建造——涑水杂岩,是中条山地区的重要含矿建造,主要分布在中条山的北西侧,在涑水河北吕梁山南端、曲沃以南和闻喜以西亦有零星出露。王植等将这套杂岩划归太古代(公鸡栓花岗岩)下片岩系<sup>[1]</sup>,1959 年中国地层会议将其定为涑水杂岩,之后有不同学者又提出新的划分。这套岩石建造准确归属很难确定的原因之一就是缺少充分的地层年代学数据。虽然不少学者也开展过同位素定年研究,将涑水杂岩划归新太古代到古元古代<sup>[2]</sup>,但仍没有统一说法<sup>[3]</sup>。

中条山西南段运城桃花洞一带的涑水杂岩中发现的以变基性火山岩(斜长角闪岩)为容矿岩石的桃花洞铜矿,是山西省地球物理化学勘查院 2002 年在运城解州一带开展地质找矿时发现的,研究程度较低<sup>[4-5]</sup>。通过野外地质调研和室内研究,初步认为桃花洞铜矿与涑水杂岩中的变质基性岩具有明显的成因联系,变质基性岩的成岩时代可以指示铜矿的成矿时代。基于此,笔者在涑水杂岩中采集了 BT2、BT3、BT4 等 3 个样品,利用电感耦合等离子质谱(LA-MC-ICP-MS)方法,开展单颗粒锆石 U-Pb 法测年,目的是通过研究涑水杂岩中变质基性岩的成岩时代,为探讨涑水杂岩的成因和地壳演化历史提供依据,进而为中条山铜矿的成矿时代研究提供新线索。

## 1 地质背景

中条山位于华北大陆亚板块南部鄂尔多斯地块与河淮地块接合带的南端,由前寒武纪变质岩穹状隆起构成复合变质杂岩地体<sup>[6]</sup>。其西部中央变质核主要是经强烈改造的太古代—古元古代基底岩石——涑水杂岩,东部被中—晚元古代及古生代弱变形或未变形岩石覆盖,中间是由绛县群和中条群

组成的变形变质带(图 1)。研究区位于中条山西部至吕梁山南端,区内涑水杂岩广泛出露,以变质深成岩为主,其中残留有大小不等的变质表壳岩包体,并见少量的变质基性岩脉,主要分布在中条山的西北侧,在涑水河北吕梁山南端、曲沃以南和闻喜以西亦有零星出露。大面积覆盖的第四系之下也是涑水杂岩。

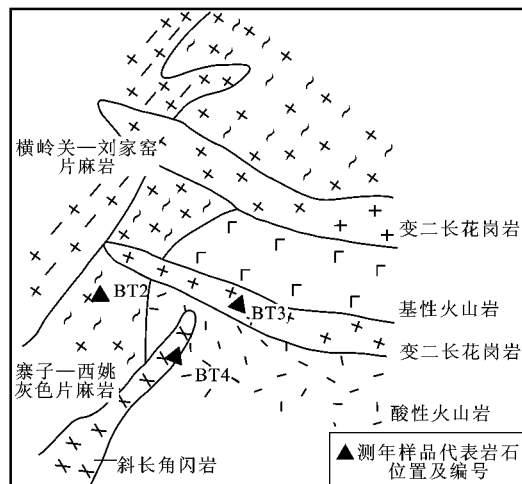


图 1 桃花洞测年岩石的接触关系

Fig. 1 Contact relations of dating rocks in Taohuadong

本研究的样品主要采自解州一带,涑水杂岩可划分为冷口变质表壳岩、寨子—西姚灰色片麻岩、横岭关—刘家窑片麻岩、变质基性岩脉、柴家窑变质表壳岩、烟庄偏碱性花岗岩—解州片麻岩、解州变质表壳岩等。

冷口变质表壳岩的主要岩石包括斜长角闪岩、黑云变粒岩、长石石英岩、磁铁石英岩、角闪岩和变质超基性岩,往往呈大小不等的包体产出。解州变质表壳岩包括斜长角闪岩、浅粒岩、长石石英岩、石英岩和具有深熔特征的二长片麻岩和黑云二长片麻岩。在变基性火山岩底部和顶部,有两条花岗岩化带。寨子—西姚灰色片麻岩(花岗岩)的主体为黑云斜长片麻岩,具英云闪长岩—奥长花岗岩的岩石化学特征。山西省地质勘查局 213 地质队称中条山西段的片麻岩为西姚片麻岩,并曾获得( $2\ 457 \pm 14$ )

Ma 的单颗粒锆石 U-Pb 年龄<sup>[7]</sup>;孙大中等则将东段的片麻岩称为寨子—英云闪长片麻岩,并获得 $(2\,321\pm2)\text{Ma}$ 的锆石 U-Pb 一致线年龄<sup>[8]</sup>;对于后者,郭丽爽等也曾获得 $(2\,536\pm8)\text{Ma}$ 和 $(2\,559.6\pm5.9)\text{Ma}$ 的单颗粒锆石 U-Pb 年龄<sup>[9]</sup>。横岭关—刘家窑片麻岩的原岩为黑云二长花岗岩,其中可见寨子—西姚灰色片麻岩的包体;其单颗粒锆石 U-Pb 年龄为 $(2\,435.9\pm12.0)\text{Ma}$ <sup>[9]</sup>。变质基性岩脉现已变质成斜长角闪岩,在中条山西段可以见到穿过寨子—西姚灰色片麻岩的现象。柴家窑变质表壳岩分布于中条山西段,主要岩石为蛇纹石化大理岩、白云石大理岩、石英大理岩和钙质片岩,呈包体状分布于烟庄—解州片麻岩中。烟庄偏碱性花岗岩—解州片麻岩,可呈岩枝状侵入寨子—西姚灰色片麻岩。在解州一带伴随有强烈的花岗岩化。山西省地质勘查局 213 地质队曾经在中条山西段获得 $(2\,453\pm74)\text{Ma}$ 、 $(2\,507\pm26)\text{Ma}$ 和 $(2\,618\pm26)\text{Ma}$ 的单颗粒锆石 U-Pb 年龄<sup>[7]</sup>。孙大中等在中条山东段烟庄附近,也以相同方法获得了  $2\,500\text{ Ma}$  和  $2\,640\text{ Ma}$  的年龄数据<sup>[8]</sup>。

