

doi:10.3799/dqkx.2010.112

辽宁后仙峪硼矿区古元古代电气石岩： 锆石特征及 SHRIMP 定年

张艳飞^{1,2}, 刘敬党^{1,2}, 肖荣阁³, 王生志², 王瑾², 包德军²

1. 辽宁工程技术大学, 辽宁阜新 123000

2. 辽宁省化工地质勘查院, 辽宁锦州 121000

3. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

摘要:为了确定辽东硼矿含硼岩系中电气石岩的形成时代,对后仙峪硼矿区电气石岩首次进行了锆石 SHRIMP U-Pb 年龄测年。阴极发光图像显示,锆石具核一边结构,锆石核部多具振荡环带,为高 Th/U 值的岩浆碎屑锆石;锆石边部无明显结构变化,为变质成因。岩浆碎屑锆石和变质锆石的年龄分别为 2 171~2 175 Ma 和 1 894~1 906 Ma。结合野外地质和岩相学研究,认为后仙峪硼矿区电气石岩原岩为古元古代克拉通裂谷环境中源于地壳再循环组分混染的亏损地幔的中酸性岩浆活动引发海底喷流作用的产物,其原岩形成时代为古元古代中期(2 171~2 175 Ma),并在稍后(1 894~1 906 Ma)遭受变质作用叠加改造。

关键词:电气石岩;SHRIMP;后仙峪硼矿区;古元古代;地质年代。

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2010)06-0985-15

收稿日期: 2010-05-15

The Hyalotourmalites of Houxianyu Borate Deposit in Eastern Liaoning: Zircon Features and SHRIMP Dating

ZHANG Yanfei^{1,2}, LIU Jing-dang^{1,2}, XIAO Rong-ge³, WANG Sheng-zhi², WANG Jin², BAO De-jun²

1. Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China

2. Liaoning Geological Survey for Chemical Industry, Jinzhou 121000, China

3. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract: SHRIMP zircon U-Pb dating results are firstly reported for the hyalotourmalites in Houxianyu borate deposit in order to determine its formation time. The zircons commonly have core-rim structures. Most cores show oscillatory zoning in CL and plane polarized light images, suggesting a magmatic detrital origin. The zircon without distinct structural change may represent a metamorphic origin. Magmatic detrital zircons and metamorphic zircons from three samples yield ages of 2 171–2 175 Ma and 1 894–1 906 Ma, respectively. Combined with geology and lithology, the protolith of hyalotourmalite is concluded to be the product of exhalation of submarine hot water caused by the magmatic activity with the magma derived from the depleted mantle source with crustal contamination in the cratonic rift environment, which occurred in the middle Palaeoproterozoic (2 171–2 175 Ma) and underwent the late metamorphism during a period of 1 894–1 906 Ma.

Key words: hyalotourmalite; SHRIMP dating; Houxianyu boron deposit; Palaeoproterozoic; geochronology.

电气石岩以其独特的矿物学、地球化学性质和分布规律,促使不少地质学家注意到其对于成岩成矿环境的重要指示意义,特别是对于多金属硫化物矿床成岩成矿的指示意义。近年来部分学者对硼矿床内电气石岩进行了深入的研究,认为电气石岩的出现是蒸发

岩存在的证据(彭齐鸣和许虹, 1994; Xu *et al.*, 2004);而多数人则认为电气石岩是热水沉积成因(邹日和冯本智, 1993, 1995; 刘敬党等, 2007; 李雪梅等, 2008)。辽东硼矿床中普遍发育电气石岩,并且其与硼矿体空间上的密切关系已被普遍认同。然而,这些矿

床中电气石岩的成因乃至硼矿床成因一直是这一地区前寒武纪地质研究的焦点之一(王翠芝等, 2008a), 由于缺乏深入的年代学研究工作, 这一问题一直存在着争议。辽宁省大石桥后仙峪硼矿床是辽东硼矿带具有代表性的矿床, 矿区内电气石岩分布广泛, 电气石岩与硼矿体之间存在着密切的时空关系。笔者对本矿区含硼岩系的电气石岩进行了野外地质、岩相学、锆石特征及年代学研究, 为阐明本地区古元古代时期构造热事件及其演化提供了新的资料, 并对电气石岩以及硼矿床的形成和演化机理进行了讨论。

1 地质背景

后仙峪硼矿区位于辽宁大石桥市南东 50 km 处, 华北地台辽宁台背斜营口—宽甸古隆起西端, 为辽东—吉南硼矿带的一部分。矿区出露地层为早元古代辽河群里尔峪岩组, 该岩组分 3 个岩性段, 即下部混合岩段, 主要为条痕状角山混合岩; 中部变粒岩段,

为(电气石)黑云变粒岩和电气石岩, 该岩段内夹有蛇纹石化超镁橄榄岩和菱镁矿大理岩, 是硼矿体赋存岩段; 上部浅粒岩段, 为含电气石的钠长浅粒岩。

矿区片麻状混合花岗岩较多, 主要分布在矿区东南部, 与里尔峪岩组地层界线模糊, 系里尔峪岩组变质围岩选择重熔交代的产物(张艳飞等, 2009), 但形成时代不清。矿区中部发育伟晶岩, 虽然缺乏具体同位素年龄, 但根据产出关系普遍认为其形成时代晚于片麻状混合花岗岩。除第四系沉积物外, 矿区地质体多被北西向的闪长玢岩或闪长岩脉侵入、切穿。受虎皮峪—翁泉沟—红石砬子复背斜的次一级构造(后仙峪背斜和冯家堡向斜)控制(王翠芝等, 2006), 矿区地层在平面上呈“W”形展布(图 1), 矿区内断裂构造较为发育, 主要呈北西向, 并切穿矿体。

硼矿体呈层状、似层状和透镜状产于蛇纹石化镁橄榄岩和菱镁矿大理岩中, 部分矿体与含硼岩石建造构成紧密同斜褶皱, 或伏于片麻状花岗岩之下。矿体产状与镁橄榄岩、菱镁矿大理岩基本一致, 但走

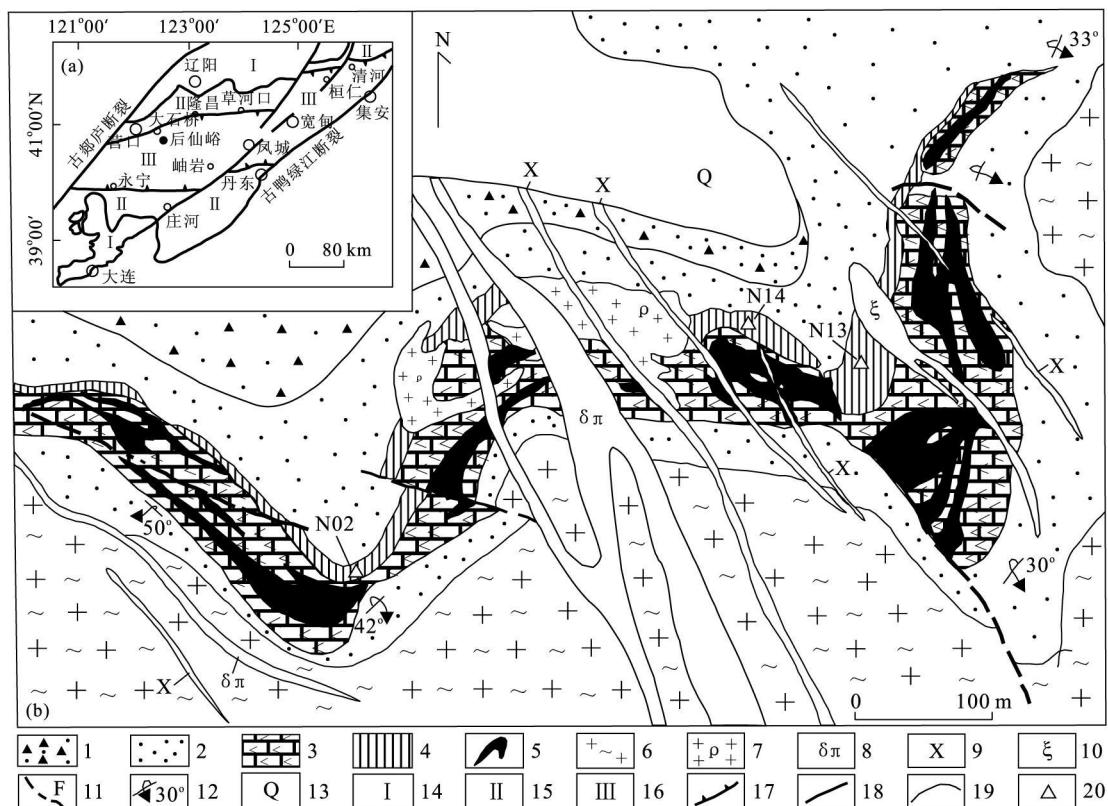


图 1 后仙峪硼矿床地质略图(据黄作良等(1996)修改)

Fig. 1 Geological map of the Houxianyu boron deposit

1. 古元古界电气石变粒岩夹黑云变粒岩; 2. 古元古界黑云变粒岩; 3. 古元古界蛇纹石化镁橄榄岩及镁质大理岩; 4. 古元古界电英岩; 5. 硼矿体; 6. 片麻状花岗岩; 7. 伟晶岩; 8. 闪长玢岩; 9. 斜长煌斑岩; 10. 闪长岩; 11. 推测断层; 12. 地层产状; 13. 第四系; 14. 太古宙古陆; 15. 裂谷斜坡区; 16. 裂谷中央凹陷区; 17. 控制裂谷的深大断裂; 18. 古断裂; 19. 地质界线; 20. 取样位置

向或倾向上均有分叉、复合、收缩和膨大现象(图1).其中,电气石岩主要分布在矿体的顶、底板,空间上与硼矿体紧密伴生,局部可见厚达几十米的电气石岩与变粒岩互层,构成明显的条带状、纹层状构造,区域上层位稳定.

