

岛津电子探针表征富硼矿物电气石的环带特征

EPMA-070

摘要：电气石的化学成分比较宽泛，其阳离子可由多种元素构成，由于含有超轻元素 B、F 和 OH 等，在电子探针微区的测试领域一直是一个难点，特别是超轻元素 B 在电气石环带上分布特征的直观面分布表征还未见文献发表，甚至对于 B 的含量定量也有不少文献资料是以配比计算的方式给出。本文使用岛津电子探针直观地表征了电气石环带中包括 B 在内的各元素面分布特征，并对环带中的元素进行了微区定量，获得了理想的测试结果。

关键词：超轻元素 富硼矿物 电气石 环带结构 电子探针 岛津

技术特点：

- ❖ 岛津电子探针对超轻元素的分析具有高灵敏度的特点，可表征电气石环带中包括超轻元素 B 在内的元素面分布特征；
- ❖ 电气石是岩石成因的重要指示矿物，相对于差值配比计算，直接定量可提供更坚实的数据。

电气石，即托玛琳石，俗称碧玺，是一种化学组成比较复杂的环状结构硼硅酸盐矿物，其化学式可简写为 $XY_3Z_6[T_6O_{18}][BO_3]_3V_3W$ ，其中 X、Y、Z 为一种或多种阳离子，V 和 W 为阴离子，T 主要为 Si 和 Al 构成。

电气石是花岗岩和伟晶岩中常见的富含超轻元素硼的副矿物，由于电气石只能在特定成分的岩浆中结晶（富 B 岩浆），同时电气石可以在岩浆演化的不同阶段结晶，而且电气石一旦结晶形成，其晶内元素扩散速率极低，主、微量元素的扩散速率在比较宽泛的温压条件下几乎可以忽略不计，成分特征很难被后期地质事件改造，包括低温表生风化环境、高温的岩浆环境和中 - 高级变质环境都不会对电气石的元素构成很大的影响。因此，在不同期次结晶的电气石可以记录不同阶段岩浆成分的信息，是岩石成因的一种重要

的指示矿物，可用于重建其所经历各类地质演化，如指示沉积物源和成岩过程、记录变质反应及变质作用发生的温压变化、反演岩浆 - 热液演化过程等。

电气石的化学成分复杂又十分重要，但由于电气石中含有超轻元素 B、F，可能含有 Li，同时一般会含有 OH，这都给电气石的定量测试带来很大的困难，以往文献资料中关于电气石中 B 的含量，多使用计算的方式获得。

岛津电子探针通过配置高位 52.5° 的 X 射线检出角以及兼具灵敏度和分辨率的全聚焦分光晶体，在超轻元素和微量元素测试方面有独特的优势。本文使用岛津电子探针表征某矿区中电气石的环带特征，获得了直观的数据，可为电气石中地质问题的认识和研究提供更坚实的数据支持。

■ 实验部分

1.1 仪器

岛津 EPMA-1720 型电子探针显微分析仪



1.2 分析条件

表 1 EPMA 测试参数

仪器	: EPMA-1720	加速电压	: 15 kV
束流	: 面分析100 nA、定量20 nA	束斑直径	: Min
步距	: 1.0 μm	驻留时间	: 面分析180 ms、定量10 s

1.3 样品处理

试样采集自国内某矿区，切割成块状后直接磨制抛光制备成光片试样，表面经蒸镀碳膜处理以增加表面导电性，上机测试。

■ 结果与讨论

试样经背散射电子图像（BSE）观察，选择一个电气石颗粒进行元素的定性分析，谱图解析及结果见图 1。针对所能检出的元素，进一步进行元素面分布特征分析，结果见图 2。