## 2 样品特征与测试方法

笔者共采集到 BT2、BT3、BT4 测年样品 3 件(图 1),其岩性分别为寨子—西姚灰色片麻岩(BT2)、二长花岗岩(BT3)和斜长角闪岩(BT4)。从 3 种岩石中分别挑选锆石,原岩样品质量约  $22.6\text{ kg}$ ,从中选出 1 053 颗锆石,共测定了 46 个有效数据点,其阴极发光(CL)图像见图 2。由图 2 可见,锆石的晶体形态多为半自形—自形短柱状、柱状,形态规整,部分锆石呈长条状、它形粒状。粒径为  $60\sim150\text{ }\mu\text{m}$ ,长度为  $100\sim250\text{ }\mu\text{m}$ ,长宽比变化较大。其 CL 图像显示绝大部分锆石具有明显的环带结构,只有个别颗粒环带结构不明显。

锆石样品的 LA-MC-ICP-MS 方法 U-Pb 定年工作是在中国地质科学院矿产资源研究所 MC-ICP-MS 实验室完成的,所用仪器为 Finnigan Neptune 型 MC-ICP-MS 及与之配套的 New wave UP 213 激光剥蚀系统。激光剥蚀所用斑束直径为  $25\text{ }\mu\text{m}$ ,频率为  $10\text{ Hz}$ ,能量密度约为  $2.5\text{ J/cm}^2$ ,以 He 为载气。信号较小的<sup>207</sup>Pb、<sup>206</sup>Pb、<sup>204</sup>Pb(+<sup>204</sup>Hg)和<sup>202</sup>Hg 用离子计数器(multi-ion-counters)接收,<sup>208</sup>Pb、<sup>232</sup>Th 和<sup>238</sup>U 用法拉第杯接收。均匀锆石颗粒  $N(^{207}\text{Pb})/N(^{206}\text{Pb})$ ,  $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ ,  $n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$  的测试精度( $2\sigma$ )均为 2% 左右。详细测试过程参见文献<sup>[10-12]</sup>。

## 3 测试结果

根据锆石形态、内部结构和测年结果(表 1、图 3),可将 BT2、BT3、BT4 样品中组成不一致年龄线的锆石划分为 3 类。

第 I 类锆石:该类锆石包括样品 BT2 的 1、9、10、13 号,样品 BT3 的 4、6、8、15 号以及样品 BT4 的 4、11~16 号,共计 15 个锆石颗粒。该群锆石颗粒多呈短柱状—柱状、半自形—自形,但外观均显浑圆状。环带结构发育,可见较明显的核边结构,环带宽窄不一,内部模糊,但核外界线清楚。长宽比  $1.3:1\sim2.5:1$ ;样品 BT2 除 1 号锆石颗粒石晶形完整外,9、10、13 号锆石颗粒均呈浑圆状;样品 BT3 除 4 号呈带裂隙的长柱状外,其余 6、8、15 号锆石颗粒都呈碎块状,外形浑圆。样品 BT4 的 11、14 号锆石颗粒呈长柱状,有裂隙,其余 4、12、13、15、16 号锆石颗粒均呈浑圆状。总之,第 I 类锆石的最大特征是外形多呈浑圆状,可能经过一定程度磨损,具继承性特征;另一个特点是核部色深,有溶蚀现象,环带结构比较模糊,浅色带宽,深色带窄,环带形状不规则。其放射铅含量(质量分数)平均为  $226.115\times10^{-6}$ ,  $w(\text{Th})/w(\text{U})$  平均为

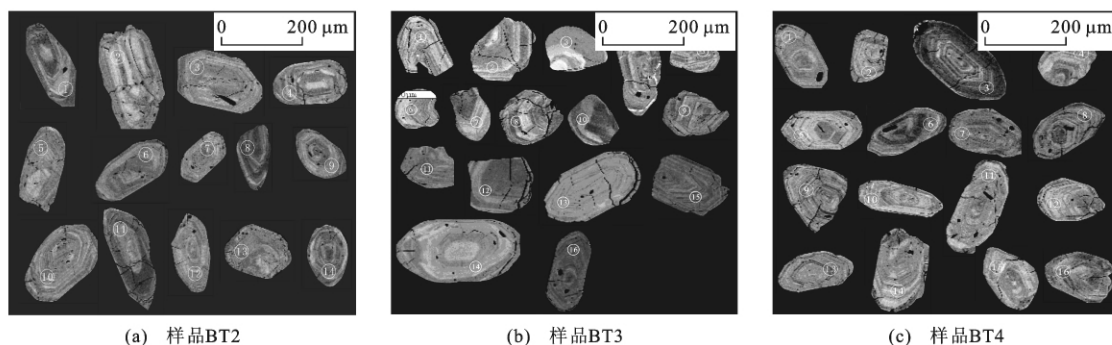


图 2 样品 BT2、BT3、BT4 的锆石阴极发光图像

Fig. 2 CL images of zircons from samples BT2, BT3 and BT4

表 1 寨子-西姚灰色片麻岩、二长花岗岩和斜长角闪岩中锆石 U-Pb 定年分析

Tab. 1 Zircon U-Pb dating results of Zhaizi-Xiyao grey gneiss, monzogranite and amphibolite