2 分析方法

在野外详细地质调查和显微镜观察的基础上,对3件岩石样品进行了锆石U-Pb同位素年代学的测定.每个样品分选出的锆石在双目显微镜下挑选出晶形较完好、纯净透明的颗粒进行测试.将待测的锆石与标样(TEM, 用于校正年龄, 其年龄为417 Ma)一起用环氧树脂包埋制成圆形的靶,然后把锆石抛光至一半.样品靶制好后先进行透射和反射光下的显微照相,然后在中国地质科学院矿产资源研究所进行阴极发光(CL)照相,以确定锆石颗粒的内部结构及适合分析的锆石颗粒与位置供SHRIMP测定.锆石的U、Th和Pb同位素组成分析在北京离子探针中心SHRIMP II离子探针上进

行.详细的分析流程和原理可参见Williams(1998)、宋彪等(2002)和万渝生等(2004)的文献.应用M257(年龄561 Ma,²³⁸U含量840 μg/g)(Nasdala *et al.*, 2008)标定样品的U、Th含量.每分析3~4个待测锆石点,然后分析一次标样TEM,对锆石标样TEM的U/Pb比值分析偏差为0.5%~1.9%(1σ).采用年龄为²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb年龄(对年轻锆石(<1000 Ma)均使用²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄),其加权平均值为95%的置信度.年龄计算中,普通铅校正采用²⁰⁴Pb直接测定法(Compston *et al.*, 1984),年龄置信度为 1σ (95%置信水平).数据处理采用SQUID1.02和ISOPLOT3.0程序(Ludwig, 2001, 2003).

3 岩相学和地球化学

本文3件样品(N13、N14、N02)采自后仙峪硼矿501号矿段矿体的顶板.电气石岩样品呈黑灰—黑色,具有完好的条带(纹)状构造.黑白相间的条带(纹)是由于石英和电气石含量变化所致.条带一般宽0.5~5 cm,最宽可达10 cm(图2a).当电气石含

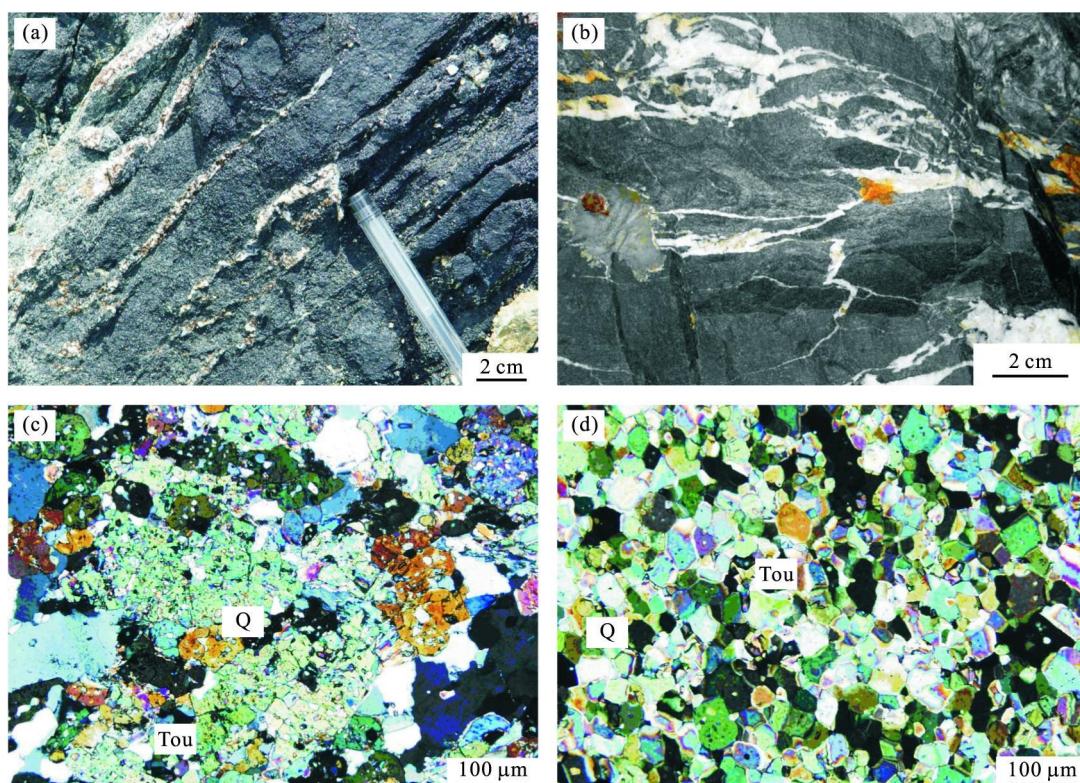


图2 电气石岩的宏观和微观构造特点

Fig. 2 Tectonites in the hyalotourmalites at different scales

a.条带(纹)状电气石岩;b.厚层状电气石岩被石英细脉切割;c.电气石岩中较自形的电气石颗粒;d.电气石岩中电气石的筛状结构;Tou·电气石;Q·石英

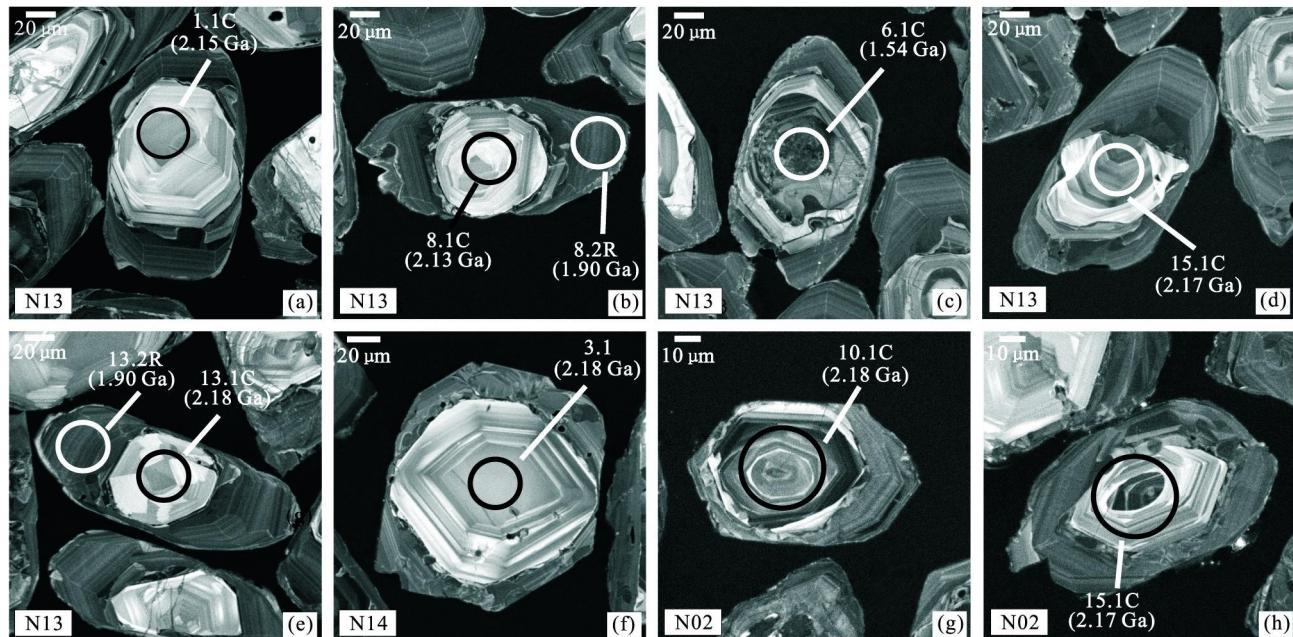


图 3 后仙峪硼矿区电气石岩(N13、N14、N02)的锆石阴极发光照片

Fig. 3 Cathodoluminescence images of zircons from hyalotourmalite (N13, N14, N02) in Houxianyu borate deposit

图中椭圆($\sim 30 \mu\text{m}$)为锆石 SHRIMP U-Pb 测年位置, 其编号与表 1 中一致

量较高时, 岩石基本呈黑色块状构造, 含少量石英的断续条带(纹), 局部见石英细脉切割电气石岩(图 2b). 岩石主要由电气石和石英组成, 电气石含量为 45%~80%, 两者之和大于 90%. 此外含少量微斜长石、钠长石、透闪石和黑云母等, 但不同位置样品的矿物组合和含量有所不同. 这种差别可能与不同位置围岩的同化混染强度变化有关.

电气石岩粒度一般为细粒(0.5~1.0 mm), 镜下电气石和石英之间、石英和石英之间夹角多为 120°, 呈典型的粒状变晶结构(图 2c), 说明电气石岩局部发生了静态重结晶. 局部出现筛状变晶结构(图 2d), 即电气石晶体中包含微晶石英, 也有少量长石. 越靠近矿体的位置电气石晶体越大、越自形、环带越发育(薛建玲等, 2006). 刘敬党等(2007)和李雪梅等(2008)对该区电气石岩进行了地球化学研究. 常量元素组成与沙利文矿山富硼硅质岩相似. 微量元素明显亏损 V、Cr、Co 和 Ni, 而反映喷气作用的元素 B 和 Sn 含量十分高, 表明原岩是与钙碱性火山活动有关的喷气作用的产物. 稀土元素总量较低, 配分曲线总体向右倾斜, 具 Ce 和 Eu 负异常, La/Yb 比值低, 稀土元素总体特征与元古代以来的化学沉积物相似, 也说明它是在海水参与下, 以化学沉积方式形成的热水沉积岩.

4 锆石特征和测试结果

4.1 中粗粒电气石岩(N13)

阴极发光图像显示, 锆石颗粒大小不一, 粒径变化范围为 50~120 μm , 长宽比为 1:1~4:1. 所测锆石大体可分为 2 种类型, 即长柱状和短柱状, 晶棱多有圆滑, 前者多以长柱状自形晶(或半自形晶)形式出现; 后者多呈短柱状(或椭圆状)半自形晶或他形晶产出. 锆石 CL 图像显示, 大部分锆石具有明显的核一边结构(图 3). 核部锆石 CL 较亮, 大多具有明显的韵律环带(图 3a, 3b, 3d), 个别出现扇形分带结构(图 3e), 带有不同程度的模糊和亮化, 阴极发光下为灰—浅灰色, 其形成与岩浆活动有关(Paterson *et al.*, 1992; Pidgeon *et al.*, 1998), 为岩浆结晶成因的碎屑锆石. 锆石核部具有不规则的港湾状, 指示它们形成后经历了后期变质作用的改造. 边部锆石 CL 呈深灰色, 与原岩残留锆石之间有明显的生长界限, 部分可见边部变质特征的锆石区域切割核部锆石的微弱环带(图 3d)(Pidgeon *et al.*, 1998; Hoskin and Black, 2000), 具有变质增生锆石的特点(吴元保和郑永飞, 2004).

