

内蒙古道郎和都格矿区电气石期次及硼同位素特征

黄雪飞^{1,2}, 张宝林¹

¹中国科学院地质与地球物理研究所, 北京

²中国地质大学(北京), 北京

收稿日期: 2021年9月13日; 录用日期: 2021年10月19日; 发布日期: 2021年10月27日

摘要

内蒙古镶黄旗道郎和都格矿区位于华北地块北缘与西伯利亚板块南缘, 在成矿带上属于温都尔庙-白乃庙成矿带东段。矿区地表岩体与石英脉中广泛发育电气石化矿物, 且至少可分为早、晚两期。早期电气石, 棕色-褐色, 结晶较好, 呈柱状晶形; 晚期电气石, 深蓝-墨绿色, 结晶较差。区内电气石常出现特征的核-边结构。其硼同位素组成大部分落在与花岗岩有关的范围内, 少量样品富集¹¹B, 推测可能与岩浆去气作用有关, 该去气假设也得到C、H、O稳定同位素及其组成特征的佐证。

关键词

道郎和都格, 电气石, 期次, B同位素, 岩浆去气作用

Main Stages and Characteristics of Boron Isotope in Tourmaline in Daolangheduge Block, Inner Mongolia, Northern of China

Xuefei Huang^{1,2}, Baolin Zhang¹

¹Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing

²China University of Geosciences (Beijing), Beijing

Received: Sep. 13th, 2021; accepted: Oct. 19th, 2021; published: Oct. 27th, 2021

Abstract

Daolangheduge district is located in northern margin of North China Plate, and in the southern

margin of Siberia plate as well. Regionally, it belongs to east part of Ondor Sum-Bainaimiao metallogenic belt. Rich tourmaline zoning was found in this district. The tourmaline in Daolangheduge district could be classified into two stages. The earlier stage tourmaline, in brown-brown color, crystallization in columnar shape, is good. While later stage tourmaline, deep blue-blackish green color, with poorer crystallization extent. With regarding to boron isotopes in tourmaline, most of them are same as that of granite, closely related to hydro-fluid process, with a small amount samples enrich heavy boron isotopes, it is postulated that magma degassing cause later stage tourmaline rich in ^{11}B . Magma degassing hypothesis is also supported by C, H, O stable isotopes and their composition.

Keywords

Daolangheduge, Tourmaline, Two Stages, B Isotope, Magma Degassing Process

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

岩石学、矿物学的重要目标之一是研究岩石与矿床的形成过程及其成因, 而由于地质历史过程的复杂性, 无法重现历史, 所以对成岩、成矿过程的研究还主要借助该地质过程中形成的矿物和矿物组合等特征来推测分析。成岩成矿之后, 这些矿物或矿物组合还可能经历后期各种变化, 如风化、热液蚀变、变质作用等。所以寻找那些耐受性比较强的矿物, 并利用其去追溯早期地质演化历史成为了通行做法。研究表明[1] [2], 电气石即属于此类耐受性较强矿物, 其主量元素、微量元素及硼同位素特征常被用来判断电气石流体源区信息, 其中尤以硼同位素最为常用。前人针对全球不同岩性及不同地质环境中产出的电气石 B 同位素值进行的研究发现, 自然界岩石中大部分电气石的 $\delta^{11}\text{B}$ 值位于 $-30\text{‰} \sim +20\text{‰}$, 其变化区间达到 55‰。一般而言, 花岗岩、长英质片麻岩和片岩富集轻硼同位素。变质基性岩、大洋中脊、蚀变洋壳及海洋沉积物则富集重硼同位素[3] [4] [5] [6]。基于 $\delta^{11}\text{B}$ 这些特征, 可有效区分不同地质球境的硼源库。另外, 前人研究表明包括岩浆在内的地质流体在演化过程中可能会受到环境污染、结晶分异以及同位素分馏等造成硼同位素组成发生变化, 造成其源区指示作用的不准确。基于此, 前人建议在利用电气石硼同位素做源区判识时, 应与碳、氢、氧等其它稳定同位素特征相结合, 判断结果才会更准确[7]。