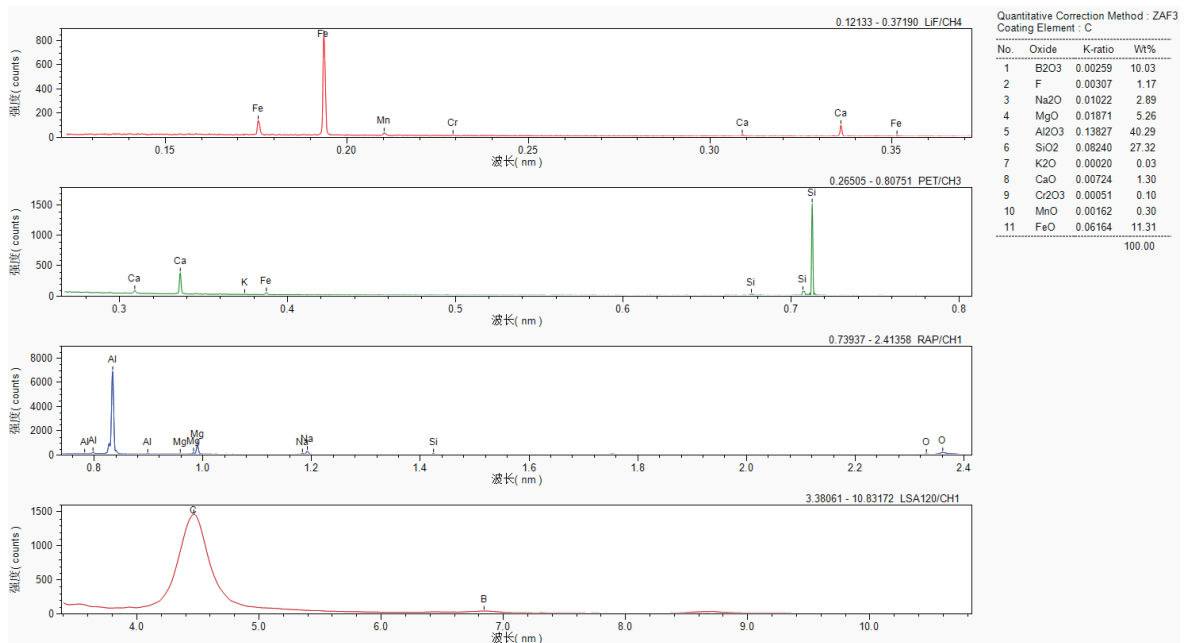
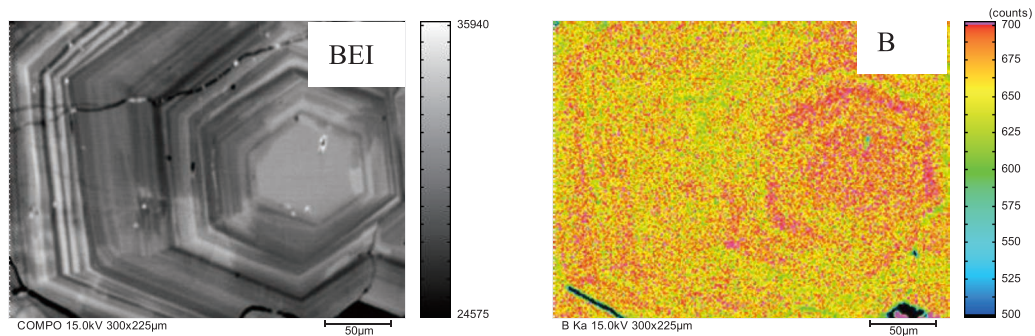