笔者共在 19 颗锆石上测了 35 个数据点. 内核锆石 19 个数据点分析显示, U、Th 含量分别为 $(123\sim 944) \times 10^{-6}$, 平均值为 287×10^{-6} 和 $(67\sim$

表1 后仙峪矿区电气石岩锆石SHRIMP U-Pb年龄测定结果
Table 1 SHRIMP U-Pb isotope data for zircons from hyalotourmalite in Houxianyu borate deposit

样点	$^{208}\text{Pb}_{\text{e}}(\%)$	$\text{U}(10^{-6})$	$\text{Th}(10^{-6})$	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}^*(10^{-6})$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}$	不和谐度 (%)	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$\pm\%$	相关误差
中粗粒电气石岩(N13)													
1.1C	0.08	138	77	0.57	47.1	2 152±28	2 154±13	0	0.134 25	0.73	7.340	1.7	0.899
2.1C	0.05	814	274	0.35	241.0	1 906±23	2 055±5.7	7	0.126 88	0.32	6.017	1.4	0.974
2.2R	0.03	587	14	0.02	168.0	1 859±24	1 910±7.2	3	0.116 99	0.40	5.391	1.6	0.967
2.3R	0.01	496	25	0.05	148.0	1 921±25	1 902±12	-1	0.116 42	0.65	5.572	1.6	0.916
3.1C	0.17	167	84	0.52	57.8	2 177±28	2 163±13	-1	0.134 88	0.72	7.470	1.7	0.401 7
3.2R	0.01	492	18	0.04	132.0	1 756±22	1 902±8.2	8	0.116 45	0.45	5.028	1.5	0.901
4.1C	0.03	306	182	0.61	101.0	2 094±26	2 177±8.5	4	0.136 07	0.49	7.200	1.5	0.553
4.2R	0.05	474	23	0.05	139.0	1 885±23	1 893±8.3	0	0.115 86	0.46	5.460	1.5	0.947
5.1C	0.01	180	90	0.51	61.3	2 150±28	2 179±11	1	0.136 13	0.64	7.430	1.6	0.920
6.1C	0.07	944	123	0.13	145.0	1 060±21	1 541±10	31	0.095 65	0.54	2.357	2.2	0.970
7.1C	0.04	298	148	0.51	103.0	2 178±27	2 179±8.2	0	0.136 20	0.47	7.550	1.5	0.402 0
7.2R	0.04	602	17	0.03	185.0	1 973±24	1 918±7.0	-3	0.117 49	0.39	5.800	1.5	0.358 0
8.1C	0.06	129	86	0.69	45.9	2 230±29	2 173±13	-3	0.135 73	0.72	7.740	1.7	0.413 4
8.2R	0.01	537	29	0.06	155.0	1 873±23	1 897±7.5	1	0.116 13	0.42	5.400	1.5	0.337 2
9.1C	0.03	346	270	0.81	122.0	2 213±28	2 169±7.6	-2	0.135 43	0.43	7.650	1.6	0.409 5
9.2R	0.03	562	30	0.06	171.0	1 954±24	1 912±7.4	-2	0.117 08	0.41	5.717	1.5	0.354 1
10.1C	0.04	159	88	0.57	58.8	2 302±31	2 199±11	-5	0.137 76	0.63	8.150	1.7	0.429 3
10.2R	0.03	649	27	0.04	197.0	1 951±47	1 911±6.7	-2	0.117 01	0.37	5.700	2.8	0.353 3
11.1C	0.02	446	223	0.52	158.0	2 229±29	2 178±6.9	-2	0.136 11	0.40	7.750	1.6	0.413 1
11.2R	0.02	467	18	0.04	134.0	1 834±24	1 916±9.4	3	0.117 38	0.53	5.395	1.6	0.333 3
12.1C	0.07	216	125	0.60	73.2	2 142±27	2 163±9.4	1	0.134 95	0.54	7.330	1.6	0.394 1
12.2R	0.01	547	20	0.04	161.0	1 903±23	1 889±7.2	-1	0.115 58	0.40	5.472	1.5	0.343 4
13.1C	0.01	172	99	0.59	58.8	2 156±27	2 182±11	1	0.136 38	0.65	7.470	1.6	0.397 2
13.2R	0.03	475	22	0.05	136.0	1 857±23	1 889±8.2	2	0.116 26	0.46	5.353	1.5	0.333 9
14.1C	0.15	123	67	0.56	42.4	2 165±29	2 164±14	0	0.135 00	0.82	7.430	1.8	0.399 1
14.2R	0.02	534	23	0.04	145.0	1 766±22	1 904±7.6	7	0.116 57	0.42	5.065	1.5	0.315 1
15.1C	0.02	386	154	0.41	135.0	2 201±27	2 172±8.6	-1	0.135 66	0.50	7.610	1.5	0.407 0
16.1C	0.04	198	137	0.72	67.6	2 161±27	2 183±10	1	0.136 51	0.58	7.500	1.6	0.398 3
16.2R	0.01	714	27	0.04	213.0	1 922±23	1 919±6.3	0	0.117 59	0.35	5.633	1.5	0.347 4
17.1C	0.09	138	68	0.51	48.0	2 187±32	2 180±13	0	0.136 27	0.73	7.590	1.9	0.403 8
17.2R	—	484	21	0.05	146.0	1 938±24	1 905±7.6	-2	0.116 63	0.42	5.638	1.5	0.350 6
18.1C	0.00	149	134	0.93	49.6	2 111±30	2 197±13	4	0.137 60	0.74	7.350	1.8	0.387 5
18.2R	0.02	562	30	0.06	156.0	1 801±22	1 900±9.8	5	0.116 34	0.55	5.171	1.5	0.322 3
19.1C	0.06	135	147	1.13	44.1	2 084±28	2 142±13	3	0.133 33	0.73	7.020	1.7	0.381 6
19.2R	0.02	541	18	0.03	147.0	1 776±22	1 887±8.1	6	0.116 10	0.45	5.076	1.5	0.317 1

续表1

样点	206Pb _c (%)	U(10 ⁻⁶)	Th(10 ⁻⁶)	²³² Th/ ²³⁸ U	²⁰⁶ Pb [*] (10 ⁻⁶)	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²³⁸ U	年龄(Ma)	不和谐度 (%)	²⁰⁷ Pb [*] / ²⁰⁶ Pb [*]	±%	²⁰⁷ Pb [*] / ²³⁵ U	±%	²⁰⁶ Pb [*] / ²³⁸ U	±%	相关误差
细粒电气石岩(N14)																
1.1	0.01	397	295	0.77	138.0	2190±27	2183±8.1	0	0.13650	0.46	7.61	1.5	0.4045	1.4	0.952	
2.1	--	387	217	0.58	135.0	2194±27	2142±8.5	-2	0.13332	0.48	7.45	1.5	0.4053	1.4	0.947	
3.1	0.04	132	81	0.64	45.6	2175±31	2182±13	0	0.13638	0.73	7.55	1.8	0.4014	1.7	0.916	
4.1	0.01	314	176	0.58	110.0	2198±27	2167±8.2	-1	0.13524	0.47	7.58	1.5	0.4064	1.4	0.950	
5.1	0.09	257	174	0.70	83.0	2054±27	2153±10	5	0.13412	0.58	6.94	1.7	0.3753	1.6	0.937	
6.1	0.01	133	65	0.51	45.2	2147±28	2166±13	1	0.13514	0.73	7.36	1.7	0.3952	1.5	0.901	
中细粒电气石岩(N02)																
1.1C	0.08	200	81	0.42	65.7	2081±26	2166±11	4	0.13514	0.62	7.10	1.6	0.3810	1.5	0.921	
2.1C	0.13	151	71	0.49	48.7	2058±26	2137±12	4	0.13293	0.69	6.89	1.6	0.3760	1.5	0.906	
3.1C	0.04	354	199	0.58	124.0	2204±27	2168±7.5	-2	0.13532	0.43	7.61	1.5	0.4076	1.4	0.957	
3.2R	0.03	1002	70	0.07	265.0	1732±23	1855±13	7	0.11344	0.70	4.821	1.7	0.3082	1.5	0.909	
4.1C	0.02	2211	683	0.32	755.0	2158±26	2162±3.2	0	0.13489	0.18	7.39	1.4	0.3975	1.4	0.992	
5.1C	0.01	533	306	0.59	185.0	2189±26	2177±6.1	-1	0.13605	0.35	7.59	1.4	0.4044	1.4	0.970	
6.1C	0.00	166	77	0.48	55.7	2121±27	2123±12	0	0.13187	0.66	7.08	1.6	0.3896	1.5	0.914	
7.1C	0.04	407	108	0.27	115.0	1838±23	1970±8.9	7	0.12095	0.50	5.503	1.5	0.3300	1.4	0.944	
6.2R	0.08	667	76	0.12	189.0	1834±22	1888±7.2	3	0.11554	0.40	5.242	1.5	0.3290	1.4	0.961	
7.2R	0.01	1191	61	0.05	349.0	1891±28	1846±13	-2	0.11284	0.73	5.303	1.9	0.3409	1.7	0.921	
8.1C	0.09	166	74	0.46	56.7	2158±35	2184±12	1	0.13653	0.68	7.49	2.0	0.3977	1.9	0.940	
9.1C	0.01	4028	1543	0.40	1280.0	2035±29	2112±2.3	4	0.13110	0.13	6.71	1.7	0.3711	1.7	0.997	
10.1C	0.01	335	242	0.75	120.0	2249±27	2181±7.6	-3	0.13638	0.44	7.85	1.5	0.4175	1.4	0.956	
11.1C	0.02	359	159	0.46	112.0	1997±26	2077±8.1	4	0.12850	0.46	6.43	1.6	0.3630	1.5	0.956	
12.1C	0.02	514	366	0.74	178.0	2181±27	2165±6.3	-1	0.13511	0.36	7.50	1.5	0.4025	1.5	0.971	
13.1C	0.06	268	136	0.52	86.2	2049±26	2062±9.6	1	0.12737	0.54	6.57	1.6	0.3742	1.5	0.937	
14.1C	0.01	911	926	1.05	329.0	2261±27	2185±4.7	-3	0.13667	0.27	7.92	1.5	0.4201	1.4	0.982	
15.1C	0.07	369	197	0.55	127.0	2178±27	2172±7.7	0	0.13567	0.44	7.52	1.5	0.4020	1.5	0.958	
16.1C	0.02	418	203	0.50	126.0	1942±26	2157±10	10	0.13443	0.59	6.51	1.6	0.3515	1.5	0.933	
17.1C	0.08	249	136	0.56	84.3	2142±30	2177±9.5	2	0.13606	0.55	7.39	1.7	0.3941	1.7	0.950	
18.1C	0.02	744	374	0.52	253.0	2153±26	2171±5.4	1	0.13554	0.31	7.41	1.4	0.3965	1.4	0.976	
19.1C	0.12	221	77	0.36	60.8	1791±23	2049±12	13	0.12644	0.68	5.583	1.6	0.3202	1.5	0.905	
19.2R	0.01	525	31	0.06	159.0	1945±24	1901±7.8	-2	0.11636	0.43	5.649	1.5	0.3521	1.4	0.956	
20.1C	0.07	200	93	0.48	62.0	1986±25	2098±11	5	0.12997	0.62	6.47	1.6	0.3608	1.5	0.920	
20.2R	0.08	796	297	0.39	179.0	1500±21	1889±7.6	21	0.11563	0.42	4.175	1.6	0.2619	1.6	0.966	
21.1C	0.03	215	118	0.57	68.2	2028±29	2188±11	7	0.13686	0.62	6.98	1.8	0.3698	1.7	0.937	

