

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2023.01.005

华北克拉通宣龙式铁矿锆石 U-Pb 年龄及其对矿床成因的制约

张旭升¹, 杨秀清^{1,2*}, 赵军³, 梁婷¹, 杨云³, 梁永生³, 杨国威¹, 王晓青¹
ZHANG Xusheng¹, YANG Xiuqing^{1,2*}, ZHAO Jun³, LIANG Ting¹, YANG Yun³,
LIANG Yongsheng³, YANG Guowei¹, WANG Xiaoqing¹

1. 长安大学地球科学与资源学院/西部矿产资源与地质工程重点实验室, 陕西 西安 710054;

2. 西安市关键金属成矿与高效利用重点实验室, 陕西 西安 710054;

3. 河北省地矿局第三地质大队, 河北 张家口 075000

1. School of Earth Science and Resources/Chang'an University, MOE Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. Xi'an Key Laboratory for Mineralization and Efficient Utilization of Critical Metals, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

3. The 3rd Geological Team of Hebei Geology and Mining Bureau, Zhangjiakou 075000, Hebei, China

摘要: 华北克拉通宣龙式铁矿是中国北方最重要的沉积型铁矿类型, 形成于元古宙中期(1800~800 Ma)。河北大岭堡地区鲕状赤铁矿石发育大量碎屑锆石, 对这些碎屑锆石及庞家堡地区侵入串岭沟组的花岗岩脉进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分析。鲕状赤铁矿石碎屑锆石获得了 2 组主要的峰值年龄, 分别为 1873 Ma 和 2530 Ma, 记录了华北克拉通约 1850 Ma 和约 2500 Ma 两次构造热事件, 结合前人研究, 表明其与围岩具有基本一致的碎屑锆石源区, 与北京十三陵地区串岭沟组源区略有差异, 推测宣龙式铁矿可能为华北克拉通响应 Columbia 超大陆裂解的产物。花岗岩脉锆石 U-Pb 年龄为 202.3 ± 1.4 Ma ($n=27$, MSWD=0.96), 表明区内发育印支期岩浆侵入活动, 暗示磁铁矿石可能并非前人认为的燕山期的产物, 其成因还需要进一步深入研究。

关键词: 串岭沟组; 碎屑锆石; 锆石 U-Pb 年龄; 宣龙式铁矿; 华北克拉通

中图分类号: P611; P597⁺3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2023)01-0055-13

Zhang X S, Yang X Q, Zhao J, Liang T, Yang Y, Liang Y S, Yang G W, Wang X Q. Zircon U-Pb age of Xuanlong-type iron deposits in North China Craton and its constraints on genesis. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(1): 55-67

Abstract: Xuanlong-type iron deposit is the most important sedimentary-type iron ores in North China, which was deposited during the Mid-Proterozoic era(1800~800 Ma). Here we report the results of zircon U-Pb dating for the Xuanlong-type iron deposit. In this study, we have found abundant detrital zircons in the iron ores in the Dalingbu area, Hebei Province, and we have reported the LA-ICP-MS U-Pb ages of these detrital zircons. In addition, we also dating the granite veins which intruded into the Chuanlinggou Formation in Pangjiabu area. Combining previous studies, two peak detrital zircons ages can be observed, i.e., the ages of 1873 Ma and 2530 Ma, respectively. These ages effectively record ca.1850 Ma and 2500 Ma tectonic thermal events of North China Craton, which indicated that the iron ores may share a similar zircon sources with the surrounding rocks in Xuanlong area. However, their sources are slightly different

收稿日期: 2021-11-05; **修订日期:** 2022-01-07

资助项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目《华北克拉通北部宣龙式铁矿成因及沉积环境研究》(编号: 2020JM-213)、国家自然科学基金《北祁连元古宙中期卡瓦条带状铁建造成因机制》(批准号: 41972075)、长安大学中央高校基本科研业务费专项资金资助(编号: 300102272203)

作者简介: 张旭升(1997-), 男, 在读硕士生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。E-mail: 191545706@qq.com

*** 通信作者:** 杨秀清(1987-), 男, 副教授, 从事金属矿床成矿作用研究。E-mail: xiuqing2008@126.com

from that of the Chuanlinggou Formation in the Ming Tombs District, Beijing. Therefore, we speculate that Xuanlong-type iron ores may be the product of North China Craton in response to the breakup of the Columbia supercontinent. The U-Pb age of zircons from the granite vein was 202.3 ± 1.4 Ma ($n=27$, MSWD=0.96), which suggests that the occurrence of Indosinian magmatic activity in the studied area. Meanwhile, this indicates that the formation of magnetite ores may not be related to the Yanshanian magmatism, and its genesis needs further study.

Key words: Chuanlinggou Formation; detrital zircons; zircon U-Pb age; Xuanlong-type iron deposits; North China Craton

与沉积作用相关的铁矿石约占全球铁矿资源量的 90%，主要包括前寒武纪铁建造 (iron formations) 和显生宙铁岩 (ironstones) (Bekker et al., 2014; Ramanaidou et al., 2014; 汤冬杰等, 2015; Lin et al., 2015), 在中国分别称为沉积变质型铁矿和沉积型铁矿 (李厚民等, 2012)。此外, 铁建造和铁岩还记录了丰富的岩石圈、大气圈、水圈和生物圈状态及演化的信息 (Young, 1989; 李延河等, 2012; 张连昌等, 2012; Bekker et al., 2014; Konhauser et al., 2017)。全球铁岩主要形成于奥陶纪—泥盆纪, 其次为侏罗纪—新近纪 (Van Houten et al., 1989; Young, 1989; Rahiminejad et al., 2018)。中国铁岩主要形成于泥盆纪 (宁乡式铁矿) (廖士范等, 1993; 赵一鸣等, 2020), 少量形成于长城纪 (宣龙式铁矿) (翟裕生等, 2011; 李厚民等, 2012; 汤冬杰等, 2015)。

传统观点认为, 18 亿年前海洋的完全氧化 (Holland, 1984) 或深部海水硫化 (Canfield, 1998), 导致铁建造在元古宙中期 (1800~800 Ma) 缺失。宣龙式铁矿形成于前寒武纪铁建造缺失期, 其主要由赤铁矿组成, 可见典型的鲕状和肾状结构。前人对宣龙式铁矿的沉积古地理环境, 铁矿石的宏观和微观结构构造、成矿时代、地球化学特征、成矿物质来源等开展了大量研究 (陈志明等, 1982; 刘敏, 1995; 杜汝霖等 1999; 戴永定等, 2003; 汤冬杰等, 2015)。本次研究发现, 宣龙式铁矿中发育大量碎屑锆石, 对其开展锆石 U-Pb 定年可以有效约束沉积时代和物质源区。近年来, 又发现宣龙式铁矿有大量磁铁矿石产出, 储量约为 8000×10^4 t。前人对这些磁铁矿石成因关注较少, 推测其可能为燕山期花岗岩岩浆侵入热变质形成 (刘敏, 1995; 杜汝霖等, 1999; 梁永生, 2019)。因此, 本文对宣龙式铁矿鲕状赤铁矿石开展碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年, 同时对磁铁矿石发育地区的花岗岩脉进行年代学研究, 以期约束宣龙式铁矿成矿时代, 为探讨矿床成因提供制约。

1 地质背景

华北克拉通具有时间长约 3800 Ma 的演化历史, 是全球最古老的克拉通之一, 记录了前寒武纪—中生代以来的重大构造事件。华北克拉通经历了大于 3000 Ma 陆核与微陆块形成过程, 2700~2900 Ma 的陆壳增生、2500 Ma 的岩浆—变质作用与克拉通化、2300~1900 Ma 的古元古代活动 (造山) 带和 1800 Ma 的基底隆升与裂谷—非造山岩浆事件 (翟明国等, 2007)。古元古代末—中元古代初, 华北克拉通裂谷作用活跃, 伴随 Columbia 超大陆的裂解, 华北克拉通周缘形成了燕辽盆地 (Zhai et al., 2000; Lu et al., 2008)。

华北克拉通北部燕辽盆地主要出露长城系 (图 1-a), 自下而上分别为常州沟组、串岭沟组、团山子组、大红峪组 (图 1-b)。常州沟组主要由一套石英砂岩和砾岩组成。串岭沟组为含铁矿层, 主要由粉砂岩、砂岩及铁矿层组成, 可分为 2 段。一段下部为深灰色粉砂质页岩, 中部为中厚层铁质石英砂岩, 上部为铁矿层夹含铁砂岩; 二段底部为黑色粉砂质页岩, 下部为灰色粉砂质页岩, 炭质页岩夹含铁砂岩, 上部为灰绿色页岩。团山子组主要为一套富含粉砂的泥质泥晶白云岩。大红峪组主要由石英砂岩、粉砂质白云岩组成。

宣龙式铁矿主要分布于河北省西北部张家口地区的宣化—龙关—赤城一带, 大致呈北东东向展布 (李志红等, 2012), 主要赋存于长城系串岭沟组下部, 串岭沟组主要由黑色粉砂质页岩、砂岩和铁矿层 (一般有 1~4 层) 组成。铁矿石以赤铁矿为主, 可见磁铁矿和菱铁矿, 可见典型的鲕状和肾状结构。研究表明, 宣龙式铁矿主要形成于海进序列的潮间—潮下带浅海环境 (汤冬杰等, 2015; Lin et al., 2015)。古地理研究表明, 在古元古代末期, 串岭沟组海域向北与外海相连, 海水的海侵方向为北西向或北东向 (乔秀夫, 2002)。