测点编号	$w(\text{Pb})/10^{-6}$	$w(^{232}\text{Th})/10^{-6}$	$w(^{238}\text{U})/10^{-6}$	$w(\text{Th})/w(\text{U})$	$N(^{207}\text{Pb})/N(^{206}\text{Pb})$	$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$	$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$	$N(^{207}\text{Pb})/N(^{206}\text{Pb})$ 年龄/Ma	$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$ 年龄/Ma	$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 年龄/Ma
BT2-1	194	162	287	0.56	0.196 0±0.000 7	11.978 3±0.056 6	0.444 2±0.002 9	2 794.4±5.9	2 602.7±4.4	2 369.3±12.9
BT2-2	160	157	241	0.65	0.177 2±0.000 6	10.348 5±0.111 7	0.423 8±0.005 0	2 626.9±5.9	2 466.5±10.0	2 277.5±22.6
BT2-3	179	213	261	0.82	0.177 0±0.000 4	9.979 7±0.093 0	0.408 9±0.003 8	2 625.0±3.4	2 432.9±8.6	2 210.0±17.2
BT2-4	125	116	226	0.51	0.177 8±0.000 7	9.419 1±0.098 3	0.384 1±0.003 6	2 632.4±6.8	2 379.7±9.6	2 095.5±17.0
BT2-5	210	266	611	0.44	0.176 5±0.001 0	6.233 3±0.081 9	0.255 7±0.002 7	2 620.1±9.6	2 009.1±11.5	1 467.7±13.9
BT2-6	127	121	166	0.73	0.178 5±0.000 6	12.327 5±0.080 6	0.500 7±0.003 1	2 639.2±11.3	2 629.7±6.1	2 617.0±13.5
BT2-7	387	869	1 036	0.84	0.177 6±0.001 3	4.991 1±0.061 2	0.204 3±0.002 3	2 631.5±12.0	1 817.8±10.4	1 198.5±12.5
BT2-8	67	50	102	0.49	0.174 4±0.000 4	12.357 4±0.095 6	0.513 8±0.003 9	2 611.1±4.8	2 631.9±7.3	2 672.8±16.5
BT2-9	159	135	196	0.69	0.196 4±0.000 4	14.152 6±0.086 1	0.523 0±0.003 5	2 796.0±2.6	2 760.0±5.8	2 712.0±15.0
BT2-10	258	227	603	0.38	0.195 1±0.000 6	8.635 2±0.028 4	0.321 3±0.001 4	2 787.0±5.2	2 300.3±3.0	1 796.0±6.8
BT2-11	125	98	231	0.43	0.176 9±0.000 4	10.406 0±0.049 4	0.426 6±0.001 7	2 623.8±4.0	2 471.6±4.4	2 290.4±7.8
BT2-12	180	233	277	0.84	0.177 5±0.000 7	9.419 6±0.068 9	0.384 7±0.002 3	2 631.5±1.7	2 379.7±6.7	2 098.2±10.7
BT2-13	344	683	711	0.96	0.196 6±0.001 5	6.378 6±0.052 7	0.235 4±0.001 3	2 797.8±11.6	2 029.3±7.3	1 363.0±6.9
BT2-14	158	210	210	1.00	0.177 4±0.000 5	10.056 5±0.117 4	0.410 8±0.004 6	2 628.7±4.3	2 440.0±10.8	2 218.4±21.0
BT3-1	213	250	462	0.54	0.179 0±0.001 1	7.501 5±0.072 3	0.304 3±0.002 5	2 643.5±10.2	2 173.2±8.6	1 712.6±12.3
BT3-2	104	126	155	0.81	0.168 7±0.000 8	9.002 1±0.107 9	0.387 3±0.004 3	2 546.3±7.4	2 338.2±11.0	2 110.2±19.9
BT3-3	83	73	184	0.39	0.179 1±0.000 5	11.167 2±0.079 6	0.452 7±0.003 1	2 644.1±5.1	2 537.2±6.6	2 407.3±13.6
BT3-4	185	542	388	1.40	0.194 7±0.000 6	10.414 0±0.070 8	0.388 3±0.002 5	2 782.4±5.6	2 472.3±6.3	2 114.9±11.5
BT3-5	163	234	322	0.73	0.181 6±0.000 6	8.239 2±0.073 0	0.329 3±0.002 8	2 667.6±5.6	2 257.7±8.0	1 834.8±13.4
BT3-6	330	409	582	0.70	0.195 0±0.000 9	8.203 9±0.060 2	0.305 1±0.001 6	2 784.9±8.5	2 253.8±6.6	1 716.3±7.8
BT3-7	160	140	252	0.56	0.178 5±0.000 7	10.743 5±0.102 3	0.436 3±0.003 7	2 639.2±11.3	2 501.2±8.8	2 334.3±16.7