注:Pb^{*}代表放射性成因铅,对样品N13和N02;C和R分别代表锆石的核部和边部。

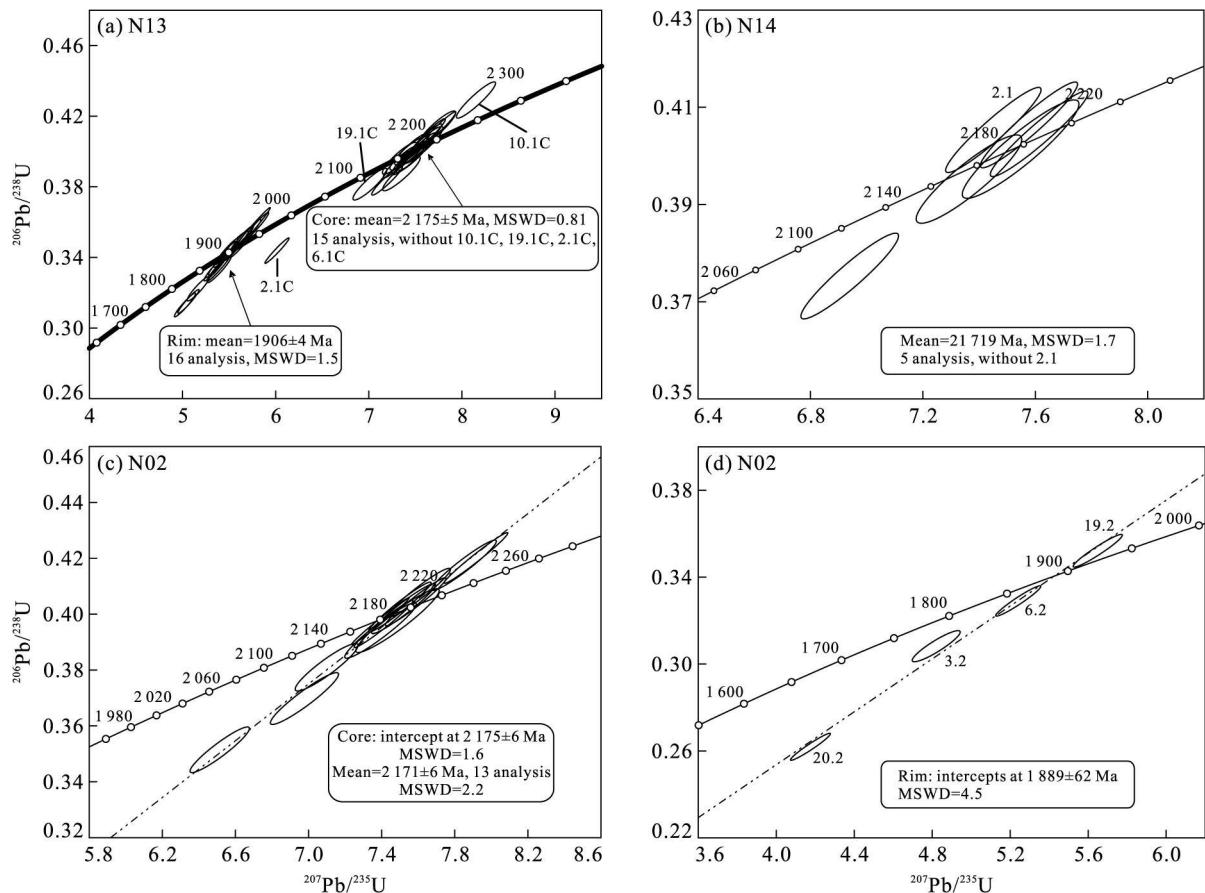


图4 后仙峪硼矿区电气石岩锆石SHRIMP U-Pb年龄谐和图

Fig. 4 Concordia diagrams of SHRIMP U-Pb data for zircons from hyalotourmalites in Houxianyu borate deposit

$274) \times 10^{-6}$, 平均值为 136×10^{-6} . 除了个别分析点的数据外, 大多数分析点的 U 和 Th 含量存在正相关关系. Th/U 值变化范围为 $0.13 \sim 1.13$, 平均值为 0.59(表 1). 除分析点 2.1C 和 6.1C 的 Th/U 值为 0.35 和 0.13 外, 其余分析点 Th/U 值均大于 0.4, 最高值为 1.13. 部分数据点存在不同程度铅丢失(图 4a). 除 10.1C, 19.1C, 2.1C 和 6.1C 外, 其余 15 个数据点给出 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 2175 ± 5 Ma (MSWD=0.81)(图 4a). 数据点 6.1C 存在最强烈的铅丢失, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 1541 ± 10 Ma, 其原因有待进一步确定.

相比之下, 16 个边部变质锆石数据点分析表明, U、Th 含量分别为 $(467 \sim 714) \times 10^{-6}$, 平均值为 545×10^{-6} 和 $(14 \sim 30) \times 10^{-6}$, 平均值为 23×10^{-6} . Th/U 值变化范围为 $0.02 \sim 0.06$, 平均值为 0.04, 均小于 0.1(表 1), 且 U、Th 含量的相关性不明显, 均表现出变质成因锆石特征(Paterson *et al.*, 1992; Pidgeon *et al.*, 1998; Gerhard *et al.*, 1999; Hoskin and Black, 2000). $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 1906 ± 4 Ma (MSWD=1.5)(图 4a).

4.2 细粒电气石岩(N14)

锆石颗粒大小不一, 多数锆石呈长柱状, 部分为等轴状(图 3f), 晶棱多有圆滑, 粒径变化范围为 $30 \sim 100 \mu\text{m}$, 长宽比值为 $1 : 1 \sim 2 : 1$. 在阴极发光下, 锆石普遍存在核一边结构, 核部锆石具有韵律环带, 部分存在继承锆石的残留核, 并具有明显的溶蚀特征, 指示它们形成过程经历了后期变质作用的改造. 锆石边部 CL 呈深灰色, 无明显分带并向里逐渐蚕食锆石核部, 但其宽度太窄(图 3f), 未能进行年龄测定. 位于岩浆锆石域的 6 个数据点的分析显示, U、Th 含量变化范围分别为 $(132 \sim 397) \times 10^{-6}$, 平均值为 270×10^{-6} 和 $(65 \sim 295) \times 10^{-6}$, 平均值为 168×10^{-6} . Th/U 值变化范围为 $0.51 \sim 0.77$, 平均值为 0.63, 均大于 0.4(表 1). 个别锆石存在一定程度的铅丢失(图 4b), 除 2.1 外, 其余 5 个数据点给出 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄 2171 ± 9 Ma (MSWD=1.7)(图 4b).

4.3 中细粒电气石岩(N02)

锆石呈短柱状或椭圆状半自形晶或他形晶出现, 颗粒大小不一, 粒径变化范围为 $30 \sim 110 \mu\text{m}$, 长

宽比值为 $1:1 \sim 2:1$ 。在阴极发光下, 锆石普遍存在核一边结构或核一幔一边结构, 核部锆石具清晰的振荡环带, 同样在阴极发光下呈强发光性的窄边(图 4g, 4h), 为岩浆结晶成因的碎屑锆石。边部锆石 CL 呈深灰色, 局部有振荡环带的残留, 外形与核部锆石环带形状相似, 为变质成因。笔者共在 21 颗锆石上测了 26 个数据点, 其中位于岩浆碎屑锆石域的 21 个数据点的分析显示, U、Th 含量分别为 $(166 \sim 4028) \times 10^{-6}$, 平均值为 620×10^{-6} 和 $(71 \sim 1543) \times 10^{-6}$, 平均值为 294×10^{-6} 。Th/U 值变化范围为 $0.27 \sim 1.05$, 平均值为 0.53(表 1)。除个别分析点 4.1C, 7.1C 和 19.1C 的 Th/U 值分别为 0.32, 0.27 和 0.36 外, 其余分析点 Th/U 值均大于 0.4, 最高值为 1.05。部分锆石存在强烈的铅丢失, 但大致沿同一不一致线分布(图 4c)。以靠近上交点的 12 个数据点(1.1, 3.1, 4.1, 5.1, 6.1, 8.1, 10.1, 12.1, 14.1, 15.1, 17.1 和 18.1)计算, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $2171 \pm 6 \text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 2.2$), 与拟合的上交点年龄为 $2175 \pm 6 \text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 1.6$)相一致(图 4c)。

5 个边部变质锆石分析, U、Th 含量分别为 $(525 \sim 1191) \times 10^{-6}$, 平均值为 836×10^{-6} 和 $(31 \sim 297) \times 10^{-6}$, 平均值为 107×10^{-6} 。Th/U 值变化范围为 $0.05 \sim 0.39$ (表 1)。5 个数据点很不谐和并位于谐和线下方, 可能是部分锆石存在强烈的铅丢失, 但大致沿同一不一致线分布并给出上交点年龄 $1889 \pm 62 \text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 4.5$)(图 4d), 与靠近谐和线的数据点 6.2R 和 19.2R 的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄 $1894 \pm 11 \text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 1.4$)基本吻合。