图 1 电气石颗粒定性分析



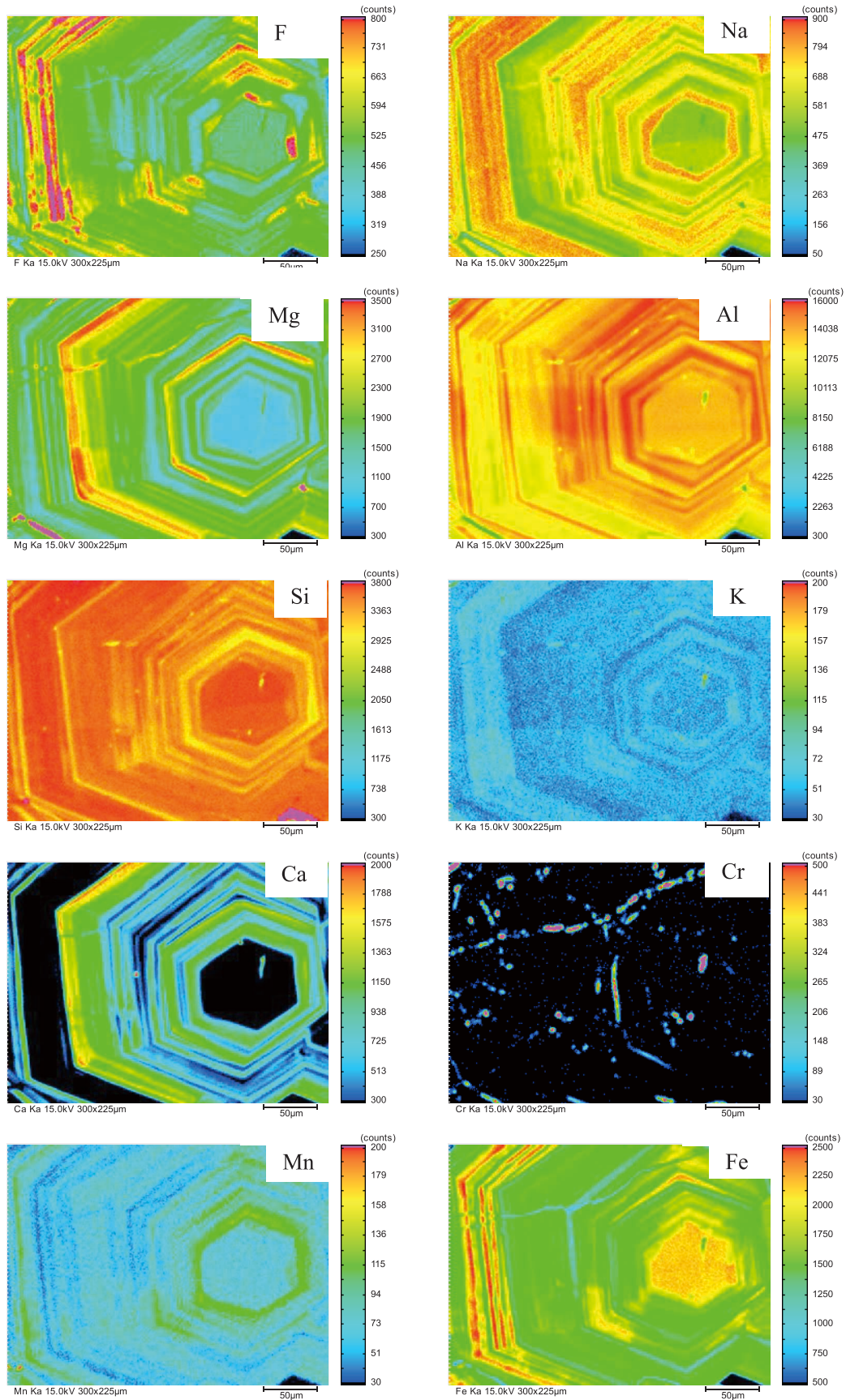


图 2 电气石中元素分布特征

背散射电子像和元素面分布特征结果显示，试样中的电气石呈多层环带结构，环带特征较为一致，环带中心的核部较为自形，显示其结晶阶段较早的特点，具有低 K、Ca、Mg，高 Fe、Si 的特征；多层韵律环带呈规则性交替分布，显示其可能存在多期次生长的特征，化学成分较为复杂，说明在结晶生长过程中熔体成分的波动变化。

观察对比不同环带上元素分布特征显示高 Na、K 的环带，Mg、Al、Ca 含量相对较低；Mg 和 Fe 的含量基本相反，高 Mg 的位置，Fe 含量相对较低。电气石的成分特征，尤其是 Mg/Fe 比值的变化，反映出电气石形成过程中流体成分演化特点。Benard 等人的研究指出，低温结晶的电气石相对于高位环境下结晶的电气石，具有 Mg 低而 Fe 高的特征，从核部 Mg/Fe 值可说明此电气石结晶于岩浆演化的晚期，振荡环带也反应了除了化学成分波动外，温度的快速变化。

电气石本身较为稳定，即使在 600 多度的地质环境中，主量和微量元素也很难迁移或成分交代。在电气石颗粒中存在裂隙特征，面分布显示元素 Cr 较为孤立地分布于裂隙中，其形成与地质环境的压力变化有关，显示了可能的侵入岩型特点。