BT3-8	289	318	576	0.55	0.194 7±0.001 0	7.470 5±0.045 0	0.278 6±0.001 5	2 783.3±8.3	2 169.5±5.4	1 584.5±7.7
BT3-9	199	213	374	0.57	0.179 6±0.000 6	8.838 4±0.060 8	0.356 9±0.002 3	2 649.1±5.9	2 321.5±6.3	1 967.6±10.8
BT3-10	35	19	64	0.29	0.169 1±0.000 9	10.079 9±0.093 4	0.432 4±0.004 2	2 549.1±9.3	2 442.1±8.6	2 316.3±19.0
BT3-11	417	1 091	953	1.15	0.168 6±0.000 5	4.745 4±0.033 4	0.204 1±0.001 3	2 543.5±5.7	1 775.3±5.9	1 197.4±6.9
BT3-12	45	42	64	0.66	0.169 0±0.000 5	11.274 8±0.072 0	0.483 9±0.002 9	2 547.2±5.7	2 546.1±6.0	2 544.4±12.5
BT3-13	152	193	402	0.48	0.168 9±0.000 5	6.426 0±0.037 3	0.275 9±0.001 4	2 546.6±4.9	2 035.8±5.1	1 570.6±6.9
BT3-14	173	429	272	1.58	0.178 8±0.000 4	10.162 7±0.081 8	0.412 2±0.003 2	2 642.6±8.3	2 449.7±7.4	2 224.9±14.7
BT3-15	266	257	652	0.39	0.194 5±0.000 9	7.700 3±0.088 7	0.287 2±0.003 5	2 779.9±7.7	2 196.6±10.4	1 627.7±17.4
BT3-16	217	348	484	0.72	0.179 7±0.000 9	6.980 0±0.084 1	0.281 8±0.003 3	2 649.7±8.0	2 108.9±10.7	1 600.3±16.4
BT4-1	117	113	174	0.65	0.173 4±0.000 3	10.769 6±0.084 9	0.450 8±0.003 6	2 591.1±3.1	2 503.5±7.3	2 398.6±15.8
BT4-2	221	293	520	0.56	0.172 7±0.000 7	6.748 5±0.107 5	0.282 8±0.004 0	2 584.3±6.5	2 079.0±14.1	1 605.5±20.0
BT4-3	91	76	148	0.52	0.172 9±0.000 3	10.724 1±0.080 9	0.450 0±0.003 3	2 586.1±3.9	2 499.5±7.0	2 395.4±14.5
BT4-4	253	285	713	0.40	0.192 4±0.000 6	6.548 5±0.082 6	0.246 9±0.002 8	2 762.7±5.6	2 052.4±11.1	1 422.5±14.6
BT4-5	204	325	437	0.74	0.173 2±0.000 5	7.008 9±0.069 8	0.293 8±0.002 9	2 588.6±5.4	2 112.6±8.9	1 660.5±14.4
BT4-6	140	55	496	0.11	0.171 5±0.000 6	6.057 9±0.107 0	0.255 9±0.003 8	2 571.9±11.6	1 984.2±15.4	1 468.8±19.5
BT4-7	138	181	224	0.81	0.174 3±0.000 6	8.727 9±0.065 5	0.363 3±0.002 6	2 599.1±5.4	2 310.0±6.8	1 997.9±12.3
BT4-8	166	222	338	0.66	0.173 7±0.000 6	7.478 8±0.091 5	0.312 3±0.003 7	2 593.5±6.2	2 170.5±11.0	1 751.9±18.2
BT4-8	163	243	405	0.60	0.172 5±0.000 8	6.081 9±0.041 8	0.256 0±0.001 3	2 583.3±8.3	1 987.7±6.0	1 469.1±6.5
BT4-10	82	79	207	0.38	0.173 9±0.001 7	5.998 3±0.072 5	0.250 5±0.002 7	2 595.4±16.8	1 975.6±10.5	1 441.2±14.1
BT4-11	247	315	435	0.72	0.192 1±0.002 1	8.256 3±0.063 6	0.312 9±0.002 9	2 760.2±23.3	2 259.5±7.0	1 754.8±14.3
BT4-12	220	230	472	0.49	0.194 3±0.001 0	7.894 5±0.059 7	0.295 2±0.001 8	2 778.7±9.0	2 219.0±6.8	1 667.2±8.9
BT4-13	279	473	570	0.83	0.192 5±0.001 2	6.772 8±0.042 7	0.255 7±0.001 8	2 764.8±9.9	2 082.2±5.6	1 467.7±9.3
BT4-14	189	228	425	0.54	0.193 0±0.001 3	7.293 6±0.073 4	0.274 5±0.002 6	2 768.2±10.5	2 148.0±9.0	1 563.5±12.9
BT4-15	111	64	274	0.23	0.193 0±0.001 1	8.406 8±0.081 7	0.316 3±0.003 1	2 768.2±15.3	2 275.9±8.8	1 771.4±15.3
BT4-16	199	214	957	0.22	0.191 5±0.001 7	4.037 6±0.041 7	0.153 4±0.002 1	2 755.3±14.8	1 641.8±8.4	920.2±11.6