5 讨论

5.1 原岩属性

根据野外和室内研究结果表明, 电气石岩具有 2 个特点:(1)岩层产出厚度大、类型齐全、连续性好;(2)与硼矿体具有密切的空间分布关系。电气石岩中锆石, 多为老核新壳的变质复合锆石, 老核多为发育韵律环带的岩浆碎屑锆石, 说明其寄主岩不可能是岩浆岩, 只能是沉积岩。该变质岩石发育宽、窄不等的黑、白条带, 反映其原岩在沉积时, 层与层之间在成分上的差异。在后来的区域变质时就呈现黑、白条带, 而黑白条带之间就是原沉积岩的层理, 与该区层状超镁橄榄岩、富镁大理岩还保留原岩层理是一致的。

岩石化学成分的研究对电气石岩的恢复结果也是沉积岩。几年来, 不同研究者对电气石岩先后测定了其主量元素成分, 各分析结果之间并无实质差别: $\text{SiO}_2 = 54.40\% \sim 57.91\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 17.88\% \sim 18.02\%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 6.16\% \sim 6.41\%$, $\text{MgO} = 7.33\% \sim 7.35\%$, $\text{CaO} = 2.25\% \sim 3.18\%$, $\text{Na}_2\text{O} = 0.45\% \sim 1.12\%$ 。在近 2 000 个前寒武纪变质岩石样品统计分析研究的基础上, Shaw(1972)提出了一个正副变质岩的判别函数 “ $DF = 10.44 - 0.21\text{SiO}_2 - 0.32\text{Fe}_2\text{O}_3 (\text{T}) - 0.98\text{MgO} + 0.55\text{CaO} + 1.46\text{Na}_2\text{O} + 0.54\text{K}_2\text{O}$ ”, 该函数成功地判别了全球前寒武纪高级变质岩原岩的正副属性。该区电气石岩的 DF 值范围为 $-8.32 \sim -8.50$, 显示原岩为沉积岩。此外, Simonen(1953)研究了变余构造清晰的泥质岩、砂岩、钙质岩、火山碎屑岩和玄武质岩, 在 $(\text{al} + \text{fm}) - (\text{c} + \text{alk}) - \text{Si}$ 图解上勾绘出这些岩石的区域, 该图解可以成功地将变质的岩浆岩原岩与沉积岩原岩区分开来。在该图解上(图略), 该区电气石岩的岩石化学投点在沉积岩区, 其原岩显示了与镁铁质泥质岩良好的亲缘性。因此, 矿物组合、矿物化学和岩石化学特征都显示副变质岩特点, 锆石的内部构造特征均揭示后仙峪硼矿区电气石岩的原岩为沉积岩。但近年的研究均侧重于该类岩石的原岩是典型的热水沉积岩, 但不管如何, 该岩石的原岩是沉积岩, 而不应是岩浆岩。

5.2 电气石岩的原岩形成时代

华北克拉通在古元古代中早期有比世界上其他克拉通更强的火山活动和构造运动(孙大中和胡维兴, 1993; 赵宗溥等, 1993; 关鸿等, 1998; 耿元生等, 2000, 2003; Guan et al., 2002; 万渝生等, 2003)。Zhai and Liu(2003)提出华北克拉通的古元古代活动带的发育是华北克拉通演化历史的一个主要地质事件。翟明国(2004)将古元古代华北克拉通重新划分为 3 个主要活动带, 它们是辽吉、晋豫和丰镇活动带。古元古代 3 个活动带虽然岩石组合不同, 但具有相同环境的火山—沉积建造, 推测它们是在克拉通内发育的具有一定规模的裂陷带。沈其韩等(1992)和赵宗溥等(1993)提出包括孔兹岩在内的麻粒岩的原岩是形成于地壳拉伸环境或大陆边缘裂谷环境。张臣等(1994)根据构造分析, 也提出华北克拉通北缘孔兹岩系是古元古代早期的伸展构造及重力引起的垮塌和抬升的结果。

耿元生等(2003)对吕梁地区火山岩进行岩石学和地球化学研究, 得出其形成于陆内或大陆边缘裂

谷环境,并提出吕梁地区存在 $2\ 300\sim2\ 100\text{ Ma}$ 的裂谷活动。同样中条山地区也不例外,形成时代为 $2\ 200\sim2\ 060\text{ Ma}$ 的绛县群和中条群(孙大中和胡维兴,1993),岩石组合也具有裂谷特点(孙继源等,1995),因此中条山地区亦存在古元古代的裂谷活动。此外,五台山地区滹沱群青石村组基性火山岩的年龄为 $2\ 366\text{ Ma}$ (伍家善等,1986),记录了该区古元古代早期拉张阶段的火山活动。在华北克拉通南缘构造带也有古元古代岩石零星出露,嵩山地区的嵩山群下覆岩石中存在锆石年龄为 $2\ 176\pm16\text{ Ma}$ 的钾长花岗岩,表明嵩山群为古元古代中期产物,并且嵩山群为一套裂陷盆地建造。根据路孝平等(2004b)对通化地区古元古代晚期花岗质岩石研究表明,该区花岗岩侵位于 $2\ 160\text{ Ma}$ 左右,属于A型花岗岩,是朝鲜狼林陆块和辽南陆块西北部边缘地区古元古代早期地壳拉张作用的产物。

以上地质记录表明,华北克拉通在古元古代中早期发生过具有一定影响的裂谷型地质事件,翟明国和彭澎(2007)也提出, $2\ 300\sim1\ 905\text{ Ma}$ 期间,华北克拉通经历了一次基底陆块的拉伸—破裂事件,在克拉通内部发育了晋豫、胶辽裂陷盆地和丰镇陆内凹陷盆地。Zhao et al. (2005)也认为在古元古代时期,华北克拉通东部陆块内曾在胶—辽—吉一带形成陆内裂谷,而且已有的构造模式基本认同辽吉陆块是在华北克拉通东北部发育的古元古代裂陷盆地(翟明国,2004,2010),而后经历裂陷带的闭合,表现出一些陆—陆或陆—弧碰撞的特点。辽吉古裂谷活动不是一次孤立的地质事件,胶辽活动带地区岩石组合的原岩建造岩石学和地球化学研究更加证实了这一点。王翠芝等(2008b)根据凤城翁泉沟地区古元古代橄榄玄武岩的岩石学和地球化学研究,指出橄榄玄武岩具有裂谷环境火山岩的特征,并与营口大石桥地区超镁橄榄岩及宽甸砖庙硼矿区富镁大理岩进行对比,同样显示它们同属大陆裂谷环境下岩浆活动的产物。

辽东硼矿区含硼岩系电气石岩岩浆碎屑锆石的存在,进一步证明太古宙基底形成之后和吕梁运动之前,辽东硼矿区及外围曾发生过一定规模的张裂构造作用,并且诱发有双峰式火山岩、镁铁质侵入岩及中酸性岩浆活动。作为一种拉张环境的重要标志,后仙峪硼矿区电气石岩的存在为这种认识提供了进一步的依据。同样,这种地质背景也为该次岩浆活动的存在提供了十分有益的佐证材料。两者相辅相成,相互验证,为研究辽东和整个中朝地台早元古宙的

地质演化历史提供了资料和证据。

本次同位素年代学研究结果表明,辽东硼矿含硼岩系中电气石岩核部岩浆锆石SHRIMP U-Pb同位素年龄值分别为 $2\ 175\pm5\text{ Ma}$ 、 $2\ 171\pm9\text{ Ma}$ 和 $2\ 171\pm6\text{ Ma}$ 。这一年龄岩浆锆石的存在,进一步证明 $2.1\sim2.3\text{ Ga}$ 华北克拉通确实存在一次较为广泛的构造热事件,并在克拉通内部发育了辽吉古裂谷, 2.16 Ga 左右大规模的辽吉花岗岩也标志着古元古代早期存在一次张裂活动(路孝平等,2004a,2004b)。锆石特征表明,核部锆石为从岩浆中结晶的锆石,而后在裂谷环境下以碎屑形式进入电气石岩原岩。因此,作者认为电气石岩的原岩形成时代在 $2\ 170\text{ Ma}$ 左右。

5.3 电气石岩的改造时间和原因

辽吉地区古元古代变质作用的时代是近几年来激烈争论的问题(王集源和习乃昌,1982;姜春潮,1987;张秋生,1988; Sun et al., 1993; Faure et al., 2004; 路孝平等,2004a, 2004b; Luo et al., 2004; Li and Zhao, 2007)。近来 Yin and Nie(1996)在辽河群一个主要韧性剪切带获得黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄 $1\ 896\pm7\text{ Ma}$,可能代表了峰后冷却年龄,因为黑云母一般封闭温度较低($300\pm50\text{ }^{\circ}\text{C}$)。最近,Luo et al. (2004)从辽河群角闪岩相片岩识别出的变质成因锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $1\ 929\pm38\text{ Ma}$ 和不一致线上交点年龄 $1\ 929\pm26\text{ Ma}$ 。Li and Zhao(2007)在海城地区获得的磁铁二长花岗岩中变质锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $1\ 914\pm13\text{ Ma}$,推测辽河群区域变质年龄为 $\sim1.9\text{ Ga}$ 。

本文我们也从辽河群电气石岩中识别出大量变质成因的锆石,这些变质锆石一般以增生边或重结晶边包围在核部岩浆成因锆石边缘,并且具有高的发光性和低的Th/U比值。虽然少部分锆石变质增生边或重结晶边宽度太窄未能进行年龄测定,但是绝大多数变质锆石给出了谐和年龄或不一致年龄。电气石岩样品(N13)中边部锆石测试了16个分析点,全部数据点集中分布在谐和线上或其附近, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $1\ 906\pm4\text{ Ma}$ (图3a)。另一个样品(N02)变质锆石仅进行了5个数据点分析,大致沿同一不一致线分布并给出上交点年龄 $1\ 889\pm62\text{ Ma}$ (图3d),与靠近谐和线的两个数据点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄 $1\ 894\pm11\text{ Ma}$ 基本一致。本文所获得的电气石岩样品变质年龄与Luo et al. (2004)和Li and Zhao(2007)的认识吻合,与华北克拉通孔兹岩系峰期变质年龄 $1\ 950\sim1\ 900\text{ Ma}$