磁铁矿石也主要产自串岭沟组下部, 呈灰黑

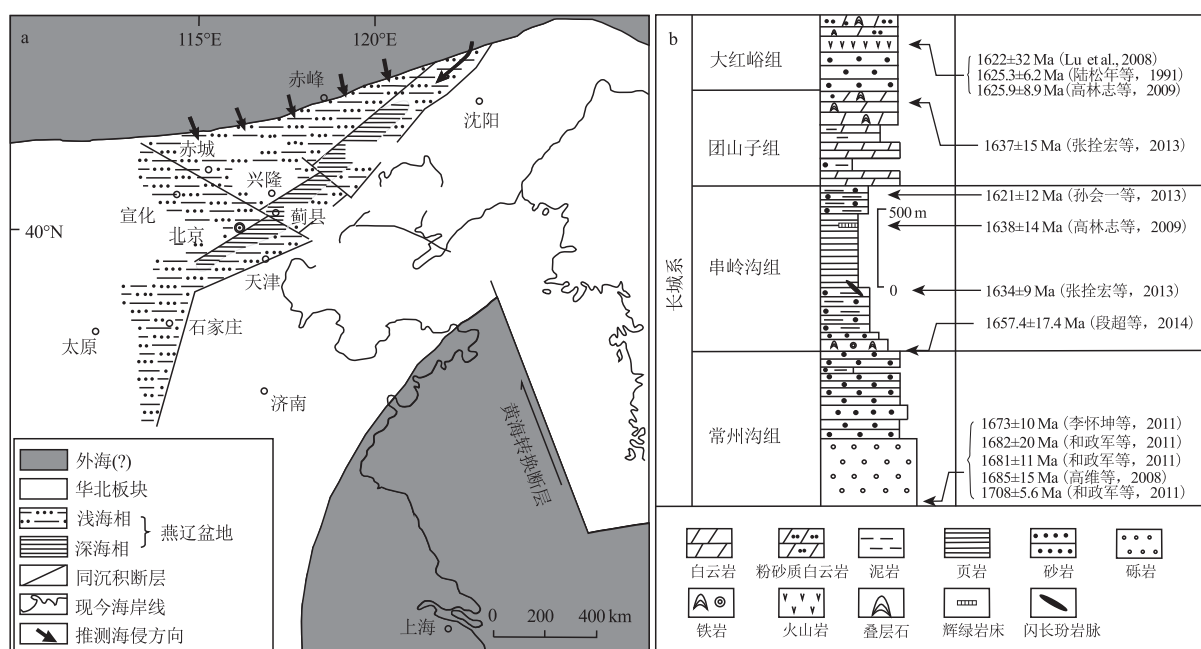


图 1 宣龙式铁矿区地质背景

Fig. 1 Geological setting for the Xuanlong-type iron deposits

a—串岭沟组沉积期间燕辽盆地构造和古地理背景(阎玉忠等,1998;乔秀夫,2002);b—华北克拉通长城群地层划分及时代(Lin et al., 2015)

色,可见鲕状、肾状、块状和浸染状构造。磁铁矿体呈层状发育于赤铁矿体下部,局部与赤铁矿体界线截然,部分赤铁矿石与磁铁矿石存在渐变过渡关系,矿石颜色由红变黑,磁性从无到有,逐渐增加(梁永生,2019)。此外,部分矿区也可见磁铁矿体呈单独层状矿体发育于串岭沟组中,未见赤铁矿体出现。宣龙地区可见晚期花岗岩体零星出露,但是未见这些岩体和磁铁矿石有直接接触关系,前人研究认为这些岩体侵入时代为燕山期,但是缺乏精确的时代约束(杜汝霖等,1999;梁永生,2019),本文研究发现其可能形成于印支期。

2 样品描述与测试方法

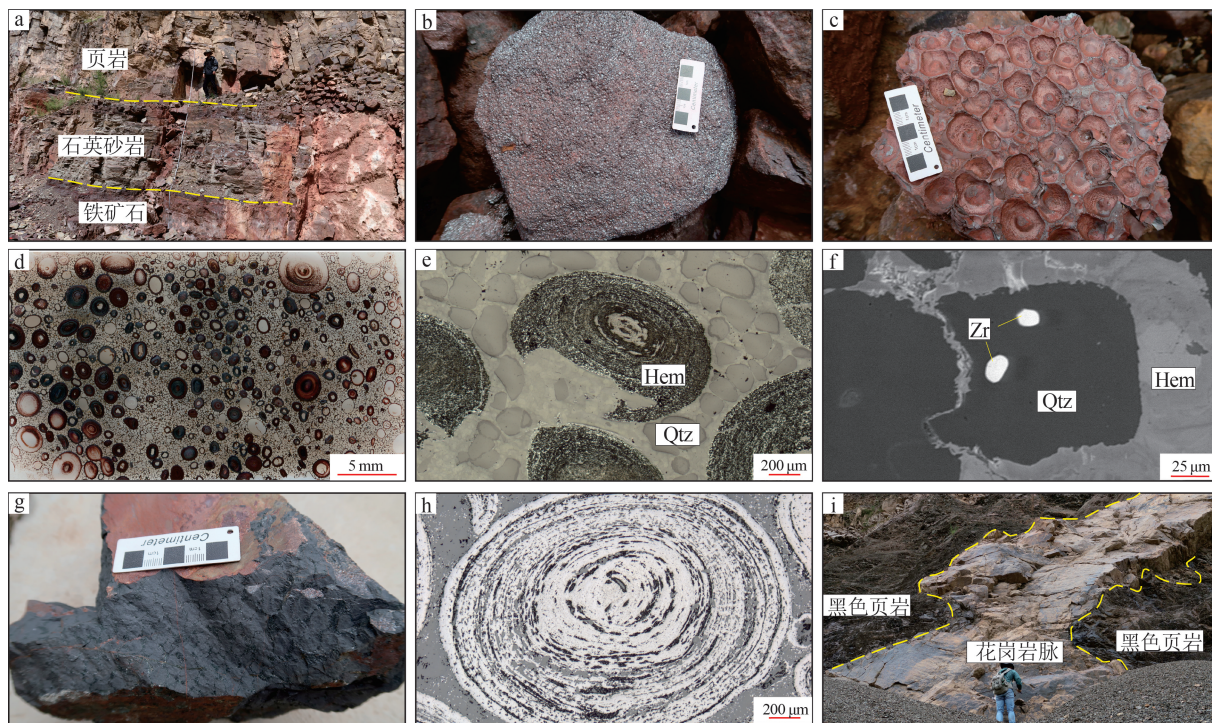
鲕状赤铁矿石样品(DLB-1)采自大岭堡地区串岭沟组底部含矿层中(图版 I-a),采样点地理坐标为东经 115°41'43.35"、北纬 40°49'34.74"。手标本呈钢灰色—红色(图版 I-b、c),鲕粒形态以球形、次球形为主。新鲜鲕粒以铅灰色为主,鲕粒表面较光滑,呈金属—半金属光泽。鲕粒大小不一(图版 I-d),直径 0.5~3 mm。矿物学研究表明,铁矿物主要为赤铁矿(图版 I-e),脉石矿物主要为石英、绿泥石、锆石等。鲕粒之间大多填充了石英等

陆源碎屑物质,亦有少部分铁质鲕粒直接接触,鲕粒、石英颗粒之间的胶结物多为含铁泥质。大多数鲕粒的核心与包壳生长环带清晰可见。锆石主要赋存在鲕粒核部的石英颗粒中(图版 I-f)。磁铁矿矿石手标本呈钢灰色(图版 I-g),可见典型的鲕状、肾状结构,块状构造,含铁矿物主要为磁铁矿(图版 I-f),脉石矿物主要为石英、绿泥石等。

花岗岩脉样品(PJB-11)采自庞家堡地区(图版 I-i),采样点地理坐标为东经 115°26'38.87"、北纬 40°37'36.52",主要呈脉状侵入串岭沟组,样品遭受了风化作用,手标本呈土黄色,块状构造。

样品经过破碎后,用常规的重力和磁选方法选出锆石,在双目镜下挑选出无裂痕、晶形完好、干净的锆石,置于环氧树脂制靶,然后将其抛光至锆石中心部位出露。对靶上的锆石样品进行反射光、透射光观察及拍照,然后进行阴极发光(CL)照相。锆石 U-Pb 同位素分析采用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS),激光剥蚀等离子质谱为德国 GeoLas200M 激光剥蚀系统,以氦为剥蚀物质的载气,使用美国研发人工合成的硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST SRM610 使激光剥蚀系统达到最佳工作状态。采用 91500 国际标准锆石为外标进行校

图版 I Plate I



a. 鲕状赤铁矿石与围岩整合产出; b. 鲕状赤铁矿石; c. 肾状赤铁矿石 (叠层石赤铁矿石); d. 赤铁矿石薄片扫描照片; e. 鲕状赤铁矿石显微照片 (反射光); f. 锆石赋存状态背散射照片; g. 磁铁矿石; h. 磁铁矿石显微照片 (反射光); i. 庞家堡花岗岩脉。Zr—锆石; Qtz—石英; Hem—赤铁矿

正, 锆石测定中, 每测定 6 个样品点测定一次标样。数据处理采用 Glitter4.0 程序, 谐和图的绘制和年龄计算采用 Isoplot 软件。锆石的制靶、阴极发光 (CL) 图像拍摄及锆石 U-Pb 同位素测试分析均在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成 (Yuan et al., 2008)。