注: $w(\cdot)$ 为某元素或同位素质量分数; $N(\cdot)/N(\cdot)$ 为同一元素同位素比值; $N(\cdot)$ 为该元素的原子数; $n(\cdot)/n(\cdot)$ 为不同元素同位素比值; $n(\cdot)$ 为元素的物质的量。

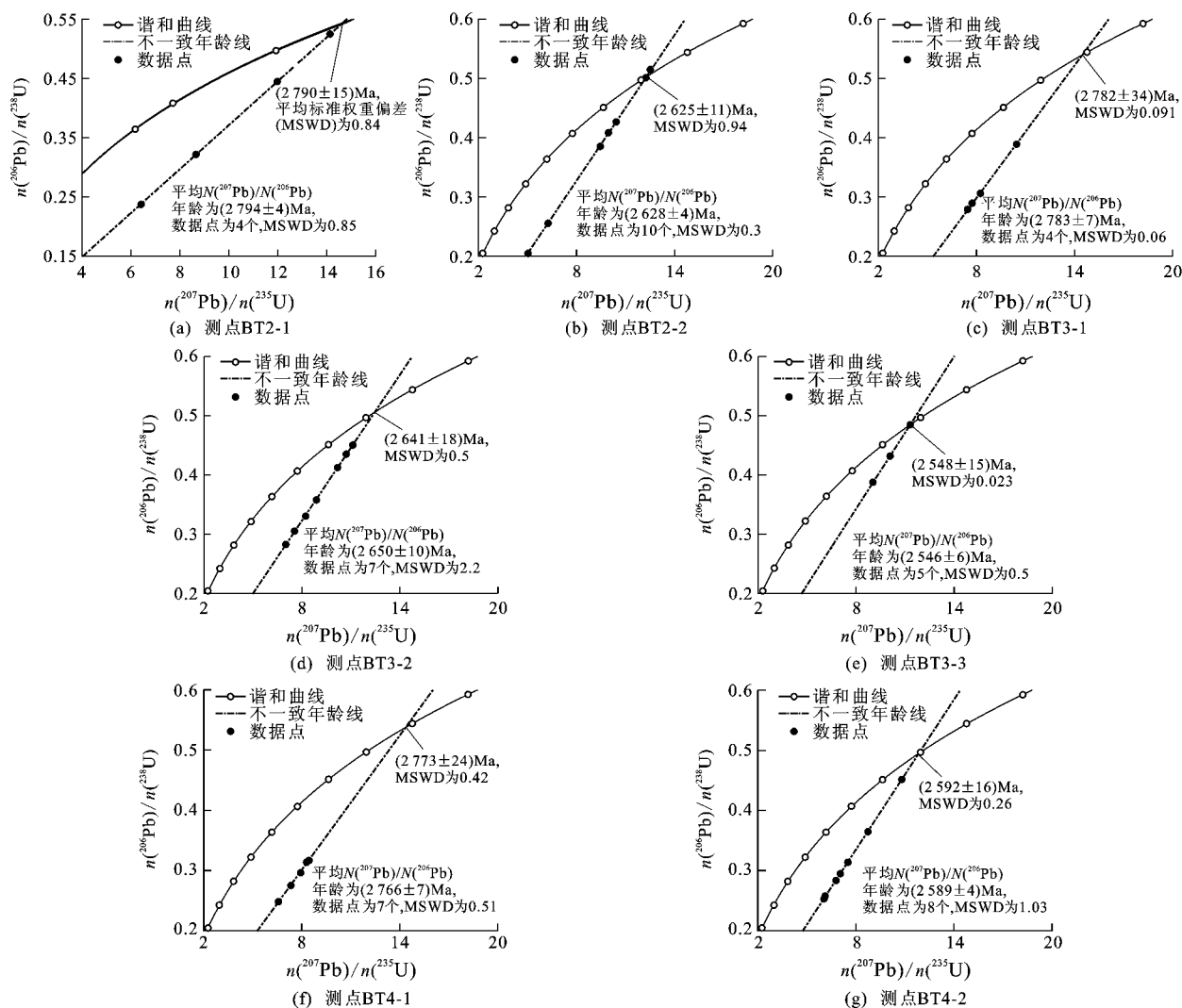


图 3 样品 BT2、BT3、BT4 中锆石 U-Pb 同位素谐和线图

Fig. 3 Concordance diagrams of zircon U-Pb isotopes of samples BT2, BT3 and BT4

Q 635 5。推断这类锆石可能受后期地质事件影响,为岩浆作用过程捕获的岩浆成因锆石。

**第Ⅱ类锆石:**该类锆石包括样品 BT2 的 2~8、11、12、14 号,样品 BT3 的 1、3、5、7、9、14、16 号,共计 17 颗锆石颗粒。样品 BT2 中,除 8、12、14 号锆石颗粒显示不完整晶形呈浑圆状、短柱状外,其余 7 颗晶形完好,粒径为  $75 \sim 120 \mu\text{m}$ ,长宽比为  $1.6 \sim 2.3$ 。阴极发光图像显示其震荡环带清晰,平直对称,具有岩浆成因特征。样品 BT3 中,除 14、16 号锆石颗粒呈规则长柱外,其余 5 颗锆石颗粒均呈它形粒状,可能受到后期构造运动破坏所致。其放射铅含量平均为  $184.1534 \times 10^{-6}$ ,  $w(\text{Th})/w(\text{U})$  平均为  $0.6988$ 。

**第Ⅲ类锆石:**该类锆石包括样品 BT3 的 2、10~13 号和样品 BT4 的 1、2、3、5~10 号,共计 14 颗锆石颗粒。样品 BT3 中,除 13 号呈单柱状体外,其余

4 颗均呈碎屑不规则粒状,有些色调深暗,特别是核部。其粒径  $84 \sim 134 \mu\text{m}$ ,长宽比为  $1.14 \sim 1.27$ ,个别达  $1.8$ 。该群锆石以碎块状为特征,中心部分颜色深暗,可能受过构造运动影响。有次生加大现象,中心黑暗,边部带宽厚。样品 BT4 的这群锆石颗粒除 9 号晶体不完整外,其余 8 颗晶形均较完好,震荡环带清晰,显示岩浆成因特征。锆石单颗粒径  $60 \sim 100 \mu\text{m}$ ,长宽比  $1.75 \sim 2.50$ 。其放射铅含量平均为  $148.6308 \times 10^{-6}$ ,  $w(\text{Th})/w(\text{U})$  平均为  $0.6188$ 。

综上所述,测年所用的锆石均具有如下特征:

①大多具有明显的震荡环带,测点位置均在环带之内,  $w(\text{Th})/w(\text{U})$  较高,显示火成成因特征;②锆石阴极发光较弱,显示 U、Th 含量较高,色调较黑,表明普通铅含量较高;③环带形状不规则,可能遭受后期地质事件的影响,样品 BT3 中锆石颗粒多呈碎块状,有裂隙,可能受构造运动的影响;④由老到新放