(翟明国和彭澎, 2007) 相一致。推测, 电气石岩所遭受的 1 900 Ma 左右变质作用可能与 Columbia 超大陆聚合事件有关。

受基诺(Kenor)超大陆裂解事件和 Lomagundi 事件的影响, 辽吉地区于 2 300~2 100 Ma 期间发生裂解, 张裂型条痕状花岗岩侵位于 2.175 Ga 左右(路孝平等, 2004b; Li and Zhao., 2007), 双峰式火山岩喷发并接受沉积形成辽河群; 古元古代末(2.00~1.85 Ga)期间华北克拉通再次经历陆壳增生及与其他陆块的构造拼合作用(李江海等, 2001)。据陆松年等(2002)认为, 哥伦比亚超大陆汇聚主要峰期与吕梁—中条造山运动的时限相一致, 华北克拉通属于哥伦比亚超大陆的组成部分, 并可能为 Nena 大陆块体群的一员。Columbia 超大陆各组成陆块是在 2.1~1.8 Ga 碰撞事件中拼合在一起的(Zhao et al., 2002; Rogers and Santosh, 2002; Condie, 2002), 代表着哥伦比亚超大陆聚合事件(Zhao et al., 2004, 2005), 国内称之为吕梁运动或中岳运动(胡受奚, 1988)。作为造山带哥伦比亚(Columbia)超大陆汇聚事件的响应, 辽吉盆地在 1 900 Ma 左右闭合、褶皱变形和区域变质, 含硼岩系发生绿片岩相一角闪岩相的区域变质作用和混合岩化作用改造。据此, 后仙峪硼矿区电气石岩所遭受 1 906±4 Ma 或 1 894±11 Ma 左右的构造热液改造事件以及相关的造山后环斑花岗岩体形成事件可能是辽吉古裂谷挤压闭合随后拉伸的产物, 即吕梁运动的表现。事实上该事件与砖庙硼矿床, 翁泉沟硼(铁)矿床及其东台子矿段的 30 件矿石样品铅同位素数据等时线年龄及伴生矿物金云母—氯气坪年龄(1 852~1 924 Ma)(Lu et al., 2005)相似,⁴⁰Ar/³⁹Ar 坪年龄代表了古元古代中晚期一次构造事件的年龄。因此, 1 900 Ma 左右辽吉地区发生了一次强烈的角闪岩相区域变质作用, 局部发生混合岩化, 使先成硼矿床和富硼岩石也发生强烈的改造、活化、迁移和富集, 从而形成电气石和现存的硼矿床。

5.4 电气石岩成岩作用及年龄意义

黄作良等(1996)曾对辽东硼矿床中电气石的矿物学特征进行过研究, 认为电气石是由角闪岩相区域变质作用形成的。刘敬党等(2007)、李雪梅等(2008)和李雪梅(2009)对后仙峪硼矿区电英岩进行了主量元素、微量元素和稀土元素分析。结果表明, 具有较高的 SiO₂, 其次为 Al₂O₃, 其总体化学成分与加拿大沙利文矿山典型富电气石喷气岩及桂北锡多

金属成矿区广泛发育的层状电英岩的化学组成都十分相似。微量元素及稀土元素特征与海水条件下以化学沉淀方式形成的热水沉积岩相似。Jiang et al. (1997)研究了后仙峪硼矿床的硼同位素地球化学特征, 发现产于底盘花岗岩中电气石 δ¹¹B 值为 +0.8‰, 明显不同于硼矿体及其围岩中的电气石, 后者 δ¹¹B 分别为 6.7‰~9.7‰ 和 3.9‰~4.5‰, 而矿体中硼酸盐矿物的 δ¹¹B 值为 9.6‰~11.1‰。因此, Jiang et al. (1997)认为辽吉硼矿带的形成与岩浆活动没有成因关系, 而是在裂谷发育早期形成并受后期变质的古蒸发岩矿床。肖荣阁等(2003)对辽吉硼矿带硼同位素研究表明, 电气石 δ¹¹B 值较低或呈负值, 硼镁石和硼镁铁矿等硼酸盐矿物 δ¹¹B 值较高, 为 2.3‰~17.4‰, 认为硼矿床属于热水沉积成因, 沉积电气石岩在后期区域变质或热变质过程中分解出含硼酸流体, 流体交代镁碳酸盐形成硼镁石或硼镁铁矿等矿物, 矿床属于热水沉积—变质叠加形成, 而非蒸发沉积—变质矿床。以上观点虽然存在争议, 但有一点是电气石岩的形成与变质作用密切相关。

根据同时期形成的条痕状花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 2.175 Ga 左右(Li and Zhao, 2007), 这个时间刚好与本区电气石岩形成时间相吻合。郝德峰等(2004)对条痕状花岗岩 Nd 同位素分析表明, ε_{Nd}(t) 值变化范围为 -4.22~2.32。钕同位素的这种组成特点从亏损地幔演化线开始, 跨过吉南新太古代演化域, 直至鞍山岩群演化域内部, 综合分析表明, 条痕状花岗岩形成于裂谷环境, 是由 2.5~2.4 Ga 间从地幔分离形成的古元古代地壳和古老的太古代老地壳物质被 2.2 Ga 的岩浆底侵加热并混合形成(郝德峰等, 2004)。孙敏等(1996)曾注意到宽甸杂岩源于亏损的地幔和地壳再循环组分相混合的结果。本文研究的电气石岩无论其微量元素分异模式还是其同位素地球化学特征都表明它和宽甸杂岩来源于同一岩浆系列, 可以推测后仙峪硼矿区电气石岩的形成过程大体如下:(1) 2 170 Ma 左右, 受基诺(Kenor)超大陆裂解事件和 Lomagundi 事件的影响, 辽吉地区发生拉张裂解, 亏损的地幔源和地壳再循环组分发生物理或化学混合作用, 壳幔熔浆上侵, 引起偏酸性为主的双峰式火山喷发的直接热事件发生, 喷出的岩浆将热量和部分(成矿)流体带到沉积盆地, 带来的热能对地壳进行改造, 使周围介质和环境升温, 导致地热异常场的形成, 并维持海底热水对流系统的形成与循环, 使含矿热水溶

液持续从深部地壳、地幔顺同生断裂系统上升至海盆地卸载、沉积形成初始电气石岩。(2)作为全球 Columbia 超大陆汇聚事件的响应,辽吉盆地于 1 900 Ma 左右闭合、褶皱变形和区域变质,含硼岩系发生绿片岩相—角闪岩相的区域变质作用和混合岩化作用改造,从而导致电气石矿物的形成和硼矿床的进一步富集。

结合电气石岩的 SHRIMP U-Pb 年龄、电气石岩的演化模式和关于胶辽吉活动带古元古代构造属性研究所取得的认识,可以初步得出:

胶辽吉活动带南北太古宙基地起初为一个大陆板块,古元古代时期经历了裂谷拉张作用,引起岩浆活动及期后热液喷流作用,导致了电气石岩的原岩——与岩浆活动有关的硅质岩的形成。

在古元古代中晚期,胶辽吉地区曾发生过强烈的构造事件,该事件导致研究区热流值的增加,还导致大规模的挤压褶皱作用。在挤压褶皱作用和构造事件的高热流值影响下,富硼硅质岩被深埋且温度快速升高,发生了角闪岩相的变质作用,导致了后仙峪硼矿区电气石岩的形成。

6 结论

(1) 在区分原岩的沉积成因或岩浆成因时,对具有振荡环带的锆石原位年龄的解释要相当注意。原岩恢复是变质岩岩石学研究的一项传统方法,并可以为同位素年龄的合理解释提供重要信息。如本研究所示,后仙峪矿区电气石岩的核部锆石虽然具有清晰的振荡环带,但原岩是沉积岩而不是岩浆岩。

(2) 后仙峪硼矿区电气石岩的原岩形成时代在 2 170 Ma 左右,属于古元古代中期;而变质年龄要稍晚,在 1 900 Ma 左右,属于古元古代中晚期。

(3) 辽吉地区曾发生过的强烈的构造事件和区域变质作用可以精确地约束在 1 900 Ma 左右,结合矿物学研究成果,表明电气石和硼矿床是 B、Si、Al 及 Na、Ca、Mg 和 Fe 等物质在区域变质条件下变质作用的产物。

(4) 辽吉裂谷张裂构造体制下来源于再循环地壳物质混染的地幔源的大量的含硼、镁等元素的成矿流体通过火山热泉活动、海水循环,沿地壳深部构造喷溢至海底,并在海底热卤水盆地内产生沉淀,进而形成纹层状富硼硅质岩和早期硼酸盐矿体。随后,伴随哥伦比亚(Columbia)超大陆聚合事件,使早期形成的富硼硅质岩及沉积硼矿床发生了较强烈的叠

加改造和区域变质,从而导致电气石矿物的形成和硼矿床的进一步富集。

致谢:锆石 SHRIMP U-Pb 分析得到中国地质科学院北京离子探针中心万渝生研究员和王伟博士的支持和帮助;锆石标准 M257 由 Nasdala 博士提供;论文撰写过程中得到福州大学紫金矿业学院王翠芝教授的支持和帮助;审稿专家对文稿提出了宝贵的修改建议和意见;笔者在此一并致以衷心的感谢!