3 测试结果

3.1 鲕状赤铁矿石

对大岭堡铁矿床鲕状赤铁矿石样品 78 颗碎屑锆石进行了 U-Pb 年龄测试, 样品中锆石颗粒较多, 磨圆度好, 多呈浑圆状、次等轴状, 粒径大小不一, 主要为 100~200 μm (图 2-a), 长宽比为 1.5:1~2:1, 78 颗锆石的 U-Pb 年龄数据见表 1 和图 2-a。Th 含量为 $8.71 \times 10^{-6} \sim 243.93 \times 10^{-6}$, U 含量为 $16.07 \times 10^{-6} \sim 981.61 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.04~3.88。该样品年龄变化范围较大, 为 1761~2658 Ma, 可见明显的 1873 Ma 和 2530 Ma 两个峰值。

3.2 花岗岩脉

对花岗岩脉样品中 27 颗锆石进行了年龄测试,

测试结果见表 2。锆石阴极发光可见环带较发育 (图 2-b), 锆石多呈短柱状, 粒径为 100~150 μm , 长宽比约为 1.5:1。Th 含量为 $61.96 \times 10^{-6} \sim 567.8 \times 10^{-6}$, U 含量为 $79.66 \times 10^{-6} \sim 295.55 \times 10^{-6}$, Th/U 值较高 (0.76~2.00), 显示典型岩浆锆石的特征 (Hoskin et al., 2003)。27 个测试点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化范围为 197.3~205.8 Ma, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $201.6 \pm 0.84 \text{ Ma}$ ($n=27$, MSWD=0.96), 与上交点年龄 $202.3 \pm 1.4 \text{ Ma}$ ($n=27$, MSWD=0.8) 在误差范围内一致 (图 3-b)。

4 讨论

4.1 对成矿时代的制约

前人对串岭沟组形成时代进行了制约 (图 1-b), 李怀坤等 (2011)、和政军等 (2011)、高维等 (2008) 对侵入密云群的环斑花岗岩进行了年代学研究, 得到其形成时代分别为 $1673 \pm 10 \text{ Ma}$ 、 $1682 \pm 20 \text{ Ma}$ 、 $1685 \pm 15 \text{ Ma}$, 由此推断其不整合上覆的常州沟组沉积岩形成时代应不早于 1673 Ma。本次研究获得鲕状赤铁矿石最年轻碎屑锆石年龄为

表 1 大岭堡鲕状赤铁矿 LA-ICP-MS 碎屑锆石 U-Th-Pb 分析结果
Table 1 LA-ICP-MS U-Th-Pb dating results of detrital zircons from the Dalingbu oolitic hematite ores

点号	含量/ 10^{-6}			Th/U	同位素比值					年龄/Ma										
	^{204}Pb	^{232}Th	^{238}U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} \pm$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} \pm$	$^{206}\text{Pb}/\text{U}^{238} \pm$	$^{206}\text{Pb}/^{232}\text{Th} \pm$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} \pm$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} \pm$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} \pm$	$^{206}\text{Pb}/^{232}\text{Th} \pm$								
DLB-1-01	7.54	207.2	981.61	0.21	0.1297	0.00263	6.10367	0.06389	0.34125	0.00344	0.10113	0.00103	2093.9	35.22	1990.8	9.13	1892.7	16.53	1947.2	18.87
DLB-1-02	<1.02	187.57	146.69	1.28	0.11375	0.00233	5.24236	0.05689	0.3342	0.00339	0.10167	0.00093	1860.1	36.55	1859.5	9.25	1858.7	16.4	1957.1	17.1
DLB-1-03	1.87	113.7	174.51	0.65	0.12187	0.00252	5.4377	0.06063	0.32355	0.00331	0.11148	0.00111	1983.7	36.28	1890.8	9.56	1807.1	16.14	2196.6	20.07
DLB-1-04	2.28	202.01	234.71	0.86	0.11312	0.00232	3.20294	0.03451	0.20531	0.00207	0.06005	0.00056	1850.2	36.58	1457.9	8.34	1203.8	11.1	1178.7	10.6
DLB-1-05	1.25	16.78	21.21	0.79	0.10855	0.00254	4.7444	0.0744	0.31694	0.0036	0.09834	0.00123	1775.2	42.08	1775.1	13.15	1774.8	17.64	1895.9	22.65
DLB-1-06	<1.12	25.48	74.77	0.34	0.16948	0.00347	11.35351	0.12294	0.48579	0.00499	0.14573	0.00155	2552.5	33.86	2552.6	10.1	2552.4	21.66	2749.7	27.29
DLB-1-07	<1.48	50.59	135.49	0.37	0.11499	0.00237	5.34251	0.05848	0.33692	0.00343	0.10075	0.00102	1879.7	36.62	1875.7	9.36	1871.9	16.55	1940.3	18.67
DLB-1-08	<1.29	22.77	36.77	0.62	0.11108	0.0025	4.96974	0.07112	0.32442	0.00358	0.10135	0.00124	1817.2	40.3	1814.2	12.1	1811.3	17.41	1951.2	22.8
DLB-1-09	<1.15	101.5	146.3	0.69	0.17009	0.00347	11.42612	0.12166	0.48713	0.00497	0.15722	0.00148	2558.5	33.76	2558.6	9.94	2558.2	21.55	2951.5	25.92
DLB-1-10	<1.16	48.69	37.88	1.29	0.12817	0.00276	6.59203	0.08365	0.37295	0.004	0.11182	0.00113	2073.1	37.41	2058.3	11.19	2043.3	18.8	2142.4	20.51
DLB-1-11	1.01	74.17	143.79	0.52	0.11661	0.0024	5.51865	0.06017	0.34319	0.0035	0.10427	0.00101	1904.9	36.51	1903.5	9.37	1902	16.77	2004.7	18.46
DLB-1-12	1.03	70.79	78.35	0.9	0.16783	0.00345	11.21694	0.12237	0.48467	0.00499	0.14094	0.00134	2536.1	34.06	2541.3	10.17	2547.6	21.68	2665	23.79
DLB-1-13	<0.98	84.52	83.64	1.01	0.12485	0.0026	6.28619	0.07124	0.36511	0.00377	0.10725	0.00102	2026.7	36.39	2016.5	9.93	2006.3	17.8	2059.2	18.67
DLB-1-14	<1.04	80.15	93.54	0.86	0.16816	0.00344	11.22525	0.12056	0.48407	0.00495	0.13924	0.00131	2539.4	33.95	2542	10.01	2545	21.52	2634.9	23.2
DLB-1-15	1.24	189.88	161.56	1.18	0.11526	0.00237	5.39789	0.05862	0.3396	0.00346	0.10225	0.00093	1884	36.61	1884.5	9.3	1884.7	16.63	1967.7	17.13
DLB-1-16	1.78	100.55	69.15	1.45	0.16112	0.00334	10.30068	0.1149	0.4636	0.00481	0.13626	0.00127	2467.4	34.54	2462.2	10.32	2455.4	21.19	2582	22.64
DLB-1-17	1.42	117.95	251	0.47	0.16409	0.00334	9.73452	0.10159	0.4302	0.00435	0.13647	0.00127	2498.2	33.89	2410	9.61	2306.6	19.6	2585.6	22.52
DLB-1-18	<1.08	111.9	127.06	0.88	0.11437	0.00237	5.28981	0.05848	0.3354	0.00343	0.10069	0.00094	1869.9	36.88	1867.2	9.44	1864.5	16.55	1939	17.29
DLB-1-19	3.76	200.74	806.72	0.25	0.15831	0.00324	3.54981	0.03724	0.16259	0.00164	0.03092	0.00031	2437.7	34.23	1538.4	8.31	971.2	9.1	615.6	6.09
DLB-1-20	<1.38	128.69	129.15	1	0.12022	0.00249	5.81465	0.06395	0.35073	0.00359	0.10307	0.00095	1959.4	36.48	1948.6	9.53	1938.1	17.12	1982.7	17.5
DLB-1-21	1.76	34.79	61.83	0.56	0.16808	0.00349	11.21597	0.12579	0.48387	0.00504	0.13987	0.00143	2538.6	34.41	2541.2	10.46	2544.1	21.9	2646.1	25.42
DLB-1-22	1.47	104.61	141.96	0.74	0.11507	0.00238	5.3613	0.05883	0.33783	0.00345	0.10167	0.00095	1881	36.82	1878.7	9.39	1876.2	16.62	1957.2	17.47
DLB-1-23	<1.19	96.62	87.06	1.11	0.16967	0.0035	11.389	0.12421	0.48674	0.00501	0.13786	0.00128	2554.4	34.14	2555.5	10.18	2556.6	21.73	2610.4	22.8
DLB-1-24	1.4	81.64	105.12	0.78	0.11573	0.00242	5.40938	0.06128	0.33892	0.00349	0.0998	0.00096	1891.3	37.12	1886.3	9.71	1881.5	16.81	1922.7	17.59
DLB-1-25	<1.35	79.79	67.22	1.19	0.11439	0.00243	5.33418	0.06369	0.33813	0.00353	0.0995	0.00095	1870.3	37.81	1874.4	10.21	1877.7	17.02	1917.3	17.54
DLB-1-26	<1.21	120.35	75.76	1.59	0.12444	0.00264	6.24731	0.07417	0.36402	0.00382	0.10637	0.001	2020.8	37.11	2011.1	10.39	2001.2	18.03	2043.2	18.3