道郎矿区地表广泛发育侵入相岩浆岩, 且以中酸性岩浆岩为主。在相邻矿区对钻孔样品地化分析发现有钨矿化显示, 且矿区附近有黄花钨矿床, 已进行过开采。因此, 研究者多认为道郎矿区是发现钨、铜、金、锡多金属矿的远景区[8] [9]。多年来, 对这些金属矿的成矿环境和成矿过程了解甚少, 致使对矿体预测和定位存在较大困难。现场勘查发现这些矿床中都出现了不同程度的电气石化现象, 利用电气石来追溯与之共生的岩浆作用、成矿作用过程, 或许可成为揭开区内金属成矿的关键钥匙。事实上, 截至目前, 尚未见到前人在该地区对电气石开展过类似研究工作, 这为本研究提供了机遇。

鉴于此, 本文选取区内电气石作为研究对象, 综合利用矿区地表与钻孔实际资料, 首次对区内电气石产状进行现场观察描述, 尝试厘定其形成期次及特征, 利用其自身同位素以及伴生流体同位素特征等, 分析电气石形成的地质环境, 追溯其可能经历的演化过程等, 以期为该地区及类似区域矿床勘探开发提供有益借鉴。

2. 地质概况

道郎和都格矿区位于内蒙古自治区中部锡林郭勒盟镶黄旗东约 30 km 德勒哈达村附近, 面积约 25 km²。区域大地构造位置上, 位于中亚造山带东段温都尔庙 - 西拉木伦河断裂带以南, 华北地台北缘赤峰 - 白云鄂博断裂以北的白乃庙 - 温都尔庙俯冲增生带内(见图 1)。矿区地表草原和沙丘覆盖普遍。除第四系覆盖区外, 整个矿区出露的侵入岩, 主要包括角闪辉长岩、闪长岩、花岗闪长岩、英云闪长岩、黑云母二长花岗岩、钾长花岗岩、中细粒花岗岩与伟晶岩脉。同时, 矿区内还发育大量黑色或深褐色电气石, 主要呈脉状、网脉状产于岩体内, 或者与石英一起组成石英 - 电气石脉体产于二长花岗岩以及角闪辉长岩、闪长岩中。

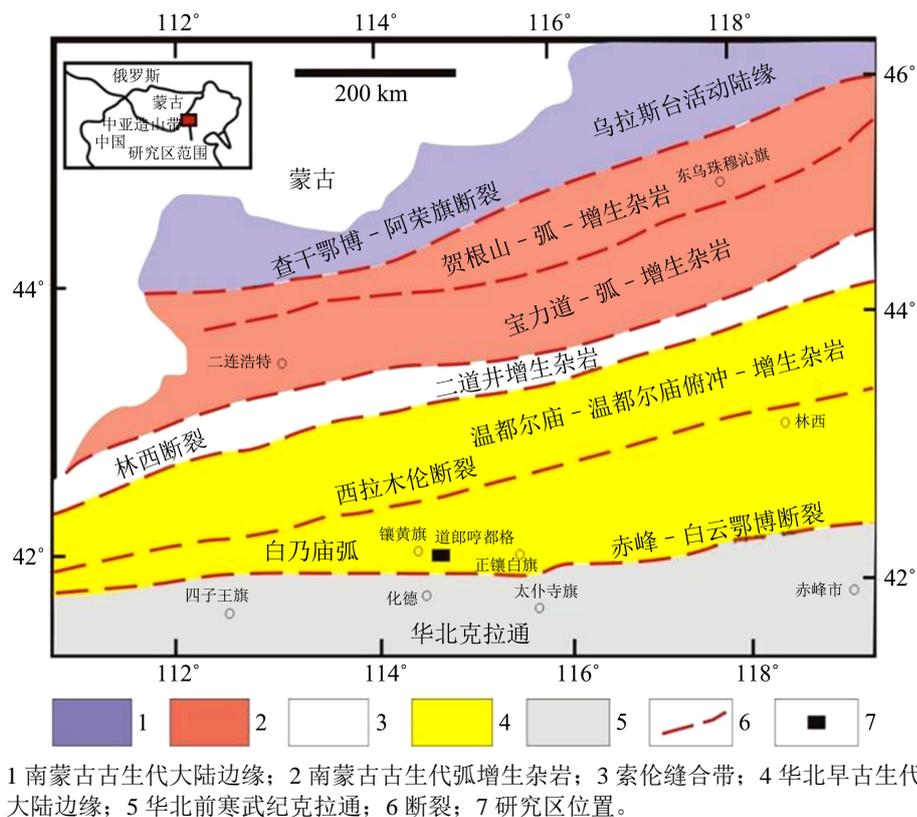


Figure 1. Tectonic background map of the study area (modified after literature [10] [11])