射铅含量明显减少,  $N(^{207}\text{Pb})/N(^{206}\text{Pb})$  也明显减少(图 4), 表明在区域构造运动和变质过程中, 发生了一定程度的 Pb 丢失(或 U 加入)。

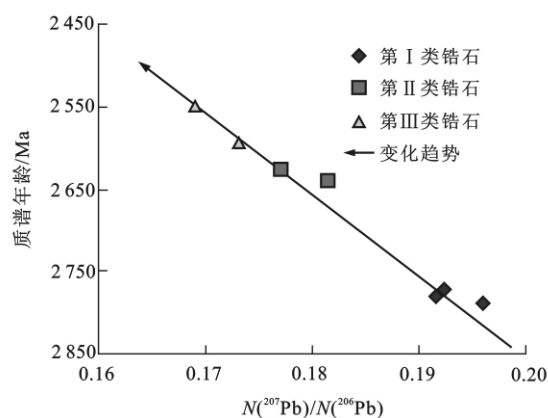


图 4 不同类型锆石中  $N(^{207}\text{Pb})/N(^{206}\text{Pb})$  随年龄的变化趋势

Fig. 4 Age profile of  $N(^{207}\text{Pb})/N(^{206}\text{Pb})$  in different types of zircons

## 4 同位素年龄的地质意义

测定结果显示, 3 个样品(BT2、BT3、BT4)中都有继承性锆石, 继承性锆石的年龄均大于 2 700 Ma。野外地质调查发现, 上述样品代表的 3 种岩石均以侵入接触形式切穿于变基性火山岩层中, 表明本区可能存在涑水期生成的古老地体, 或者说解州变质表

壳岩可作为涑水杂岩中最古老的表壳岩, 形成于中太古代。

斜长角闪岩(恢复原岩为辉长辉绿岩)在区内分布较广, 虽然规模不大(一般长几十至几百米, 少数长上千米, 宽几米至几十米), 但明显呈脉状形式侵入于解州变质表壳岩和寨子—西姚灰色片麻岩中。本次测定的寨子—西姚灰色片麻岩中的黑云斜长片麻岩锆石结晶年龄为  $(2\,625 \pm 11)\text{Ma}$ , 斜长角闪岩脉中锆石结晶年龄为  $(2\,592 \pm 16)\text{Ma}$ , 正好与野外地质现象吻合(斜长角闪岩侵入片麻岩), 表明锆石年龄数据是合理的。对于二长花岗岩(与铜矿化有密切关系), 本次测得的结果为  $(2\,548 \pm 15)\text{Ma}$ , 与薛克勤用 SHRIMP 方法测得的菜子疙瘩钾长花岗岩锆石结晶年龄  $(2\,551 \pm 9)\text{Ma}$  基本一致。

结合前人资料, 将具有核边结构、显示浑圆形态的锆石和晶形完整、没有核边结构、具有清晰震荡环带的锆石分别归属于继承性锆石和岩浆锆石, 所获得年龄也相应归属于继承性锆石年龄和岩浆结晶年龄(表 2)。寨子—西姚灰色片麻岩、斜长角闪岩和二长花岗岩中古老继承性锆石年龄分别为  $(2\,790 \pm 15)$ 、 $(2\,773 \pm 24)$ 、 $(2\,782 \pm 34)\text{Ma}$ 。由此可见, 从解州变质表壳岩( $>2.7\text{Ga}$ )→寨子—西姚灰色片麻岩( $2.6\text{Ga}$ )→解州变二长花岗岩烟庄偏碱性花岗岩

表 2 中条山岩石中单颗锆石 U-Pb 年龄及离子探针质谱年龄

Tab. 2 Single zircon U-Pb ages and ion microprobe mass spectrometry ages of rocks in Zhongtiao Mountains

地层	岩石	单颗锆石 U-Pb 年龄/Ma	单颗锆石离子探针质谱年龄/Ma	资料来源
铜矿峪亚群	变流纹质凝灰岩	$2\,166 \pm 26, 2\,455, 2\,145, 2\,335 \sim 2\,500$	$2\,115 \pm 6, 2\,530 \pm 3, 2\,770 \pm 16$	文献[1]
	变熔结凝灰岩	$2\,571 \pm 77$		文献[1]
	变酸性火山岩	$2\,500, 2\,455, 2\,316 \pm 5, 2\,166 \pm 1, 2\,231 \pm 4, 2\,469 \pm 5, 2\,744 \pm 7, 2\,769 \pm 6$		文献[3]
涑水杂岩	寨子—英云闪长岩	$2\,321 \pm 2$		文献[1]
	冷口变英安质凝灰岩	$2\,360 \pm 62, 2\,436, 2\,508$	$2\,330 \pm 5$	文献[1]
	冷口变中性火山凝灰岩	$2\,349 \pm 20, 2\,460, 2\,590$		文献[1]
	英云闪长岩	$2\,321 \pm 2, 2\,360 \pm 62$	$2\,333 \pm 5$	文献[1]
	冷口火山岩	$2\,349 \pm 20$		文献[1]
	烟庄花岗岩	$2\,640, 2\,500$		文献[3]
	西姚石英闪长质片麻岩	$2\,536 \pm 8^*$		文献[8]
	寨子—英云闪长质片麻岩	$2\,559.6 \pm 5.9^*$		文献[8]
	横岭关二长花岗岩	$2\,435.9 \pm 12.0^*$		文献[8]
	北峪奥长花岗岩	$2\,633 \pm 84^*, 2\,477.1 \pm 8.0^*$		文献[8]
	解州菜子疙瘩钾长花岗岩	$2\,551 \pm 9^{**}$		内部资料
	武家沟(三岔沟)二长花岗岩	$2\,480 \pm 11^{**}$		内部资料
	解州表壳岩内的寨子—西姚片麻岩		$2\,790 \pm 15, 2\,625 \pm 11$	本文
	解州表壳岩内的斜长角闪岩		$2\,773 \pm 24, 2\,592 \pm 16$	本文
	解州表壳岩内的二长花岗岩		$2\,782 \pm 34, 2\,548 \pm 15$	本文