续表 1-1

点号	含量/ 10^{-6}			Th/U	同位素比值						年龄/Ma									
	^{204}Pb	^{232}Th	^{238}U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} \pm$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} \pm$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th} \pm$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} \pm$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} \pm$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} \pm$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th} \pm$									
DLB-1-27	<1.12	197.75	201.52	0.98	0.11493	0.00237	5.38027	0.05823	0.33943	0.00345	0.1003	0.00091	1878.8	36.76	1881.7	9.27	1883.9	16.63	1931.9	16.78
DLB-1-28	<1.22	21.8	36.28	0.6	0.10952	0.00244	4.77402	0.06536	0.31607	0.00343	0.09624	0.00113	1791.4	40.02	1780.3	11.49	1770.5	16.81	1857.2	20.75
DLB-1-29	<1.21	36	87.87	0.41	0.17649	0.00365	12.2693	0.13418	0.50407	0.0052	0.14401	0.00147	2620.1	34	2625.2	10.27	2631.3	22.3	2719.3	25.9
DLB-1-30	<1.21	26.49	52.93	0.5	0.11076	0.00239	4.98142	0.06238	0.3261	0.00345	0.09504	0.00106	1811.9	38.7	1816.2	10.59	1819.5	16.77	1835.2	19.57
DLB-1-31	1.24	21.26	57.39	0.37	0.11383	0.00246	5.25841	0.06562	0.33494	0.00355	0.09731	0.00116	1861.5	38.46	1862.1	10.65	1862.3	17.13	1876.9	21.34
DLB-1-32	<1.14	63.19	77.98	0.81	0.11335	0.00241	5.07907	0.0605	0.32488	0.00339	0.0951	0.00094	1853.8	37.96	1832.6	10.11	1813.5	16.51	1836.1	17.31
DLB-1-33	<0.97	82.14	43.96	1.87	0.11483	0.00252	5.31308	0.06977	0.33548	0.00361	0.09783	0.00094	1877.2	39.06	1871	11.22	1864.9	17.44	1886.5	17.39
DLB-1-34	1.26	93.97	129.75	0.72	0.11673	0.00244	5.55652	0.062	0.34514	0.00354	0.10015	0.00094	1906.7	37.03	1909.4	9.6	1911.3	16.99	1929.2	17.36
DLB-1-35	<1.33	45.41	46.01	0.99	0.11245	0.00249	4.87211	0.06502	0.31413	0.00339	0.09082	0.00095	1839.4	39.5	1797.4	11.24	1761	16.63	1757.1	17.65
DLB-1-36	<1.10	74.63	166.91	0.45	0.11985	0.0025	5.839	0.06468	0.35324	0.00362	0.10275	0.001	1953.9	36.75	1952.2	9.6	1950.1	17.26	1976.9	18.35
DLB-1-37	<1.12	191.41	49.28	3.88	0.16401	0.00339	10.42798	0.12004	0.46128	0.00493	0.11817	0.001	2497.4	34.38	2473.5	10.67	2445.2	21.77	2257.6	18.07
DLB-1-38	<0.78	25.78	31.67	0.81	0.10908	0.00241	4.78065	0.0665	0.31795	0.00353	0.08693	0.00093	1784.1	39.8	1781.5	11.68	1779.7	17.26	1684.9	17.3
DLB-1-39	<1.03	118.89	104.08	1.14	0.16645	0.00339	11.12306	0.12116	0.48479	0.00508	0.12562	0.00109	2522.3	33.79	2533.5	10.15	2548.1	22.04	2391.9	19.57
DLB-1-40	<1.00	24.35	98.69	0.25	0.12411	0.00256	6.25036	0.07137	0.36537	0.00385	0.09708	0.00107	2016.1	36.2	2011.5	10	2007.6	18.19	1872.7	19.67
DLB-1-41	<1.48	175.61	184.86	0.95	0.16759	0.00343	9.04396	0.10056	0.39149	0.00412	0.11794	0.00105	2533.8	33.96	2342.5	10.17	2129.7	19.1	2253.4	19.03
DLB-1-42	1.65	102.28	127.77	0.8	0.16579	0.00336	10.86621	0.11689	0.47548	0.00495	0.12611	0.00111	2515.6	33.71	2511.7	10	2507.6	21.64	2400.6	19.84
DLB-1-43	<1.01	22.24	39.59	0.56	0.15998	0.00334	9.55104	0.11348	0.4331	0.00468	0.10843	0.00115	2455.5	34.86	2392.5	10.92	2319.7	21.04	2080.7	21.01
DLB-1-44	<1.14	21.46	67.1	0.32	0.12318	0.00257	6.19409	0.07327	0.36479	0.00388	0.09624	0.00108	2002.8	36.61	2003.6	10.34	2004.8	18.34	1857.2	19.95
DLB-1-45	<1.00	51.72	113.96	0.45	0.1137	0.00235	5.28537	0.06014	0.33722	0.00354	0.09162	0.00089	1859.4	36.83	1866.5	9.72	1873.3	17.06	1771.9	16.46
DLB-1-46	<1.09	33.62	43.05	0.78	0.10833	0.00236	4.69926	0.06266	0.31467	0.00344	0.08328	0.00088	1771.5	39.27	1767.1	11.16	1763.7	16.87	1616.8	16.4
DLB-1-47	<1.28	162.97	180.67	0.9	0.16718	0.00338	11.22795	0.11919	0.4872	0.00505	0.12781	0.00111	2529.6	33.56	2542.2	9.9	2558.5	21.87	2431.1	19.87
DLB-1-48	<1.06	210.38	138.43	1.52	0.12347	0.00253	6.14923	0.06852	0.36128	0.00378	0.09698	0.00085	2007	35.97	1997.3	9.73	1988.2	17.88	1870.8	15.59
DLB-1-49	1.35	89.01	89.23	1	0.16164	0.00332	10.4559	0.117	0.46923	0.00495	0.12438	0.00114	2472.9	34.21	2476	10.37	2480.2	21.73	2369.5	20.56
DLB-1-50	<1.00	47.83	130.36	0.37	0.12184	0.0025	6.09739	0.06802	0.36301	0.00379	0.10106	0.001	1983.3	36.07	1989.9	9.73	1996.4	17.93	1945.9	18.38
DLB-1-51	<0.92	23.48	39.9	0.59	0.109	0.00274	4.59411	0.08477	0.30572	0.00379	0.08435	0.00134	1782.8	45.24	1748.2	15.39	1719.6	18.71	1636.8	24.95
DLB-1-52	<1.08	133.07	130.61	1.02	0.16788	0.00342	11.12641	0.12122	0.48074	0.00502	0.12935	0.00116	2536.6	33.76	2533.8	10.15	2530.5	21.87	2458.7	20.83
DLB-1-53	<1.02	65.5	142.96	0.46	0.11647	0.00238	5.43957	0.05993	0.33878	0.00352	0.09695	0.00091	1902.7	36.31	1891.1	9.45	1880.8	16.95	1870.4	16.85