图 1. 研究区大地构造背景图(据文献[10] [11]修改)

3. 电气石产状及期次

3.1. 电气石产状

矿区内电气石化发育广泛, 呈两种产出状态: 以单矿物脉产于晚古生代(石英、花岗)闪长岩、花岗岩、伟晶岩脉等岩体中, 或与石英共生组成石英 - 电气石脉穿插岩体。单矿物脉体呈 NEE, NE 和 NNE-近 SN 向三组不同产状。石英 - 电气石脉中见绿帘石化、绿泥石化、黄铁矿化(黄铜矿化)。

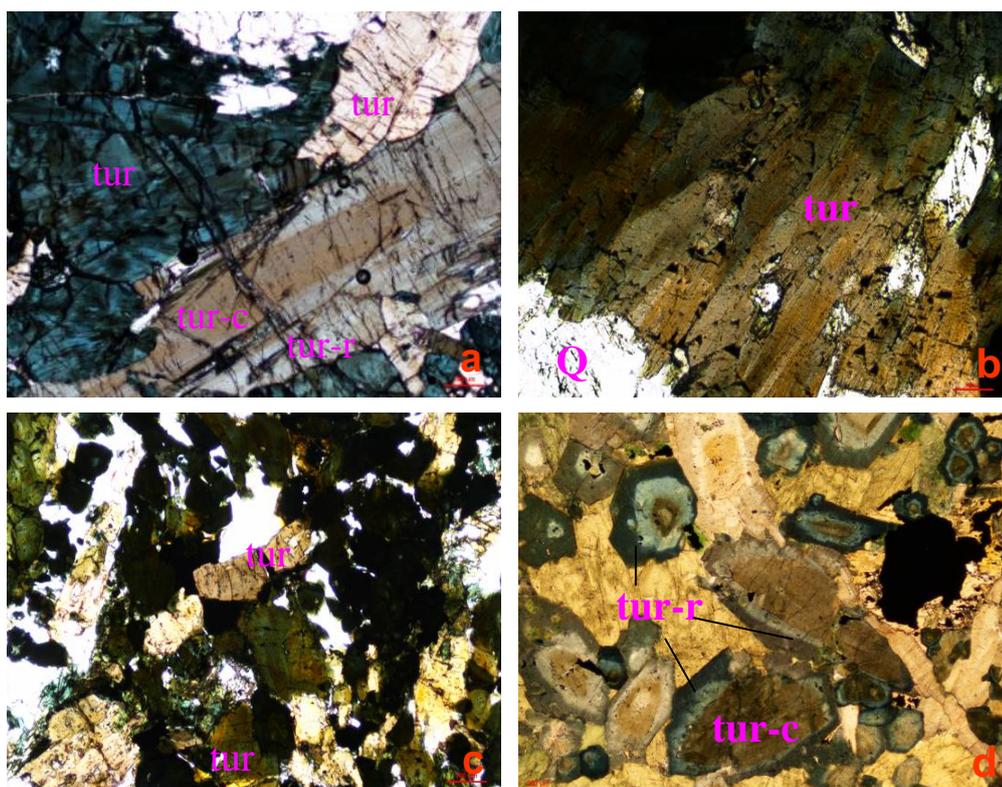
角闪辉长岩、闪长岩中出露电气石主要呈脉状、网脉状。在(黑云母)二长花岗岩节理面裂隙中发育大量电气石细脉, 宽约 0.1~1 cm, 长约 1~10 m, 脉体局部发育白云母。有的裂隙未见石英、电气石, 但可以见明显钾长石化蚀变。野外统计了数百条花岗岩电气石脉走向, 范围在 350°~20° (95%), 集中在 10°~20°,