注: \* 为  $N(^{207}\text{Pb})/N(^{206}\text{Pb})$  加权平均年龄; \*\* 系笔者 2007 年采样。

(2.5 Ga)及斜长角闪岩(2.5 Ga)→横岭关—刘家窑片麻岩(2.4 Ga)→冷口变质表壳岩(2.3 Ga),越来越年轻。也就是说,涑水杂岩实质上是由中太古代—古元古代形成的以及由变质表壳岩和深成侵入岩组成的不同类型的杂岩体,其中主要岩类的形成时间与山西地块太古宙—古元古宙构造运动序列存在较好的对应关系。

中条山地区是中国铜矿的重要产地<sup>[13]</sup>,但对于中国最古老的铜矿究竟是辽宁的红透山还是山西的中条山,一直没有定论<sup>[14-15]</sup>。本次测定的涑水杂岩是桃花洞铜矿的直接容矿围岩,其矿体产出特征显示,矿石具有明显的顺层条带状构造和受变质特征。铜矿层中黄铜矿总是与暗色矿物(角闪石)相伴生,暗色矿物与黄铜矿组成条带细脉与区域片麻理产状相一致,含矿变基性岩中片理构造与区域片麻理及褶皱构造产状变化一致。野外观察证据表明,铜矿物质来源与基性岩浆是同源,而且主成矿期在区域片麻理和区域褶皱形成之前,即与含矿层(岩石)形成于同一地质时期,成矿后的变质作用虽有改造,但未能改变矿床(层)的基本特征,桃花洞铜矿床成因上属于“古火山及火山沉积型的含矿原岩建造”铜矿。笔者认为虽然还没有直接确定桃花洞铜矿的成矿年龄,但涑水杂岩作为其容矿围岩,形成时代可以间接指示成矿年龄。由表 2 可见,赋存在变基性火山岩层中的古火山含矿原岩建造型铜矿有可能是中国最古老的铜矿之一。

## 5 结 语

(1)涑水杂岩是由中太古代—古元古代形成的由变质表壳岩和深成侵入岩组成的不同类型杂岩体。对桃花洞铜矿容矿围岩—涑水杂岩系中的寨子—西姚灰色片麻岩和斜长角闪岩及二长花岗岩进行了同位素年代学研究,获得寨子—西姚灰色片麻岩、斜长角闪岩和二长花岗岩中锆石的岩浆结晶年龄分别为 $(2\ 625\pm 11)$ 、 $(2\ 592\pm 16)$ 、 $(2\ 548\pm 15)$  Ma,同时也获得了岩石中古老继承性锆石的年龄分别为 $(2\ 790\pm 15)$ 、 $(2\ 773\pm 24)$ 、 $(2\ 782\pm 34)$  Ma。这证明涑水杂岩的最初成岩时代在太古代。

(2)涑水杂岩作为与成矿关系密切的容矿围岩,其成岩时代可以间接指示成矿时代,由此提出赋存在变基性火山岩层中的古火山含矿原岩建造型铜矿有可能是中国最古老的铜矿之一。

(3)中条山区已发现有中、晚古元古代铜矿—古元古代铜矿—晚太古代铜矿—中太古代铜矿,而且多

类铜矿都与基性火山(次火山)—侵入岩有密切关系,说明中条山铜矿具有一个由老到新的成矿时间序列,已查明的上涌地幔可能就是一个“铜库”,从而说明中条山区深部及已知矿带外围具有很大的找矿潜力。

## 参考文献:

## References:

- [1] 王 植, 闻 广. 中条山式斑岩铜矿[J]. 地质学报, 1957, 37(4): 401-415.  
WANG Zhi, WEN Guang. Porphyry copper deposit in Zhongtiao Mountains[J]. Acta Geologica Sinica, 1957, 37(4): 401-415. (in Chinese)
- [2] 孙大中, 李惠民, 林源贤, 等. 中条山前寒武纪年代学、年代构造格架和年代地壳结构模式的研究[J]. 地质学报, 1991, 65(3): 216-231.  
SUN Da-zhong, LI Hui-min, LIN Yuan-xian, et al. Precambrian geochronology, chronotectonic framework and model of chronocrustal structure of the Zhongtiao Mountains[J]. Acta Geologica Sinica, 1991, 65(3): 216-231. (in Chinese)
- [3] 白 瑾, 余致信, 颜耀阳, 等. 中条山前寒武纪地质[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1997.  
BAI Jin, YU Zhi-xin, YAN Yao-yang, et al. Precambrian geology of Zhongtiao Mountains[M]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 1997. (in Chinese)
- [4] 赵 斌, 王登红, 陈振宇, 等. 山西中条山洞沟铜矿地质特征及找矿前景分析[J]. 矿床地质, 2009, 28(4): 462-472.  
ZHAO Bin, WANG Deng-hong, CHEN Zhen-yu, et al. Geological characteristics and ore-search prospects of Donggou copper deposits in Zhongtiaoshan Area, Shanxi Province[J]. Mineral Deposits, 2009, 28(4): 462-472. (in Chinese)
- [5] 赵 斌, 陈毓川, 王双猗, 等. 三岔沟金矿区钼矿成矿时代及中条山区找矿方向的研究[J]. 地质学报, 2009, 83(9): 1335-1343.  
ZHAO Bin, CHEN Yu-chuan, WANG Shuang-yi, et al. Ore-forming age of molybdenite deposit in the Sanchagou gold ore area and prospecting direction in the Zhongtiao Mountains Region[J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(9): 1335-1343. (in Chinese)
- [6] 张海东, 刘建朝, 江爱国, 等. 太行山南段平顺铁矿成矿地质特征及找矿预测[J]. 地球科学与环境学报, 2010, 32(3): 234-238.  
ZHANG Hai-dong, LIU Jian-chao, JIANG Ai-guo, et al. Geological feature and prospecting of iron deposit in Pingshun Area, southern Taihang Mountain[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2010, 32(3): 234-238. (in Chinese)
- [7] 山西省地质勘查局 213 地质队. 平陆测区区域地质调查报告[R]. 运城: 山西省地质勘查局 213 地质队, 1993.  
No. 213 Geological Team of Shanxi Provincial Geological Prospecting Bureau. Regional geological survey report of Pinglu measuring area [R]. Yuncheng: No. 213 Geological