续表 1-2

点号	含量/ 10^{-6}			Th/U	同位素比值					年龄/Ma										
	^{204}Pb	^{232}Th	^{238}U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} \pm$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} \pm$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} \pm$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th} \pm$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} \pm$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} \pm$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} \pm$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th} \pm$								
DDL-1-54	<1.13	137.38	154.1	0.89	0.11816	0.00242	5.67031	0.06318	0.34808	0.00363	0.09709	0.00088	1928.6	36.31	1926.9	9.62	1925.4	17.35	1872.9	16.25
DLB-1-55	<0.99	36.57	59.02	0.62	0.11387	0.0024	5.26728	0.06367	0.33551	0.00357	0.09329	0.00095	1862.1	37.51	1863.6	10.32	1865	17.24	1802.8	17.61
DDL-1-56	1.29	8.71	213.01	0.04	0.11535	0.00235	5.41295	0.05898	0.34039	0.00352	0.07511	0.00127	1885.3	36.28	1886.9	9.34	1888.5	16.95	1463.9	23.78
DDL-1-57	0.97	60.36	145.36	0.42	0.18056	0.00366	12.66076	0.13492	0.50859	0.00527	0.12603	0.0012	2658	33.18	2654.7	10.03	2650.6	22.53	2399.2	21.51
DDL-1-58	<1.04	72.71	162.26	0.45	0.16161	0.00328	10.26112	0.10966	0.46051	0.00477	0.13281	0.00124	2472.6	33.82	2458.6	9.89	2441.8	21.05	2520.5	22.17
DDL-1-59	<1.14	15.33	25.92	0.59	0.11312	0.00263	5.09366	0.08026	0.32661	0.0038	0.09111	0.00125	1850.1	41.53	1835	13.37	1821.9	18.46	1762.3	23.2
DDL-1-60	<1.07	31.34	62.89	0.5	0.11015	0.00235	4.94568	0.06265	0.32566	0.00351	0.09211	0.00103	1801.8	38.38	1810.1	10.7	1817.3	17.05	1780.9	19.11
DLB-1-61	1.24	48.78	130.45	0.37	0.11775	0.00244	5.43015	0.06205	0.33447	0.0035	0.0971	0.00101	1922.4	36.62	1889.6	9.8	1860	16.93	1873	18.66
DLB-1-62	<1.46	42.07	51.26	0.82	0.11577	0.00249	5.39378	0.06996	0.3379	0.00367	0.09565	0.00102	1891.9	38.27	1883.9	11.11	1876.6	17.7	1846.4	18.73
DDL-1-63	<0.99	23.88	54.18	0.44	0.10772	0.00231	4.70383	0.05992	0.31671	0.00341	0.0914	0.00106	1761.2	38.64	1767.9	10.67	1773.6	16.67	1767.8	19.59
DDL-1-64	<1.01	146.46	135.22	1.08	0.16714	0.00339	11.27171	0.12048	0.48911	0.00506	0.13152	0.00119	2529.2	33.63	2545.9	9.97	2566.8	21.92	2497.5	21.31
DDL-1-65	<1.05	13.18	16.07	0.82	0.11262	0.0027	5.07427	0.08494	0.32676	0.00386	0.09234	0.00122	1842.2	42.75	1831.8	14.2	1822.6	18.77	1785.3	22.52
DDL-1-66	2.89	243.93	400.87	0.61	0.15736	0.00318	6.34601	0.06643	0.29248	0.003	0.09847	0.00089	2427.5	33.83	2024.8	9.18	1653.9	14.94	1898.4	16.33
DLB-1-67	3.23	91.92	681.34	0.13	0.11435	0.00232	2.09822	0.02227	0.13308	0.00136	0.05801	0.00057	1869.6	36.14	1148.2	7.3	805.4	7.75	1139.7	10.89
DLB-1-68	<0.80	85.52	166.34	0.51	0.11829	0.00241	5.61018	0.06048	0.34395	0.00354	0.09992	0.00094	1930.6	35.99	1917.7	9.29	1905.7	17	1924.9	17.3
DDL-1-69	<1.00	28.59	43.48	0.66	0.16445	0.00343	10.74174	0.12791	0.47371	0.00512	0.13611	0.00147	2501.9	34.72	2501	11.06	2499.8	22.39	2579.3	26.17
DDL-1-70	<1.19	62.39	210.58	0.3	0.11281	0.00229	5.19131	0.05571	0.33373	0.00343	0.10019	0.00098	1845.1	36.33	1851.2	9.14	1856.5	16.58	1929.8	17.98
DDL-1-71	0.85	95.54	206.62	0.46	0.11372	0.00232	5.31421	0.05747	0.33888	0.00349	0.10073	0.00096	1859.7	36.34	1871.2	9.24	1881.3	16.81	1939.8	17.67
DLB-1-72	0.89	127.6	103.71	1.23	0.11405	0.00234	5.26654	0.05884	0.33487	0.00348	0.09919	0.00092	1864.9	36.65	1863.5	9.53	1861.9	16.79	1911.5	16.92
DLB-1-73	<0.62	52.17	106.45	0.49	0.11515	0.0024	5.23115	0.06158	0.32945	0.00347	0.09852	0.00105	1882.2	37.14	1857.7	10.03	1835.7	16.82	1899.2	19.28
DLB-1-74	<1.13	56.77	63.32	0.9	0.16757	0.00354	10.97485	0.13543	0.47494	0.00522	0.1404	0.00152	2533.5	34.97	2521	11.48	2505.2	22.8	2655.4	26.91
DDL-1-75	<0.79	93	101.71	0.91	0.11757	0.00242	5.60564	0.06281	0.34574	0.00359	0.1029	0.00098	1919.6	36.44	1917	9.65	1914.2	17.21	1979.7	18.05
DDL-1-76	<1.30	68.51	217.93	0.31	0.11611	0.00239	4.08081	0.04589	0.25486	0.00264	0.08478	0.0009	1897.2	36.61	1650.5	9.17	1463.5	13.57	1644.8	16.68
DDL-1-77	<0.80	163.03	201.74	0.81	0.11441	0.00234	5.36104	0.05847	0.3398	0.0035	0.10052	0.00095	1870.6	36.39	1878.7	9.33	1885.7	16.85	1936	17.48
DLB-1-78	<0.97	78.61	94.78	0.83	0.12239	0.00252	6.11826	0.06907	0.36249	0.00378	0.10728	0.00105	1991.3	36.21	1992.9	9.85	1994	17.88	2059.7	19.15

表 2 庞家堡地区花岗岩脉锆石 LA-ICP-MS U-Th-Pb 分析结果
Table 2 LA-ICP-MS U-Th-Pb analysed results of zircons from the granite vein in the Pangjiabu area

点号	含量/ 10^{-6}			Th/U	同位素比值				年龄/Ma											
	^{204}Pb	^{232}Th	^{238}U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} \pm$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} \pm$	$^{206}\text{Pb}/\text{U}^{238} \pm$	$^{206}\text{Pb}/^{232}\text{Th} \pm$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} \pm$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} \pm$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} \pm$	$^{206}\text{Pb}/^{232}\text{Th} \pm$								
PJB-11-01	<1.05	567.8	295.55	1.92	0.0507	0.00141	0.21821	0.0046	0.03122	0.00033	0.0094	0.00009	227.2	63.12	200.4	3.83	198.2	2.07	189.2	1.87
PJB-11-02	1.26	343.14	231.08	1.48	0.05115	0.00141	0.2208	0.00455	0.03131	0.00033	0.00969	0.0001	247.8	62.08	202.6	3.79	198.7	2.06	195	1.98
PJB-11-03	<1.05	149.67	126.44	1.18	0.04846	0.0016	0.20771	0.00567	0.03109	0.00034	0.00978	0.00012	121.7	75.79	191.6	4.77	197.3	2.14	196.8	2.31
PJB-11-04	<1.07	231.34	185.21	1.25	0.05178	0.00153	0.22634	0.00527	0.0317	0.00034	0.0108	0.00012	275.8	66.41	207.2	4.36	201.2	2.15	217.1	2.39
PJB-11-05	2.3	323.13	251.59	1.28	0.05181	0.00148	0.22781	0.00502	0.03189	0.00034	0.00989	0.00011	277.2	64.15	208.4	4.15	202.3	2.13	198.9	2.14
PJB-11-06	<1.21	324.53	213.02	1.52	0.05217	0.00138	0.22932	0.00441	0.03188	0.00033	0.01003	0.0001	292.9	59.1	209.6	3.64	202.3	2.08	201.7	2
PJB-11-07	<1.19	227.83	176.64	1.29	0.05208	0.00165	0.22832	0.00591	0.03179	0.00036	0.01013	0.00012	289.1	70.89	208.8	4.88	201.8	2.23	203.7	2.41
PJB-11-08	<1.51	451.22	252.42	1.79	0.05112	0.00198	0.21908	0.00742	0.03108	0.00038	0.00935	0.00012	246.4	86.96	201.1	6.18	197.3	2.38	188.1	2.4
PJB-11-09	3.07	61.96	79.66	0.78	0.05098	0.00268	0.22806	0.0111	0.03244	0.00047	0.01119	0.00024	239.9	116.88	208.6	9.18	205.8	2.91	224.9	4.85
PJB-11-10	<1.23	149.63	138.11	1.08	0.05146	0.00167	0.22413	0.00598	0.03159	0.00035	0.01032	0.00013	261.4	72.71	205.3	4.96	200.5	2.21	207.5	2.55
PJB-11-12	<0.81	249.67	121.49	2.06	0.05103	0.00214	0.21936	0.00819	0.03117	0.0004	0.01041	0.00013	242.1	93.9	201.4	6.82	197.9	2.48	209.4	2.64
PJB-11-13	<1.35	177.09	161.58	1.1	0.05029	0.00161	0.22205	0.0058	0.03179	0.00036	0.01054	0.00013	208.6	72.69	202.3	4.83	201.7	2.22	212	2.57
PJB-11-14	<0.89	153.63	128.62	1.19	0.05023	0.00211	0.21786	0.00814	0.03145	0.0004	0.01053	0.00016	205.5	94.52	200.1	6.79	199.6	2.5	211.8	3.16
PJB-11-15	<0.93	122.91	107.14	1.15	0.0529	0.0018	0.23343	0.00668	0.03199	0.00037	0.0104	0.00013	324.6	75.51	213	5.5	203	2.31	209.2	2.7
PJB-11-17	<1.10	149.92	118.35	1.27	0.05153	0.00192	0.22824	0.00736	0.03212	0.00038	0.0103	0.00014	264.5	83.29	208.7	6.09	203.8	2.4	207.2	2.78
PJB-11-18	<1.18	300.95	185.05	1.63	0.05112	0.00142	0.22268	0.00468	0.03159	0.00034	0.00981	0.0001	246	62.53	204.1	3.89	200.5	2.1	197.2	2.02
PJB-11-19	<1.34	208.47	147.41	1.41	0.05121	0.00159	0.22347	0.00564	0.03164	0.00035	0.01037	0.00012	250.1	70.08	204.8	4.68	200.8	2.2	208.5	2.35
PJB-11-21	1.4	252.74	151.37	1.67	0.05141	0.00155	0.22398	0.00539	0.03159	0.00035	0.01003	0.00011	259.4	67.78	205.2	4.47	200.5	2.18	201.8	2.18
PJB-11-22	<1.28	108.3	102.94	1.05	0.05007	0.00169	0.22155	0.00628	0.03208	0.00036	0.01019	0.00013	198.2	76.53	203.2	5.22	203.6	2.26	204.9	2.59
PJB-11-23	<1.17	171.06	128.47	1.33	0.05435	0.00188	0.23549	0.00689	0.03141	0.00037	0.0101	0.00013	385.6	75.17	214.7	5.66	199.4	2.29	203.1	2.56
PJB-11-24	<1.11	162.15	124.21	1.31	0.04894	0.00157	0.21716	0.00573	0.03217	0.00036	0.00999	0.00012	144.7	73.4	199.5	4.78	204.1	2.23	200.8	2.32
PJB-11-25	<1.13	207.02	179.36	1.15	0.05089	0.00143	0.22109	0.00478	0.0315	0.00034	0.01027	0.00011	235.8	63.58	202.8	3.97	199.9	2.12	206.6	2.28
PJB-11-26	<0.98	215.6	162.16	1.33	0.05068	0.00144	0.22441	0.00492	0.0321	0.00035	0.01047	0.00011	226.2	64.22	205.6	4.08	203.7	2.16	210.6	2.27
PJB-11-27	<1.17	407.42	236.34	1.72	0.05115	0.00136	0.22547	0.00446	0.03196	0.00034	0.01019	0.0001	247.5	60.23	206.5	3.69	202.8	2.12	205	2.06
PJB-11-28	<1.25	164.77	132.17	1.25	0.05127	0.00155	0.22553	0.00545	0.03189	0.00035	0.0103	0.00012	253	67.9	206.5	4.51	202.4	2.21	207.1	2.4
PJB-11-29	<1.29	251.28	192.2	1.31	0.04879	0.00133	0.21626	0.00447	0.03213	0.00034	0.01039	0.00011	137.8	62.92	198.8	3.73	203.9	2.14	209	2.18
PJB-11-30	1.08	444.53	253.99	1.75	0.05202	0.00139	0.22615	0.00451	0.03152	0.00034	0.00996	0.0001	286.5	60.04	207	3.73	200	2.11	200.4	2.06