有少量近东西向(小于 5%), 这些电气石脉常被 NE 向断裂右行错断, 断距常小于 5cm。在不同岩性中都能见到相互穿插的两期脉状电气石。

矿区中部、中西部二长花岗岩与角闪、辉长岩、闪长岩中出露的大石英 - 电气石脉, 其蚀变主要包括硅化、电气石化、绿帘石化和褐铁矿化, 局部见淋滤孔, 可能为硫化物流失所造成。野外观察显示厚层乳白色英脉呈 NE 向(45°~55°), 宽 2~4 m, 长 250~400 m; 电气石脉走向为 10°~20°, 宽 30 cm~3 m, 穿切石英脉, 石英角砾常被电气石胶结, 还有少量电气石以脉状或块体形式出现。

3.2. 电气石期次

根据电子显微镜下观察, 道郎矿区电气石至少可以分为两期: 1) 早阶段结晶较好的电气石, 颗粒呈长柱状或近六边形, 浅色 - 棕色或绿色 - 褐色, 多色性明显; 2) 晚阶段结晶较差的电气石集合体, 它形, 呈蓝色 - 墨绿色, 糙面显著, 多色性弱(见图 2)。



Q——石英, tur——电气石, tur——电气石核, tur-r——电气石边。长边长 2 mm: (a) DLT-4, 电气石块, 蓝色电气石集合体侵蚀交代褐色柱状电气石; (b) 褐色柱状电气石中心颜色较深, 边部颜色浅; (c) DLT-18, 可见柱状及近六边形电气石, 近六边形电气石具环带结构, 从核到边颜色从黄褐色 - 绿色, 柱状电气石呈浅褐色; (d) DL-10-B-1, 环带电气石核部为褐色, 边为褐红 - 墨绿色; 柱状电气石从核 - 边, 颜色从褐黄 - 浅白 - 褐红。

Figure 2. Microscopic photograph of tourmaline

图 2. 电气石镜下照片

影响电气石颜色的因素众多[12], 但通常认为其多色性主要由晶体所含元素(如 Ti、Fe、Mg、Ca、Mn)类型及含量差异引起的。一般而言, 无色电气石贫 Ti、Fe; 黄褐色电气石富 Ti、Mg, 易造成多色性, 褐色电气石较黄色电气石更富 Ca; 蓝色、绿色电气石相对富铁, 贫 Ti, 绿色电气石也可能由含铬、钒等

引起,多色性由强到弱,呈深蓝-浅蓝色,蓝色电气石 $Fe/(Fe + Mg)$ 位于 0.4~0.75;绿色电气石 $Fe/(Fe + Mg) > 0.75$; 而含锰电气石呈粉-粉红色。根据以上分析,推测道郎矿区电气石早阶段褐色-橙色电气石为富镁电气石,晚阶段蓝-绿色的电气石为铁电气石,其核-边结构颜色变化可能反映了从早阶段到晚阶段,电气石从镁电气石向铁电气石转变。

4. 电气石稳定同位素研究

4.1. 硼同位素

电气石硼同位素测试样品在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室完成。采用 LA-MC-ICP-MS 硼同位素微区原位测定方法。利用 LA-MC-ICP-MS, 采用标准-样品-标准(SSB)交叉法对仪器质量和同位素分馏进行校正。

本研究进行的硼同位素原位分析时,共计分析了 18 个样品,获得有效测试点 309 个,平均每个样品 17 个测试点,单个电气石样品中硼同位素变化范围见表 1。首先,单样品中硼同位素值变化较小(小于 4‰),表明样品中硼同位素分布相对均一稳定,测试结果具有代表性。其次,区内电气石硼同位素($\delta^{11}B$)值分布范围为-13.8‰~-3.7‰,考虑到 DLT-10、DLT-18、DLT-21、DLT-16-A 等样品硼同位素值变化较大(>7‰)外,绝大部分样品主要集中于-12‰~-8‰范围。