References

- Anthi, L., Dieter, G., 1999. Constraining the prograde and retrograde $P-T-t$ path of Eocene HP rocks by SHRIMP dating of different zircon domains: inferred rates of heating, burial, cooling and exhumation for central Rhodope, northern Greece. *Contributions to Mineralogy Petrology*, 135 (4): 340—354. doi: 10.1007/s004100050516
- Compston, W., Williams, I. S., Mayer, C., 1984. U-Pb geochronology of zircons from Lunar Breccia 73217 using a sensitive high mass-resolution ion microprobe. *Proceedings of XIV Lunar and Planetary Science Conference, Part 2 Journal of Geophysical Research*, 89(Suppl.): B525-B534. doi: 0148-0227/84/003B-5045
- Condie, K. C., 2002. Breakup of a Paleoproterozoic supercontinent. *Gondwana Research*, 5 (1): 41—43. doi: 10.1016/S1342-937X(05)70886-8
- Faure, M. W., Lin, W., Monie, P., et al., 2004. Palaeoproterozoic arc magmatism and collision in Liaodong Peninsula (North-East China). *Terra Nova*, 16 (2): 75—80. doi: 10.1111/j.1365-3121.2004.00533.x
- Geng, Y. S., Wan, Y. S., Shen, Q. H., et al., 2000. Chronological framework of the Early Precambrian important events in the Luliang area, Shanxi Province. *Acta Geologica Sinica*, 74 (3): 216—223 (in Chinese with English abstract).
- Geng, Y. S., Wan, Y. S., Yang, C. H., 2003. The Palaeoproterozoic rift-type volcanism in Luliangshan area, Shanxi Province, and its geological significance. *Acta Geoscientia Sinica*, 24 (2): 97—104 (in Chinese with English abstract).
- Gerhard, V., Rolf, S., Dieter, G., 1999. Internal morphology, habit and U-Th-Pb microanalysis of amphibolite-to-granulite facies zircons: geochronology of the Ivrea zone (southern Alps). *Contributions to Mineralogy Petrology*, 134 (4): 380—404. doi: 10.1007/s004100050492
- Guan, H., Sun, M., Wilde, S. A., et al., 2002. SHRIMP

- U-Pb zircon geochronology of the Fuping complex: implications for formation and assembly of the North China craton. *Precambrian Research*, 113(1-2): 1-18. doi: 10.1016/S0301-9268(01)00197-8
- Guan, H., Sun, M., Xu, P., 1998. Geochronological study of zircons from high grade gneisses of Fuping complex by LP ICPMS technique. *Acta Petrologica Sinica*, 14(4): 460-470 (in Chinese with English abstract).
- Hao, D. F., Li, S. Z., Zhao, G. C., et al., 2004. Origin and its constraint to tectonic evolution of Paleoproterozoic granitoids in the eastern Liaoning and Jilin Province, North China. *Acta Petrologica Sinica*, 20(6): 1409-1416 (in Chinese with English abstract).
- Hoskin, P. W. O., Black, L. P., 2000. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon. *Journal of Metamorphic Geology*, 18(4): 423-439. doi: 10.1046/j.1525-1314.2000.00266.x
- Hu, S. X., 1988. Geology and metallogeny of the collision belts between the southern and the northern China plate. Nanjing University Press, Nanjing, 1-558 (in Chinese).
- Huang, Z. L., Mo, M., Zu, E. D., 1996. Mineralogical features and genetic significance of tourmalines from boron deposits in eastern Liaoning. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 15(4): 365-378 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, C. C., 1987. Precambrian geology of eastern part of Liaoning and Jilin. Liaoning Science and Technology Publishing House, Shenyang, 184-229 (in Chinese).
- Jiang, S. Y., Palmer, M. R., Peng, Q. M., et al., 1997. Chemical and stable isotopic compositions of Proterozoic met-amorphosed evaporites and associated tourmalines from the Houxianyu borate deposit, eastern Liaoning, China. *Chemical Geology*, 135(3-4): 189-211. doi: 10.1016/S0009-2541(96)00115-5
- Li, J. H., Hou, G. T., Huang, X. N., et al., 2001. The constraint for the supercontinental cycles: evidence from Precambrian geology of North China block. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2): 177-186 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. Z., Zhao, G. C., 2007. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Liaoji granitoids: constraints on the evolution of the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji belt in the eastern block of the North China craton. *Precambrian Research*, 158(1-2): 1-16. doi: 10.1016/j.precamres.2007.04.001
- Li, X. M., 2009. Metallogenesis and mineral prospecting assessment of borate deposits in eastern Liaoning-southern Jilin borate ore belt, Northeast China (Dissertation). Jilin University, Jilin, 1-158 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. M., Sun, F. Y., Li, B. L., et al., 2008. Geochemistry and origin of tourmalite from boron-bearing rock series of Houxianyu borate deposit in eastern Liaoning. *Global Geology*, 27(3): 260-266 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. D., Xiao, R. G., Wang, W. W., et al., 2007. Regional metallogenesis of borate deposit in eastern Liaoning, China. Geological Publishing House, Beijing, 122-138 (in Chinese).
- Lu, S. N., Yang, C. L., Li, H. K., et al., 2002. North China continent and Columbia supercontinent. *Earth Science Frontiers*, 9(4): 225-233 (in Chinese with English abstract).
- Lu, X. P., Wu, F. Y., Lin, J. Q., et al., 2004a. Geochronological successions of the Early Precambrian granitic magmatism in southern Liaodong peninsula and its constraints on tectonic evolution of the North China craton. *Chinese Journal of Geology*, 39(1): 123-138 (in Chinese with English abstract).
- Lu, X. P., Wu, F. Y., Zhang, Y. B., et al., 2004b. Emplacement age and tectonic setting of the Paleoproterozoic Liaoji granites in Tonghua area, southern Jilin Province. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 381-392 (in Chinese with English abstract).
- Lu, Y. F., Cheng, Y. C., Li, H. Q., et al., 2005. Metallogenic chronology of boron deposits in the eastern Liaoning Paleoproterozoic rift zone. *Acta Geologica Sinica*, 79(3): 414-425.
- Ludwig, K. R., 2001. SQUID 1.02; a user's manual. Berkeley Geochronology Center Special Publication No. 2, 19.
- Ludwig, K. R., 2003. User's Manual for Isoplot/Ex rev. 3.00; a geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, Special Publication No. 4, 70.
- Luo, Y., Sun, M., Zhao, G. C., et al., 2004. LA-ICP-MS U-Pb zircon ages of the Liaohe Group in the eastern block of the North China craton: constraints on the evolution of the Jiao-Liao-Ji belt. *Precambrian Research*, 134(3-4): 349-371. doi: 10.1016/j.precamres.2004.07.002
- Nasdala, L., Hofmeister, W., Norberg, N., et al., 2008. Zircon M257—a homogeneous natural reference material for the ion microprobe U-Pb analysis of zircon. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 32(3): 247-265.
- Paterson, B. A., Stephens, W. E., Rogers, G., et al., 1992.

- The nature of zircon inheritance in two granite plutons. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh (Earth Sciences)*, 83(1–2): 459–471. doi: 10.1080/03400003009017.0420
- Peng, Q. M., Xu, H., 1994. The Paleoproterozoic metavaporitic and boron deposits in eastern Liaoning and southern Jilin. Northeast Normal University Press, Changchun, 1–120 (in Chinese).
- Pidgeon, R. T., Nemchin, A. A., Hitchen, G. J., 1998. Internal structures of zircons from Archaean granites from the Darling Range batholith: implications for zircon stability and the interpretation of zircon U-Pb ages. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 132(3): 288–299. doi: 10.1007/s004100050422
- Rogers, J. J. W., Santosh, M., 2002. Configuration of Columbia, a Mesoproterozoic supercontinent. *Gondwana Research*, 5(1): 5–22. doi: 10.1016/S1342-937X(05)70883-2
- Shaw, D. M., 1972. The origin of the Apsley gneiss, Ontario. *Canadian Journal of Earth Science*, 9(1): 18–35. doi: 10.1139/e72-002
- Shen, Q. H., Xu, H. F., Zhang, Z. Q., et al., 1992. Granulites of Early Precambrian in China. Geological Publishing House, Beijing, 389–400 (in Chinese).
- Simonen, A., 1953. Stratigraphy and sedimentation of the Svecofennidie, Early Archean supracrustal rocks in southwestern Finland. *Bull. Comm. Geol. Finland*, 160: 1–64.
- Song, B., Zhang, Y. H., Wan, Y. S., et al., 2002. Mount making and procedure of the SHRIMP dating. *Geological Review*, 48(Suppl.): 26–30 (in Chinese with English abstract).
- Sun, D. Z., Hu, W. X., 1993. The tectonic framework of Precambrian in Zhongtiao Mountains. Geological Publishing House, Beijing, 165–167 (in Chinese).
- Sun, J. Y., Ji, S. K., Zhen, Y. Q., 1995. The copper ores in the Zhongtiao rift zone. Geological Publishing House, Beijing, 1–190 (in Chinese).
- Sun, M., Armstrong, R. L., Lambert, R. S. J., et al., 1993. Petrochemistry and Sr, Pb and Nd isotopic geochemistry of the Paleoproterozoic Kuandian complex, the eastern Liaoning Province, China. *Precambrian Research*, 62(1–2): 171–190. doi: 10.1016/0301-9268(93)90099-N
- Sun, M., Zhang, L. F., Wu, J. H., 1996. The origin of the Early Proterozoic Kuandian complex: evidence from geochemistry. *Acta Geologica Sinica*, 70(3): 207–222 (in Chinese with English abstract).
- Wan, Y. S., Liu, D. Y., Jian, P., 2004. Comparison of SHRIMP U-Pb dating of monazite and zircon. *Chinese Science Bulletin*, 49(14): 1501–1506. doi: 10.1360/03wd0638
- Wan, Y. S., Zhang, D. Q., Song, T. R., 2003. Detrital zircon SHRIMP dating for the Changzhougou Formation in the Changcheng System in Shisanling, Beijing: constrain to material source of cover of the North China craton and sedimentation time. *Chinese Science Bulletin*, 48(18): 1970–1975 (in Chinese).
- Wang, C. Z., Xiao, R. G., Liu, J. D., et al., 2006. Ore-control role of ultra-magnesium peridotite in Houxianyu boron ore district, Yingkou, Liaoning Province. *Mineral Deposits*, 25(6): 683–692 (in Chinese with English abstract).
- Wang, C. Z., Xiao, R. G., Liu, J. D., 2008a. Ore-forming genesis and model of eastern Liaoning borate deposits. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33(6): 813–824 (in Chinese with English abstract).
- Wang, C. Z., Xiao, R. G., Liu, J. D., 2008b. Geological and geochemical characteristics and formation environment of the Wenquangou olivine basalt in Liaoning Province. *Acta Geoscientifica Sinica*, 29(5): 542–552 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J. Y., Xi, N. C., 1982. The evaluation on the K-Ar ages of Northeast China. *The Science and Technology Information of Northeast China*, 2: 22–40 (in Chinese).
- Williams, I. S., 1998. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. In: Mc Kibben, M. A., Shanks, W. C., Ridley, W. I., eds., Applications of microanalytical techniques to understanding mineralizing process. *Reviews in Economic Geology*, 7: 1–35.
- Wu, J. S., Liu, D. Y., Jin, L. G., 1986. The zircon U-Pb age of metamorphosed basic volcanic lavas from the Hutuo Group in the Wutai Mountain area, Shanxi Province. *Geological Review*, 32(2): 178–184 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Y. B., Zheng, Y. F., 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age. *Chinese Science Bulletin*, 49(15): 1554–1569.
- Xiao, R. G., Takao, O., Fei, H. C., et al., 2003. Sedimentary-metamorphic boron deposits and their boron isotopic compositions in eastern Liaoning Province. *Geoscience*, 17(2): 137–142 (in Chinese with English abstract).
- Xu, H., Peng, Q. M., Palmer, M. R., 2004. Origin of tourmaline-rich rocks in a Paleoproterozoic terrane (N-E China): evidence for evaporite-derived boron. *Geolo-*