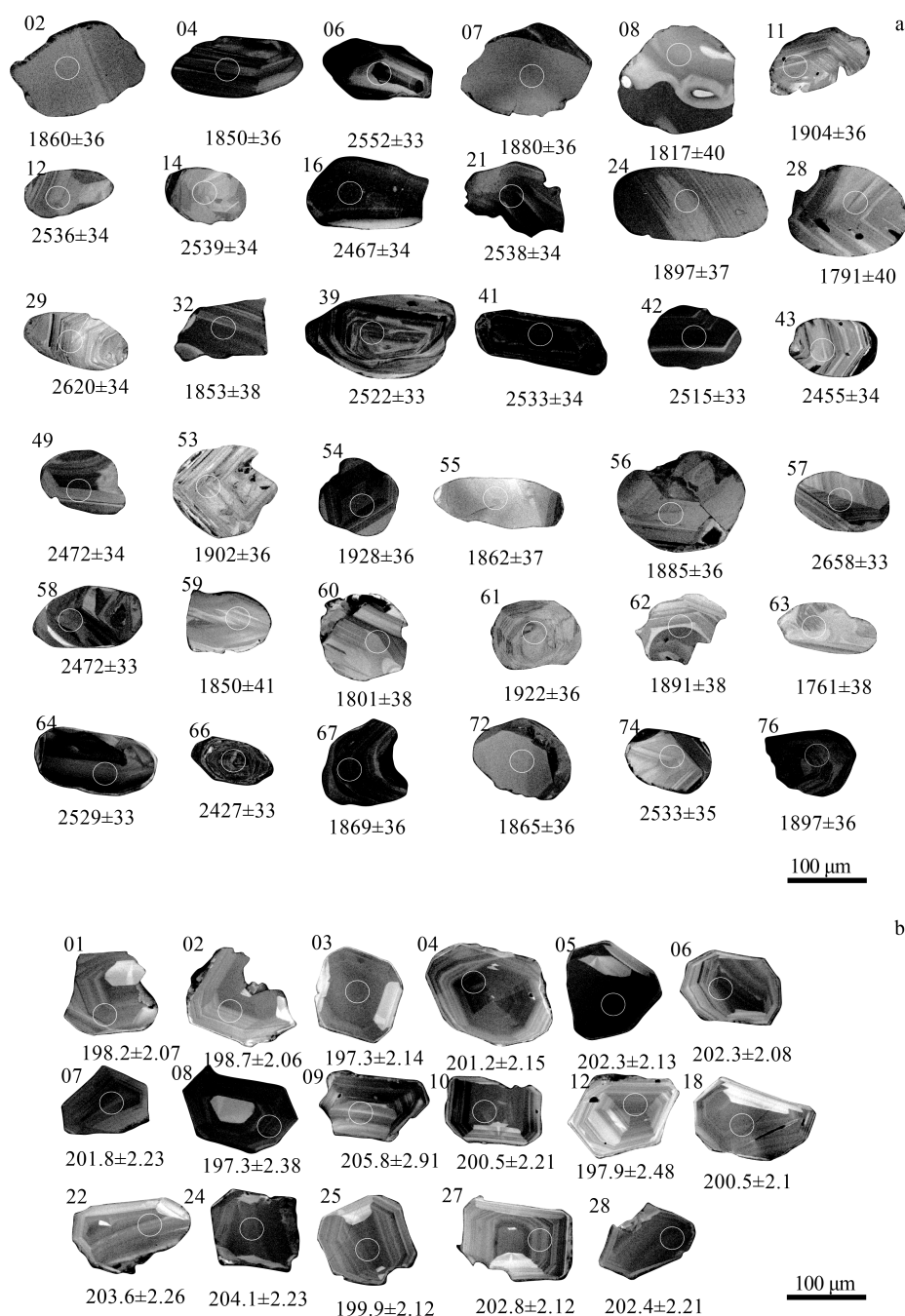


图 2 锆石阴极发光 (CL) 图像 (图中白色圈为束斑大小, 年龄单位为 Ma)

Fig. 2 Cathodoluminescence images of the zircons

a—大岭堡地区鲕状赤铁矿石锆石; b—庞家堡地区花岗岩脉锆石

1761.2 Ma, 大致限定串岭沟组形成时代应晚于 1761.2 Ma。此外, 前人获得侵入串岭沟组辉绿岩脉和闪长玢岩脉锆石 U-Pb 年龄分别为 1638 ± 14 Ma (高林志等, 2009) 和 1634 ± 9 Ma (张拴宏, 2013), 孙会一等 (2013) 首次获得串岭沟组上部火山凝灰岩

中沉积年龄为 1621 ± 12 Ma, Duan et al. (2018) 获得姜家寨串岭沟组底部砂页岩最年轻碎屑锆石年龄为 1657.4 ± 17.4 Ma, 限定了串岭沟组的形成下限, 暗示形成时代不早于 1657 Ma。Ding et al. (2018) 测得北京十三陵地区串岭沟组底部粉砂质泥岩、细粒

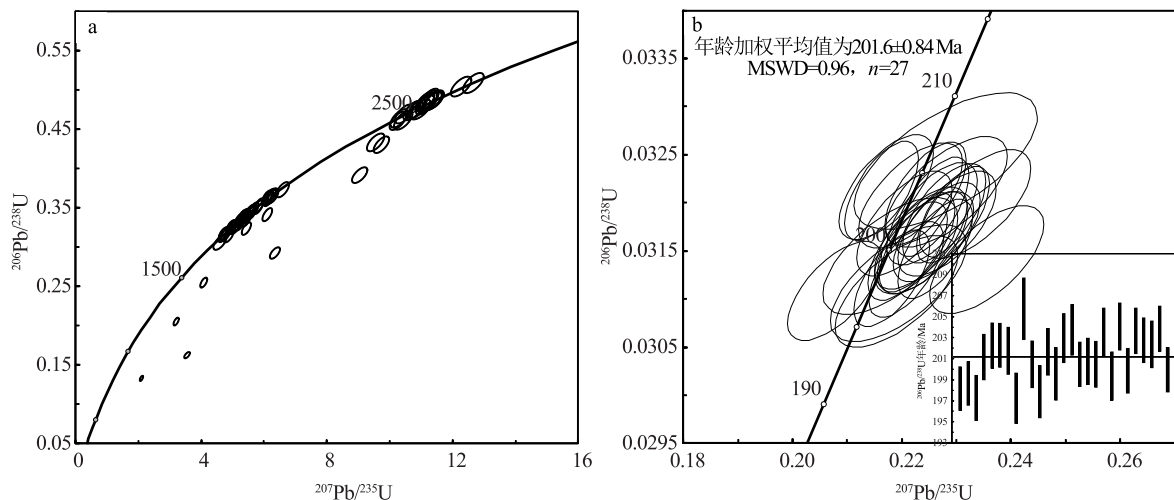


图3 锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 3 Zircon U-Pb concordia diagrams

a—大岭堡鲕状赤铁矿石锆石;b—庞家堡花岗岩脉锆石

砂岩最年轻的锆石年龄为 1673 ± 44 Ma, 表明串岭沟组沉积于该年龄之后。综上所述, 串岭沟组形成于 1650 Ma 左右。

目前普遍认为, 赤铁矿转变为磁铁矿是一个还原反应的过程, 庞家堡地区发育有大量磁铁矿石, 前人推测其可能为受燕山期花岗质岩体侵入热变质形成(刘敏, 1995; 杜汝霖等, 1999; 梁永生, 2019)。例如, 宋瑞先等(2012)提出, 赤铁矿石经历了以岩浆侵入的热力作用为主、热液交代作用为辅的作用, 使处于封闭还原条件的高价铁向低价铁转变, 从而形成磁铁矿石; 刘成维等(2013)认为, 燕山期的岩浆活动为磁铁矿的转变提供了热源, 而其还原剂可能为原铁矿层中由于生物成因保留下来的有机碳; 梁永生(2019)认为, 岩浆岩侵入为磁铁矿的转变提供了必要的温度条件, 赤铁矿石中所含的微量生物有机碳和微粒菱铁矿为反应提供了还原剂。本次对该地区侵入串岭沟组的花岗岩脉开展了 LA-ICP-MS U-Pb 定年研究, 获得其年龄加权平均值为 201.6 ± 0.84 Ma ($n=27$, MSWD=0.96)(图 3-b), 暗示区内花岗岩脉为印支期岩浆侵入的产物, 同时也表明磁铁矿石可能并非前人认为的燕山期的产物。此外, 磁铁矿在成岩过程中通过微生物异化还原和交代作用过程也可形成(Johnson et al., 2008; 杨秀清等, 2020)。因此, 这些磁铁矿成因还需要开展深入研究。