Table 1. Variation of boron isotopes in different samples in Daolang mining area

表 1. 道郎矿区不同样品中硼同位素的变化

样品号	电气石所在围岩	测试点数	Min	Max	变化区间
DLT-1	石英-电气石脉	14	-11.07252	-7.789766	3.28
DLT-4	黑色电气石	16	-8.264668	-4.939294	3.33
DLT-5	电气石	25	-10.72739	-8.114621	2.61
DLT-10	电气石绿帘石化	23	-13.27919	-6.150225	7.13
DLT-15-B	伟晶岩	11	-11.68779	-9.436377	2.25
DLT-14-A	花岗岩	27	-12.54206	-8.613019	3.93
DLT-14-B	花岗岩	17	-11.00917	-9.459532	1.55
DLT-18	花岗岩	27	-11.25338	-3.690601	7.56
DLT-22	花岗闪长岩	21	-11.3241	-8.732671	2.59
DLT-21	花岗闪长岩	14	-12.25001	-4.598046	7.65
DLT-20-B	花岗闪长岩与闪长岩接触	10	-11.4421	-8.8734	2.57
DLT-16-A	石英闪长岩,不同产状电气石	12	-11.41161	-1.514501	9.90
DLT-23-1	石英闪长岩	12	-11.51446	-9.457674	2.06
DLT-23-2	石英闪长岩	16	-9.981383	-7.7446	2.24
DLT-31	绿色闪长岩	17	-11.34613	-8.006429	3.34
DLT-32-B	绿色闪长岩	13	-12.51621	-9.469739	3.05
HHT-9-A,-B	强硅化蚀变花岗岩	18	-12.37587	-9.420147	2.96
HHT-2	石英脉中	16	-13.7695	-10.10754	3.66

4.2. H、O、C 同位素特征

为研究成矿流体来源, 分别对石英-电气石阶段代表性样品进行了氢氧同位素分析。将样品碎至40~80目, 磁选后在双目镜下挑出纯石英进行同位素测试分析。石英氧同位素测试在北京核工业地质研究所完成, 石英中流体包裹体碳、氢同位素测试在中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈构造演化国家重点实验室稳定同位素实验室完成。

利用测试样品流体包裹体均一温度平均值与经过压力校正后的温度值和 Clayton 的平衡方程($1000 \ln \alpha_{\text{石英-水}} = 3.38 \times 10^6 T^{-2} - 2.9$), 计算获得了与石英达到平衡时的成矿热液 $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$ 值(见表 2), 计算获得成矿热液 $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$ 值为 3.452‰~5.642‰, 直接测定流体包裹体获得的成矿热液 $\delta\text{D}_{\text{水}}$ 值为 -121.843‰~-56.201‰。在 δD - $\delta^{18}\text{O}$ 关系图上(见图 3), 石英-电气石脉热液投影点落在岩浆水左下方, 偏离了岩浆水的范围, 表明成矿流体已被参入大气降水成分, 为岩浆水和大气降水的混合物。

Table 2. Hydrogen and oxygen isotopic compositions of ore-forming fluids in Daolang mining area

表 2. 道郎矿区成矿流体氢氧同位素组成

样品号	$\delta^{18}\text{O}_{\text{石英}}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{水 V-SMOW}}$ (‰)	$\delta\text{D}_{\text{水 V-SMOW}}$ (‰)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$
DLX-6	13.1	5.642	-121.843	1.159
DLX-7	12.4	4.941	-102.984	-5.873
DLX-9	12.8	5.338	-100.363	-7.027
DLX-10	12	4.544	-98.771	-11.654
DLX-11	12.6	5.140	-89.072	-6.988
DLX-17	11.2	3.750	-56.201	-2.339
DLX-19	10.9	3.452	-94.411	-19.038
DLX-21	12.4	4.941	-115.479	-14.046
DLX-22	12.3	4.842	-105.4	-5.889
DLX-23	11.3	3.849	-101.687	-14.072
DLX-26	12.2	4.743	-99.849	-2.339