- Team of Shanxi Provincial Geological Prospecting Bureau, 1993. (in Chinese)
- [8] 孙大中, 胡维兴. 中条山前寒武纪年代构造格架和年代地壳结构[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- SUN Da-zhong, HU Wei-xing. Precambrian age of the tectonic framework and the age of crustal structure of the Zhongtiao Mountains[M]. Beijing: Geology Publishing House, 1993. (in Chinese)
- [9] 郭丽爽, 刘树文, 刘玉琳, 等. 中条山涑水杂岩中 TTG 片麻岩的锆石 Hf 同位素特征及其形成环境[J]. 岩石学报, 2008, 24(1): 139-148.
- GUO Li-shuang, LIU Shu-wen, LIU Yu-lin, et al. Zircon Hf isotopic features of TTG gneisses and formation environment of Sushui Complex in Zhongtiao Mountains [J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(1): 139-148. (in Chinese)
- [10] 侯可军, 李延河, 田有荣. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术[J]. 矿床地质, 2009, 28(4): 481-492.
- HOU Ke-jun, LI Yan-he, TIAN You-rong. In situ U-Pb zircon dating using LA-MC-ICP-MS[J]. Mineral Deposits, 2009, 28(4): 481-492. (in Chinese)
- [11] 梁 婷, 王登红, 侯可军, 等. 广西大厂箱盖复式岩体的 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 2011, 27(6): 1624-1636.
- LIANG Ting, WANG Deng-hong, HOU Ke-jun, et al. LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb dating of Longxianggai pluton in Dachang of Guangxi and its geological significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(6): 1624-1636. (in Chinese)
- [12] 张万平, 莫宣学, 袁四化, 等. 西藏朗县蛇绿混杂岩的地球化学特征及地质意义[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2010, 37(5): 501-512.
- ZHANG Wan-ping, MO Xuan-xue, YUAN Si-hua, et al. Geochemical characteristics and tectonic significance of ophiolite mélange from the Langxian County of southeastern Tibet, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science and Technology Edition, 2010, 37(5): 501-512. (in Chinese)
- [13] 陈毓川, 王登红, 朱裕生, 等. 中国成矿体系与区域成矿评价[M]. 北京: 地质出版社, 2007.
- CHEN Yu-chuan, WANG Deng-hong, ZHU Yu-sheng, et al. Ore-forming system and regional metallogenic evaluation in China[M]. Beijing: Geology Publishing House, 2007. (in Chinese)
- [14] 王登红, 陈毓川. 与海相火山作用有关的铁-铜-铅-锌矿床成矿系列类型及成因初探[J]. 矿床地质, 2001, 20(2): 112-118.
- WANG Deng-hong, CHEN Yu-chuan. A preliminary study on the metallogenic series type of Fe-Cu-Pb-Zn ore deposits related to submarine volcanism and its origin[J]. Mineral Deposits, 2001, 20(2): 112-118. (in Chinese)
- [15] 王登红, 应立娟, 唐菊兴, 等. 与角岩有关的矿床主要类型及其对深部找矿的意义[J]. 地球科学与环境学报, 2011, 33(3): 221-229.
- WANG Deng-hong, YING Li-juan, TANG Ju-xing, et al. Major type of hornfels-related deposits and application for deep prospecting[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, 33(3): 221-229. (in Chinese)

### 《地球科学与环境学报》约稿函

尊敬的各位专家学者:

《地球科学与环境学报》(以下简称《学报》)自 1979 年创刊以来,得到了各位专家的支持,使期刊得到了快速发展。《学报》系地学综合性学术期刊,刊登的主要内容有基础地质与矿产地质、水资源与环境、地质工程、应用地球物理和地球信息科学等。据中国科学技术信息研究所 2011 年版《中国科技期刊引证报告(核心版)》,《学报》影响因子为 0.911,他引率为 0.82。

为了不断提升《学报》的学术质量和影响力,特向各位专家学者约稿,诚盼各位专家学者能鼎力支持《学报》的发展。《学报》目前的优势包括:

- 1、中国科技论文与引文数据库(CSTPCD)刊源;
- 2、不收取版面费,并且刊出后向作者支付一定稿酬;
- 3、发表周期短;
- 4、对学术质量高、有重大基金项目支持的论文优先发表;
- 5、刊登综述类论文;
- 6、可同期刊登同一主题的系列成果。

联系地址:西安市南二环路中段长安大学杂志社

邮政编码:710064 电话:029-82334686

E-mail:dkyhxb@chd.edu.cn

《地球科学与环境学报》编辑部