4.2 碎屑锆石源区

宣龙式铁矿可见典型的鲕状和肾状结构, 主要由赤铁矿、石英碎屑、菱铁矿、磁铁矿等组成, 形成于地球平静期(约 1650 Ma)(汤冬杰等, 2015)。本文研究获得的华北克拉通串岭沟组底部鲕状赤铁矿石最主要的年龄峰值为 1873 Ma, 其次为 2530 Ma(图 4-a), 与段超等(2014)获得的姜家寨串岭沟组底部砂页岩碎屑锆石最主要的年龄峰值(图 4-b) 1849 Ma 基本一致。此外, 他们还获得 1774 Ma 和 2453 Ma 两个次峰, 暗示 1870~1850 Ma 物质可能是宣龙地区串岭沟组的主要物质来源, 该年龄与华北克拉通 1850 Ma 左右重要的构造热事件非常吻合。由于该地区海侵方向主要为北西向和北东向(图 1-a), 笔者推测碎屑锆石源区主要来自宣龙地区南部的华北克拉通。

Ding et al.(2018)获得的北京十三陵串岭沟组底部粉砂岩、白云岩碎屑锆石年龄谱(图 4-c)显示一个主峰在 2500 Ma 左右, 一个次峰为 2000 Ma, 表明该地区串岭沟组与宣龙地区串岭沟组的主要物质源区略有差异。但是, 2500 Ma 碎屑锆石峰值在宣龙地区串岭沟组也可见到。前人研究表明, 华北克拉通在 2500 Ma 发育广泛的岩浆活动和陆壳增生(万渝生等, 2015), 表明 2500 Ma 碎屑锆石主要来自华北克拉通新太古代结晶基底。上述碎屑锆石年龄表明, 串岭沟组最主要的物质源区为约 1850 Ma 和

2500 Ma 的岩石,但是不同地区物质源区贡献略有差异。

4.3 Columbia 超大陆裂解与宣龙式铁矿的形成

华北克拉通是全球最古老的克拉通之一,前人研究表明,在太古宙晚期,华北克拉通存在强烈的碰撞造山作用,不同古老陆块相互碰撞拼合完成克拉通化,形成稳定的古陆。华北克拉通 1.95~1.82

Ga 发生陆内造山,即克拉通再造 (Kusky et al., 2003; 2009),本次获得的碎屑锆石 U-Pb 年龄有效记录了上述 2 次重要的构造热事件。华北克拉通在 1850~1700 Ma 进入伸展构造体制 (翟明国等, 2007),内部及边部发生了拉张、抬升等地质事件,以富镁基性岩墙、斜长岩-辉长岩-纹长二长岩-环斑花岗岩及 A 型花岗岩和富钾火山岩广泛发育为特征,形成时代集中于 1800~1600 Ma,对应于古元古代末—中元古代初 Columbia 全球性的非造山岩浆活动,是一次超大陆裂解事件 (翟明国, 2004; 2012)。进入中元古代后,华北克拉通才成为真正的沉积盖层演化阶段。华北克拉通北部的燕辽裂陷槽,主要由长城系、蓟县系、待建系和青白口系组成 (翟明国, 2011)。诸多学者研究表明,宣龙式铁矿成矿物质主要来自海底热液,而并非来自大陆物质风化作用,认为其是华北克拉通响应 Columbia 超大陆裂解的产物 (Lin et al., 2015; 汤冬杰等, 2015)。新元古代铁建造的形成也与罗迪尼亚超大陆裂解密切相关 (Cox et al., 2013; Xu et al., 2014; 杨秀清等, 2020)。据此认为,华北克拉通在 1650 Ma 左右 Columbia 超大陆发生裂解,同时伴随强烈的海底热液活动,海底热液活动不仅提供了大量的铁质,同时提供了 H_2 、 H_2S 、 SO_2 、CO 和 Mn(II),改变海洋的氧化还原状态,有利于铁质大量聚集沉淀,形成宣龙式铁矿 (Cox et al., 2013; Bekker et al., 2014)。

5 结 论

(1) 大岭堡铁矿床鲕状赤铁矿石碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄可见 2 组主要的峰值年龄,分别为 1873 Ma 和 2530 Ma,记录了华北克拉通经历的 2 期重要构造热事件的时间。

(2) 通过与前人研究对比,宣龙地区串岭沟组鲕状赤铁矿石与底部砂页岩中碎屑锆石源区基本一致,但与北京十三陵地区串岭沟组粉砂岩、白云岩略有区别。

(3) 串岭沟组的花岗岩脉形成时代为 202.3 ± 1.4 Ma,暗示串岭沟组磁铁矿可能并非前人认为的燕山期产物,其成因需要进一步研究。

(4) 1650 Ma 左右 Columbia 超大陆裂解伴随的强烈海底热液活动可能有利于宣龙式铁矿的形成。

致谢: 审稿专家提出诸多宝贵的意见和建议,西北大学大陆动力学国家重点实验室在分析测试

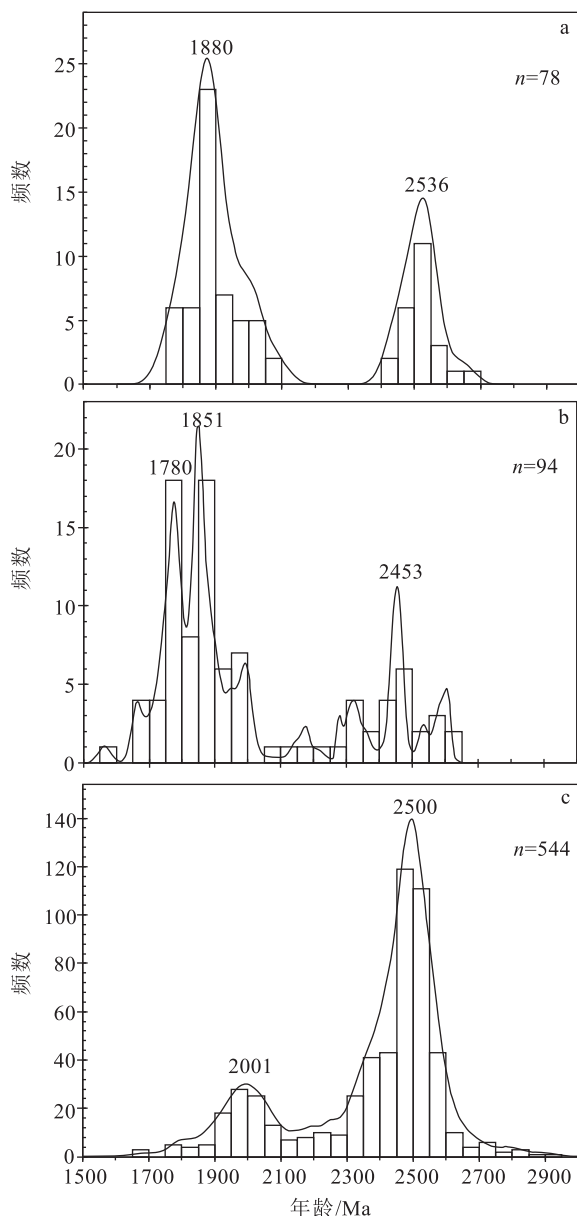


图 4 串岭沟组锆石 U-Pb 年龄概率分布

Fig. 4 Probability density map of U-Pb ages of zircons from the Chuanlinggou Formation

a—串岭沟组底部鲕状赤铁矿石 (宣龙地区); b—串岭沟组底部砂页岩 (宣龙地区, 段超等, 2014); c—北京十三陵地区串岭沟组底部粉砂岩、白云岩 (Ding et al., 2018)