超轻元素 B 的面分布图也显示了环带分布特征。由于超轻元素产生的特征 X 射线大部分被基体所吸收，导致测试时灵敏度较低。为了排除基体效应以及其他元素的高次线引入的干扰影响，针对 B 元素增大入射束流并延长测试时间，同时获取特征峰 (PK) 左右两侧的 BG+ 和 BG- 图像以扣除背景的影响，最终得到元素 B 的净强度 (Net) 分布特征，结果见图 3。结果显示了 B 的含量差异不大，但有环带分布的特点。

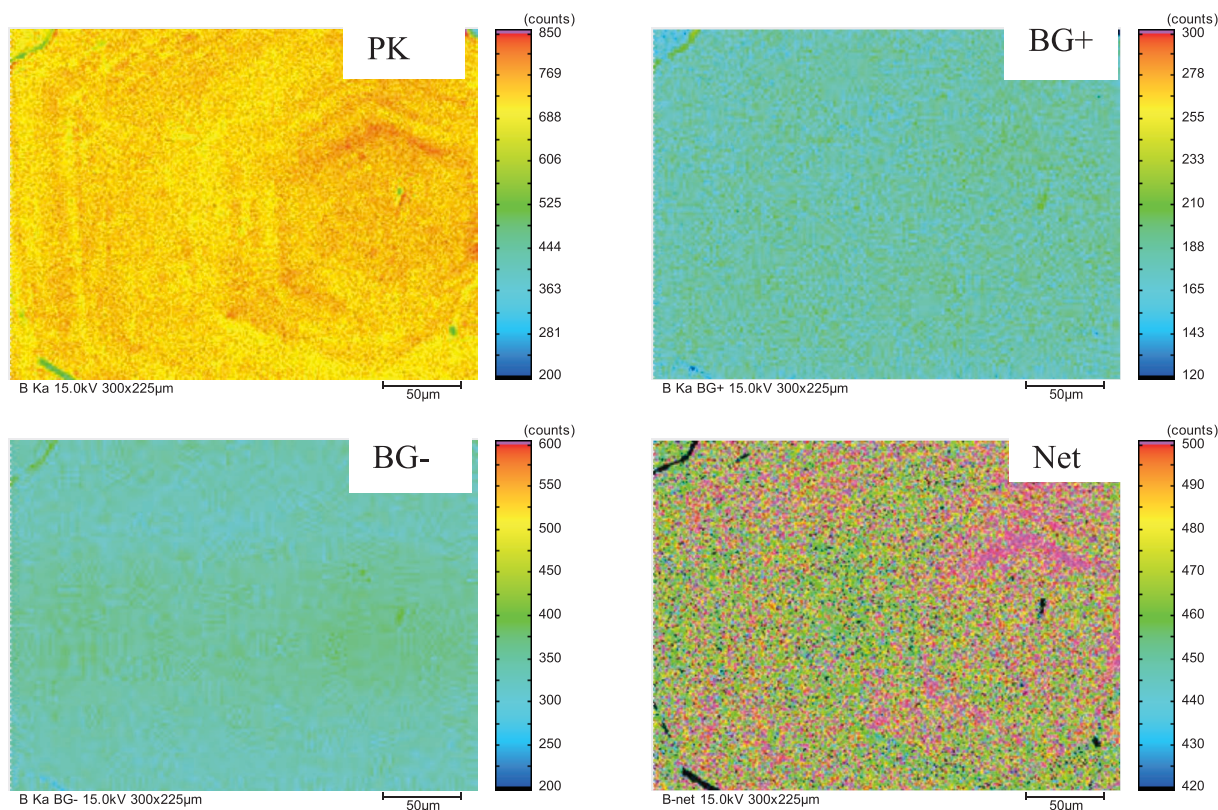


图3 超轻元素 B 峰位、背景和净强度的面分布特征

为了准确评估各不同环带特征位置的元素含量，从外层环带至心部依次选择位置进行定量分析，基体修正使用 ZAF3 模型进行。测试位置见图 4，定量结果质量百分含量 (Wt%) 见表 2。