注: D、 ^{18}O 相对标准是 V-SMOW, ^{13}C 相对标准是 PDB。

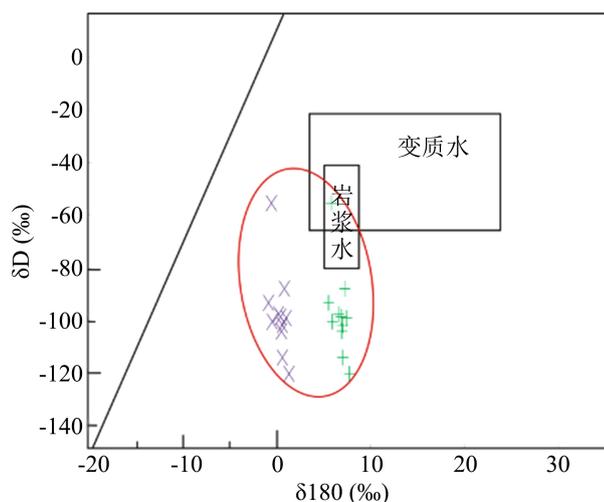


Figure 3. Hydrogen and oxygen isotope diagram of fluids in Daolang Mining area

图 3. 道郎矿区流体氢氧同位素图

5. 讨论

5.1. 硼同位素

在岩浆热液系统与变质热液系统中, 硼同位素可灵敏地指示硼以及相关流体来源[13] [14]。道郎矿区电气石中 $\delta^{11}\text{B}$ 位于 -12‰ ~ -8‰ 范围内, 正好与花岗岩起源的硼同位素值相一致[15] [16] [17] [18]。但道郎矿区中有少量样品硼同位素比值是高于 -7‰ 的, 该现象可能与以下地质作用相关: 1) 岩浆去气过程; 2) 重硼源区流体的注入。重硼同位素的来源主要有海水、海相碳酸岩、蒸发岩和俯冲板片等。而道郎矿区及周缘没有上述重硼同位素源区, 因此, 笔者推测其硼同位素高值可能主要与岩浆去气过程有关。在岩浆演化过程中, 当岩浆中气相过饱和时会出现去气过程, 在岩浆去气过程中会发生显著的同位素分馏现象, 研究发现对硼同位素来说, ^{11}B 倾向进入晚阶段的富气流体, 从而使晚阶段富气流体中形成的电气石中 $\delta^{11}\text{B}$ 增高[15]。

5.2. H、O、C 同位素

事实上, 在岩浆去气过程中并不仅仅是 B 会发生同位素分馏现象, C 和 H 同位素也会发生显著的同位素分馏现象。研究发现与 ^{12}C 和 ^1H 相比, ^{13}C 和 D 更倾向进入富气相中[15]。道郎矿区碳同位素测试结果表明, 其 $\delta^{13}\text{C}$ 分布范围为 -19‰ ~ -3‰ , 而岩浆去气过程会导致流体中亏损 ^{13}C , 这也与推测的岩浆去气过程相吻合。另外, 在道郎矿区电气石 δD - $\delta^{18}\text{O}$ 关系图上(见图 3), 石英-电气石脉热液投影点落在岩浆水左下方, 并偏离了岩浆水的范围, 这表明, 成矿流体中掺入了大气降水成分, 此时热液应为岩浆水和大气降水混合物。不仅如此, δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 呈近直立关系, $\delta^{18}\text{O}$ 值组成正常, 变化较小, 而 δD 值亏损, 变化较大, 佐证了岩浆去气过程[19]。

6. 结论

道郎矿区电气石发育广泛, 主要以单矿物或与石英一起组成石英-电气石岩脉穿插于晚古生代不同岩性岩体中。通过岩石薄片细致观察描述, 同位素测试分析等取得如下认识。

区内至少发育早、晚两期电气石, 其结晶程度和颜色存在明显差异。早期电气石结晶较好, 长柱状或近六边形状, 呈棕色-浅色或绿色-褐色, 多色性明显; 晚期电气石, 结晶程度稍差, 呈集合体形状, 以呈蓝色-墨绿色常见, 糙面显著, 多色性弱。两期电气石均具明显核-边结构, 从核部到边部颜色、成分具有一定差异。

区内电气石单样品-多样点测试 $\delta^{11}\text{B}$ 变化范围基本小于 4‰ , 表明硼同位素分布相对均一稳定, $\delta^{11}\text{B}$ 值集中分布在 -12.0‰ ~ -8.0‰ 之间, 与区内花岗岩中硼同位素值相一致, 表明其岩浆成因, 而硼同位素局部异常则指示了可能的岩浆去气过程。

与电气石伴生的成矿流体中 $\delta^{13}\text{C}$ 分布范围为 -19‰ ~ -3‰ , 表明成矿流体中掺入了大气降水, 热液实质上应为岩浆水和大气降水的混合物, 一定程度上佐证了岩浆曾发生了去气作用, 这在道郎矿区属于首次被发现。