过程中给予帮助,参加野外工作的还有长安大学本科生马辉,在此一并表示感谢。

参考文献

- Bekker A, Planavsky N, Krapež B, et al. Iron formations: their origins and implications for ancient seawater chemistry [J]. Elsevier, 2014, 9: 561–628.
- Canfield D E. A new model for Proterozoic ocean chemistry [J]. Nature, 1998, 396: 450–453.
- Cox G M, Halverson G P, Minarik W G, et al. Neoproterozoic iron formation: An evaluation of its temporal, environmental and tectonic significance [J]. Chemical Geology, 2013, 362: 232–249.
- Ding J, Shi Y, Kröner A, et al. Constraints on sedimentary ages of the Chuanlinggou formation in the Ming Tombs, Beijing, North China Craton: LA – ICP – MS and SHRIMP U – Pb dating of detrital zircons [J]. Acta Geochimica, 2018, 37: 1–24.
- Duan C, Li Y H, Yang Y, et al. U–Pb ages and Hf isotopes of detrital zircon grains from the Mesoproterozoic Chuanlinggou Formation in North China Craton: Implications for the geochronology of sedimentary iron deposits and crustal evolution [J]. Minerals, 2018, 8: 547.
- Holland H. The chemical evolution of the atmosphere and oceans [M]. New York, Princeton University Press, 1984: 582.
- Hoskin P W, Schaltegger U. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis [J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2003, 53(1): 27–62.
- Johnson C M, Beard B L, Klein C, et al. Iron isotopes constrain biogenic and abiogenic processes in banded iron formation genesis [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2008, 72: 151–169.
- Konhäuser K O, Planavsky N J, Hardisty D S, et al. Iron formations: a global record of Neoarchean to Palaeoproterozoic environmental history [J]. Earth–Science Reviews, 2017, 172: 140–177.
- Kusky T M, Li J. Paleoproterozoic tectonic evolution of the North China Craton [J]. Journal of Asian Earth Science, 2003, 22(4): 383–397.
- Kusky T M, Santosh M. The Columbia connection in North China [J]. Geological Society London Special Publications, 2009, 323(1): 49–71.
- Lin Y T, Tang D J, Shi X Y, et al. Shallow–marine ironstones formed by microaerophilic iron–oxidizing bacteria in terminal Paleoproterozoic [J]. Gondwana Research, 2019, 76: 1–18.
- Lu S N, Zhao G C, Wang H M, et al. Precambrian metamorphic basement and sedimentary cover of the North China Craton: A review [J]. Precambrian Research, 2008, 160(1/2): 77–93.
- Rahiminejad A H, Zand – Moghadam H. Synsedimentary formation of ooidal iron stone: An example from the Jurassic deposits of SE central Iran [J]. Ore Geology Reviews, 2018, 95: 238–257.
- Ramanaidou E R, Wells M A. 13. 13–sedimentary hosted iron ores [J]. Treatise on Geochemistry, 2014, 13: 313–355.
- Van Houten F B, Arthur M A. Temporal patterns among Phanerozoic oolitic ironstones and oceanic anoxia [J]. Geological Society Special Publication, 1989, 46: 33–49.
- Xu D R, Wang Z L, Chen H Y, et al. Petrography and geochemistry of the Shilu Fe–Co–Cu ore district, South China: Implications for the origin of a Neoproterozoic BIF system [J]. Ore Geology Reviews, 2014, 57: 322–350.
- Young T P. Phanerozoic ironstones: an introduction and review [C]// Young T P, Taylor W E G. Phanerozoic Ironstones. Special Publication, Geological Society of London, 1989, 46: ix–xxv.
- Yuan H L, Gao S, Dai M N et al. Simultaneous determinations of U–Pb age, Hf isotopes and trace element compositions of zircon by excimer laser ablation quadrupole and multiple collector ICP–MS [J]. Chemical Geology, 2008, 247: 100–117.
- Zhai M G, Bian A G, Zhao T P. The amalgamation of the supercontinent of North China Craton at the end of Neo–Archean and its breakup during late Palaeoproterozoic and Meso – Proterozoic [J]. Science in China (Series D), 2000, 30(S1): 219–232.
- 陈志明, 于洁, 侯奎. 冀西北宣龙地区菱铁矿的成因 [J]. 地质科学, 1982, 4: 395–420.
- 戴永定, 宋海明, 沈继英. 河北宣龙铁矿物化石细菌 [J]. 中国科学(D 辑), 2003, 33(8): 751–759.
- 杜汝霖, 胡华斌, 刘志礼, 等. 冀西北长城系宣龙式铁矿生物成矿作用 [M]. 北京: 科学出版社, 1999: 1–160.
- 段超, 李延河, 魏明辉, 等. 河北宣化姜家寨铁矿床串岭沟组底部碎屑锆石 LA–MC–ICP–MS U–Pb 年龄及其地质意义 [J]. 岩石学报, 2014, 30(1): 35–48.
- 高林志, 张传恒, 刘鹏举, 等. 华北—江南地区中、新元古代地层格架的再认识 [J]. 地球学报, 2009, 30(4): 433–446.
- 高维, 张传恒, 高林志, 等. 北京密云环斑花岗岩的锆石 SHRIMP U–Pb 年龄及其构造意义 [J]. 地质通报, 2008, 27(6): 793–798.
- 和政军, 牛宝贵, 张新元, 等. 北京密云元古宙常州沟组之下环斑花岗岩古风化壳岩石的发现及其碎屑锆石年龄 [J]. 地质通报, 2011, 30(5): 798–802.
- 李厚民, 陈毓川, 李立兴, 等. 中国铁矿成矿规律 [M]. 北京: 地质出版社, 2012: 1–246.
- 李怀坤, 苏文博, 周红英, 等. 华北克拉通北部长城系底界年龄小于 1670Ma: 来自北京密云花岗斑岩岩脉锆石 LA–MC–ICPMS U–Pb 年龄的约束 [J]. 地学前缘, 2011, 18(3): 108–120.
- 李延河, 侯可军, 万德芳, 等. Algoma 型和 Superior 型硅铁建造地球化学对比研究 [J]. 岩石学报, 2012, 28(11): 3513–3519.
- 李志红, 朱祥坤. 河北省宣龙式铁矿的地球化学特征及其地质意义 [J]. 岩石学报, 2012, 28(9): 2903–2911.
- 梁永生. 冀西北宣龙式铁矿中磁铁矿特征及成生机制 [D]. 中国地质大学(北京) 硕士学位论文, 2019: 1–71.
- 廖士范, 魏梁鸿, 刘成德, 等. 中国泥盆纪鲕铁石沉积环境、成因 [J]. 沉积学报, 1993, 11(1): 93–102.
- 刘成维, 杨云, 谷振飞, 等. 河北陈家窑磁铁矿成因探讨 [J]. 矿产勘查, 2013, 4(5): 519–524.
- 刘敏. 宣龙铁矿地质地球化学特征及成因探讨 [D]. 中国科学院地质研究所博士学位论文, 1995: 1–104.
- 陆松年, 李惠民. 蓟县长城系大红峪组火山岩的单颗粒锆石 U–Pb 法

- 准确定年[J].中国地质科学院院报,1991,22(1): 137-146.
- 乔秀夫.中朝板块元古宙板内地震带与盆地格局[J].地学前缘,2002, (3): 141-149.
- 宋瑞先,魏明辉,王金锁,等.张家口地质·矿产[M].北京:地质出版社,2012: 218-221.
- 孙会一,高林志,包创,等.河北宽城中元古代串岭沟组凝灰岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J].地质学报,2013,87(4): 591-596.
- 汤冬杰,史晓颖,刘典波,等.华北古元古代末鲕铁岩: Columbia 超大陆裂解初期的沉积响应[J].地球科学——中国地质大学学报, 2015,40(2): 290-304.
- 万渝生,董春艳,颜炳强,等.华北克拉通太古宙研究若干进展[J].地球学报,2015,36(6): 685-700.
- 阎玉忠,刘志礼.中国北方燕山盆地长城纪生物群落和古环境关系探讨[J].微体古生物学报,1998,3: 29-46.
- 杨秀清,毛景文,张作衡,等.条带状铁建造: 特征、成因及其对地球环境的制约[J].矿床地质,2020,39(4): 697-727.
- 翟明国.华北克拉通 2.1~1.7Ga 地质事件群的分解和构造意义探讨[J].岩石学报,2004,20(6): 1343-1354.
- 翟明国,彭澎.华北克拉通古元古代构造事件[J].岩石学报,2007,11: 2665-2682.
- 翟明国.克拉通化与华北陆块的形成[J].中国科学: 地球科学,2011,41 (8): 1037-1046.
- 翟明国.华北克拉通的形成以及早期板块构造[J].地质学报,2012,86 (9): 1335-1349.
- 翟裕生,姚书振,蔡克勤.矿床学[M].北京:地质出版社,2011: 248-290.
- 张连昌,翟明国,万渝生,等.华北克拉通前寒武纪铁建造铁矿研究: 进展与问题[J].岩石学报,2012,28(11): 3431-3445.
- 张拴宏,赵越,叶浩,等.燕辽地区长城系串岭沟组及团山子组沉积时代的新制约[J].岩石学报,2013,29(7): 2481-2490.
- 赵一鸣,毕承思.宁乡式沉积铁矿床的时空分布和演化[J].矿床地质, 2020,19(4): 350-362.

《地质通报》第 42 卷第 2-3 期要目预告

国际水力压裂与地震关系研究进展及地质工作建议	王尧等
大兴安岭南段幸福之路组新认识及区域对比	郑月娟等
内蒙古锡林浩特宝力根地区哲斯腕足动物群的发现及其地质意义	韦一等
内蒙古满都拉地区蛇绿混杂岩碎屑锆石 U-Pb 年龄及其地质意义	许立权等
西藏昂仁县孔隆地区下拉组时代修订及其地质意义	李俊等
滇西就康地区芒汇河组的厘定:来自锆石 U-Pb 年龄和双壳化石的证据	罗亮等
冈底斯构造带西段班布勒铅锌铜矿床的剥露和保存:来自裂变径迹热年代学的证据	张培烈等
西准噶尔谢米斯台山中段晚石炭世 A 型花岗岩年代学、Hf 同位素、岩石地球化学特征及构造意义	舍建忠等
滇中老街子 Pb-Ag 矿床富碱岩脉岩石学、时空结构及其地质意义	黄仲金等
滇东-黔西地区早石炭世岩关阶晚期-大塘阶早期沉积环境及古地理格局	陈榕等
冀中坳陷 HS1 钻孔沉积物粒度及其沉积环境	东王刚等
永定河流域新生代地层岩相特征地震识别研究	王小江等
甘肃龙首山地区古生代岩浆核杂岩隆起:来自金川矿区脉岩年代学与地球化学的证据	张钊等
陕南地区埃迪卡拉纪陡山沱组下部海绿石的成因机制及古环境意义	刘宇晨等
松辽盆地西缘兴安盟索伦地区中侏罗统万宝组孢粉组合及其古气候	施璐等
漠河盆地西段洛古河泥岩的地质特征及时代	徐建鑫等
基于熵权优化法的地下空间资源地质适宜性评价	郭骏瀚等
三塘湖盆地芦草沟组混积岩型致密油形成条件与富集因素	方向等
尼泊尔基本石油地质条件分析	王正和等
北秦岭华阳川地区铀矿物质来源	张熊猫等
模糊层次分析法在陕西洛南水草坪金矿区构造地球化学找矿中的应用	黄大正等
张家口市某种植区土壤营养元素生态化学计量与空间分异特征	安永龙等
甘肃临夏盆地韩集北山滑坡群致灾特征与稳定性评价	汪美华等
基于 XR 技术的交互式地质场景模型构建方法	洪韬等
免像控无人机技术在矿山地貌形态调查中的应用	袁新悦等