- gy in China*, 31(3): 240—253.
- Xue, J. L., Xu, H., Gao, Y. M., et al., 2006. Mineralogical characteristics of tourmaline in the Houxianyu boron deposit in Liaoning and their significance for rock and ore formation. *Geology in China*, 33(6): 1386—1392 (in Chinese with English abstract).
- Yin, A., Nie, S. Y., 1996. A Phanerozoic palinspastic reconstruction of China and its neighboring regions. In: Yin, A., Harrison, T. M., eds., *The tectonic evolution of Asia*. Cambridge University Press, New York, 285—442.
- Zhai, M. G., 2004. 2.1~1.7 Ga geological event group and its geotectonic significance. *Acta Petrologica Sinica*, 20(6): 1343—1354 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, M. G., 2010. Tectonic evolution and metallogenesis of North China Craton. *Mineral Deposits*, 29(1): 24—36 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, M. G., Liu, W. J., 2003. Paleoproterozoic tectonic history of the North China craton: a review. *Precambrian Research*, 122(1—4): 183—199. doi: 10.1016/S0301-9268(02)00211-5
- Zhai, M. G., Peng, P., 2007. Paleoproterozoic events in the North China craton. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2665—2682 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, C., Hou, G. T., Qian, X. L., 1994. Magnetic fabric evidence of the style of emplacement of Late Precambrian mafic dyke swarms in the Luliang-northern Shanxi region, North China. *Geological Review*, 40(3): 245—251 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q. S., 1988. Early crust and mineral deposits of Liaodong Peninsula. Geological Publishing House, Beijing, 218—450 (in Chinese).
- Zhang, Y. F., Liu, J. D., Fu, Y. C., et al., 2009. Study on the genesis and geological and geochemical characteristics of layered migmatites in East Liaoning, China. *Geology and Exploration*, 45(5): 549—557 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, G. C., Cawood, P. A., Wilde, S. A., et al., 2002. Review of global 2.1—1.8 Ga orogens: implications for a pre-Rodinia supercontinent. *Earth Science Reviews*, 59(1—4): 125—162. doi: 10.1016/S0012-8252(02)00073-9
- Zhao, G. C., Sun, M., Wilde, S. A., et al., 2004. A paleo-Mesoproterozoic supercontinent: assembly, growth and breakup. *Earth Science Reviews*, 67(1—2): 91—123. doi: 10.1016/j.earscirev.2004.02.003
- Zhao, G. C., Sun, M., Wilde, S. A., et al., 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Cra-ton; key issues revisited. *Precambrian Research*, 136(2): 177—202. doi: 10.1016/j.precamres.2004.10.002
- Zhao, Z. P., Zhai, M. G., Wang, K. Y., et al., 1993. Precambrian crustal evolution of the Sino-Korean paraplatform. Science Press, Beijing, 389—390 (in Chinese).
- Zou, R., Feng, B. Z., 1993. Geology and origin of the tourmalites in the Early Proterozoic boron-bearing sequence in Liaoning-Jilin. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, 23(4): 373—379 (in Chinese with English abstract).
- Zou, R., Feng, B. Z., 1995. The features of ore-hosting volcanic-hydrothermal sedimentary series in Houxianyu boron deposits, Yingkou, Liaoning. *Geochimica*, 24: 46—54 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 耿元生, 万渝生, 沈其韩, 等, 2000. 吕梁地区的早前寒武纪主要地质事件的年代框架. 地质学报, 74(3): 216—223.
- 耿元生, 万渝生, 杨崇辉, 2003. 吕梁地区古元古代的裂陷型火山作用及其地质意义. 地球学报, 24(2): 97—104.
- 关鸿, 孙敏, 徐平, 1998. 阜平杂岩中几种不同类型片麻岩的锆石激光探针等离子体质谱年代学研究. 岩石学报, 14(4): 460—470.
- 郝德峰, 李三忠, 赵国春, 等, 2004. 辽吉地区古元古代花岗岩成因及其对构造演化的制约. 岩石学报, 20(6): 1409—1416.
- 胡受奚, 1988. 华北与华南古板块拼合带地质和成矿——以东秦岭—桐柏为例. 南京: 南京大学出版社, 1—558.
- 黄作良, 莫珉, 祖恩东, 1996. 辽东硼矿床中电气石的矿物学特征及成因意义. 岩石矿物学杂志, 15(4): 365—378.
- 姜春潮, 1987. 辽吉东部前寒武纪地质. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 184—229.
- 李江海, 侯贵廷, 黄雄南, 等, 2001. 华北克拉通对前寒武纪超大陆旋回的基本制约. 岩石学报, 17(2): 177—186.
- 李雪梅, 2009. 辽东—吉南硼矿带硼矿成矿作用及成矿远景评价(博士论文). 长春: 吉林大学, 1—158.
- 李雪梅, 孙丰月, 李碧乐, 等, 2008. 辽东后仙峪硼矿床含硼岩系中电英岩的地球化学特征及其成因. 世界地质, 27(3): 260—266.
- 刘敬党, 肖荣阁, 王文武, 等, 2007. 辽东硼矿区域成矿模型. 北京: 地质出版社, 122—138.
- 陆松年, 杨春亮, 李怀坤, 等, 2002. 华北古大陆与哥伦比亚超大陆·地学前缘, 9(4): 225—233.
- 路孝平, 吴福元, 林景仟, 等, 2004a. 辽东半岛南部早前寒武纪花岗岩浆作用的年代学格架. 地质科学, 39(1): 123—138.
- 路孝平, 吴福元, 张艳斌, 等, 2004b. 吉林南部通化地区古元古代辽吉花岗岩的侵位年代与形成构造背景. 岩石学

- 报,20(3): 381—392.
- 彭齐鸣,许虹,1994.辽东—吉南地区早元古宙变质蒸气岩系及硼矿床·长春:东北师范大学出版社,1—120.
- 沈其韩,许慧芬,张宗清,等,1992.中国早前寒武纪麻粒岩·北京:地质出版社,389—400.
- 宋彪,张玉海,万渝生,等,2002.锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论·地质论评,48(增刊): 26—30.
- 孙大中,胡维兴,1993.中条山前寒武纪年代构造格架和年代地壳结构·北京:地质出版社,165—167.
- 孙继源,冀树楷,真允庆,1995.中条裂谷铜矿床·北京:地质出版社,1—190.
- 孙敏,张立飞,吴家弘,1996.早元古代宽甸杂岩的成因:地球化学证据·地质学报,70(3): 207—222.
- 万渝生,刘敦一,简平,2004.独居石和锆石 SHRIMP U-Pb 定年对比·科学通报,49(12): 1185—1190.
- 万渝生,张巧大,宋天锐,2003.北京十三陵长城系常州沟组碎屑锆石 SHRIMP 年龄·华北克拉通盖层物源区及最大沉积年龄的限定·科学通报,48(18): 1970—1975.
- 王翠芝,肖荣阁,刘敬党,等,2006.辽宁营口后仙峪硼矿区超镁橄榄岩的控矿作用·矿床地质,25(6): 683—692.
- 王翠芝,肖荣阁,刘敬党,2008a.辽东硼矿的成矿机制及成矿模式·地球科学——中国地质大学学报,33(6): 813—824.
- 王翠芝,肖荣阁,刘敬党,2008b.辽宁翁泉沟橄榄玄武岩的地质地球化学特征及其形成环境·地球学报,29(5): 542—552.
- 王集源,习乃昌,1982.东北地区钾氩法年龄数据评述·东北地质科技情报,2: 22—40.
- 伍家善,刘敦一,金龙国,1986.五台山区滹沱群变质基性熔岩中锆石 U-Pb 年龄·地质论评,32(2): 178—184.
- 吴元保,郑永飞,2004.锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约·科学通报,49(16): 1589—1604.
- 肖荣阁,大井隆夫,费红彩,等,2003.辽东地区沉积变质硼矿床及硼同位素研究·现代地质,17(2): 137—142.
- 薛建玲,许虹,高一鸣,等,2006.辽宁后仙峪硼矿床中电气石的矿物学特征及其成岩成矿意义·中国地质,33(6): 1386—1392.
- 翟明国,2004.华北克拉通 2.1~1.7 Ga 地质事件群的分解和构造意义探讨·岩石学报,20(6): 1343—1354.
- 翟明国,2010.华北克拉通的形成演化与成矿作用·矿床地质,29(1): 24—36.
- 翟明国,彭澎,2007.华北克拉通古元古代构造事件·岩石学报,23(11): 2665—2682.
- 张臣,侯贵廷,钱祥麟,1994.吕梁—晋北地区晚前寒武纪镁铁质岩墙群侵位方式的磁组构证据·地质论评,40(3): 245—251.
- 张秋生,1988.辽东半岛早期地壳与矿床·北京:地质出版社,218—450.
- 张艳飞,刘敬党,付艳春,等,2009.辽东硼矿区层状混合岩的地质地球化学特征及其成因探讨·地质与勘探,45(5): 549—557.
- 赵宗溥,等,1993.中朝准地台前寒武纪地壳演化·北京:科学出版社,389—390.
- 邹日,冯本智,1993.辽吉地区早元古代含硼建造中电英岩的特征及成因·长春地质学院学报,23(4): 373—379.
- 邹日,冯本智,1995.营口后仙峪硼矿容矿火山—热水沉积岩系特征·地球化学,24: 46—54.