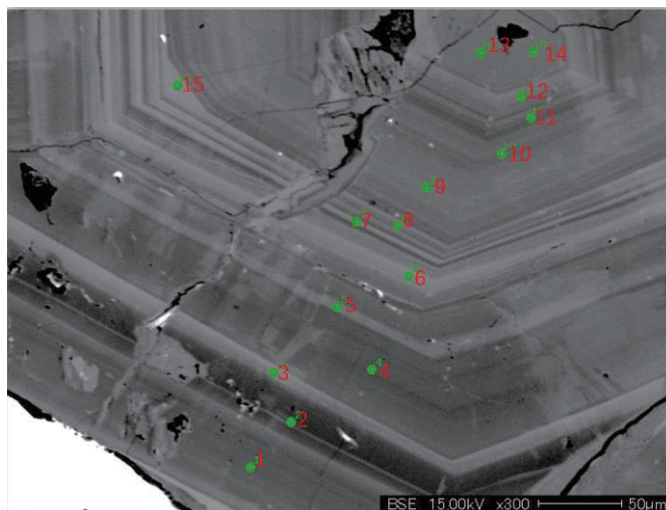


图4 定量分析选择的特征位置

表2 定量分析结果 (Wt%)

Data	Na ₂ O	SiO ₂	FeO	MgO	CaO	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MnO	B ₂ O ₃	Total
1	2.56	32.01	6.23	3.94	0.72	0.00	38.73	0.14	14.63	98.96
2	2.68	32.12	5.29	4.96	0.60	0.05	37.75	0.12	14.88	98.44
3	3.20	33.83	10.58	3.37	0.06	0.00	33.10	0.21	14.89	99.24
4	3.13	33.03	5.96	4.79	0.26	0.01	36.18	0.10	15.26	98.74
5	3.15	34.03	9.53	3.64	0.04	0.01	32.76	0.13	14.22	97.48
6	3.21	33.42	11.20	2.83	0.02	0.00	32.27	0.25	13.78	96.98
7	3.10	34.36	10.54	3.63	0.02	0.00	32.06	0.14	13.21	97.06
8	3.33	33.35	8.60	3.97	0.21	0.02	34.64	0.23	13.54	97.89
9	2.65	33.13	8.77	5.25	1.24	0.00	33.15	0.28	14.54	99.01
10	2.69	32.61	7.37	4.70	1.12	0.00	35.66	0.21	13.18	97.54
11	3.08	32.66	7.43	4.00	0.62	0.00	36.57	0.25	12.64	97.23
12	2.52	32.08	9.41	2.77	1.20	0.00	36.92	0.33	12.08	97.29
13	2.56	35.07	8.97	3.29	0.16	0.01	35.41	0.17	13.42	99.06
14	2.65	33.69	8.87	3.36	0.14	0.03	35.42	0.23	12.93	97.32
15	3.28	32.52	13.09	1.88	0.10	0.01	33.73	0.24	12.21	97.05
Average	2.92	33.19	8.79	3.76	0.43	0.01	34.96	0.20	13.69	97.95

电气石族的化学通式为： $XY_3Z_6[T_6O_{18}][BO_3]_3V_3W$ ，X、Y、Z 三个位置的离子种类不同会影响电气石的分类和物理性质，其中，X=Na⁺，K⁺，Ca²⁺；Y=Li⁺，Mg²⁺，Fe²⁺，Mn²⁺，Al³⁺，Cr²⁺，V³⁺，Fe³⁺，Ti⁴⁺；Z=Mg²⁺，Al³⁺，Fe³⁺，V³⁺，Cr³⁺；T=Al³⁺，Si⁴⁺，B³⁺；V=OH⁻，O²⁻；W=OH⁻，O²⁻，F⁻。根据定量结果，按照阳离子的不同，可以把此电气石归类为以黑电气石和镁电气石为主形成的类质同象矿物，或有锂电气石的存在。自然界中广泛分布着这种电气石。

定量分析结果，特别是超轻元素 B，其氧化物含量的差异仅 1% 左右，这也是面分析测试 B 在振荡环带上分布特征较为困难的一个原因。

■ 结论

对某矿区采集的试样，使用岛津电子探针原位表征了其中的电气石的环带特征，获得了直观的面分布特征数据和不同环带特征位置上的定量测试结果，可为电气石中地质问题的认识和研究提供更高层次的参考。

岛津应用云