参考文献

- [1] Kawakami, T. (2001) Boron Depletion Controlled by the Breakdown of Tourmaline in the Migmatite Zone of the Aoyama Area, Ryoke Metamorphic Belt, Southwestern Japan. *Canadian Mineralogist*, **39**, 1529-1546. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.39.6.1529>
- [2] Voll, G. (1969) Klastische Mineralien aus den Sedimentserien der Schottischen Highlands und ihr Schicksal bei aufsteigender Regional- und Kontaktmetamorphose. Habilitation Thesis, Technische Universität Berlin, Berlin.
- [3] Marschall, H.R., Altherr, R., Kalt, A. and Ludwig, T. (2008) Detrital, Metamorphic and Metasomatic Tourmaline in

- High-Pressure Metasediments from Syros (Greece): Intra-Grain Boron Isotope Patterns Determined by Secondary-Ion Mass Spectrometry. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **155**, 703-717. <https://doi.org/10.1007/s00410-007-0266-9>
- [4] Marschall, H.R., Korsakov, A.V., Luvizotto, G.L., Nasdala, L. and Ludwig, T. (2009) On the Occurrence and Boron Isotopic Composition of Tourmaline in (Ultra) High-Pressure Metamorphic Rocks. *Journal of the Geological Society*, **166**, 811-823. <https://doi.org/10.1144/0016-76492008-042>
- [5] Marschall, H.R., Ludwig, T., Altherr, R. and Kalt, A. (2006) Syros Metasomatic Tourmaline: Evidence for Very High- $\delta^{11}\text{B}$ Fluids in Subduction Zones. *Journal of Petrology*, **47**, 1915-1942. <https://doi.org/10.1093/petrology/egl031>
- [6] Martínez-Martínez, J.M., Torres-Ruiz, J., Pesquera, A. and Gil-Crespo, P.P. (2010) Geological Relationships and U-Pb Zircon and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Tourmaline Geochronology of Gneisses and Tourmalinites from the Nevado-Filabride Complex (Western Sierra Nevada, Spain): Tectonic Implications. *Lithos*, **119**, 238-250. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.07.002>
- [7] Slack and Trumbull (2011) Tourmaline as a Petrologic Forensic Mineral—A Unique Recorder of Its Geologic Past. *Elements*, **7**, 327-332. <https://doi.org/10.2113/gselements.7.5.327>
- [8] 毛景文, 陈毓川, 陈晴勋, 杨开泰. 中国桂北地区两类电英岩及其对成矿环境的指示[J]. 岩石矿物学杂志, 1990, 9(4): 289-300.
- [9] 蒋少涌, 于际民, 倪培, 凌洪飞. 电气石——成岩成矿作用的灵敏示踪剂[J]. 地质论评, 2000, 46(6): 594-604.
- [10] Xiao, W.J., Windley, B.F., Hao, J. and Zhai, M.G. (2003) Accretion Leading to Collision and the Permian Solonker Suture, Inner Mongolia, China: Termination of the Central Asian Orogenic Belt. *Tectonics*, **22**, 1069-1484. <https://doi.org/10.1029/2002TC001484>
- [11] 鲁颖淮, 李文博, 赖勇. 内蒙古镶黄旗哈达庙金矿床含矿斑岩体形成时代和成矿构造背景[J]. 岩石学报, 2009, 25(10): 2615-2620.
- [12] Taylor, B.E. and Slack, J.F. (1984) Tourmalines from Appalachian-Caledonian Massive Sulfide Deposits: Textural, Chemical, and Isotopic Relationships. *Economic Geology*, **79**, 1703-1726. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.79.7.1703>
- [13] Palmer, M.R. and Swihart, G.H. (1996) Boron Isotope Geochemistry: An Overview. *Mineralogy, Petrology, and Geochemistry*, **33**, 709-744.
- [14] Trumbull, R.B., Slack, J.F., Krienitz, M.-S., Belkin, H.E. and Wiedenbeck, M. (2011) Fluid Sources and Metallogensis in the Blackbird Co-Cu-Au-Bi-Y-REE District, Idaho, U.S.A.: Insights from Major Element and Boron Isotopic Compositions of Tourmaline. *Canadian Mineralogist*, **49**, 225-244. <https://doi.org/10.3749/canmin.49.1.225>
- [15] Jiang, S.Y. and Palmer, M.R. (1998) Boron Isotope Systematics of Tourmaline from Granites and Pegmatites: A Synthesis. *European Journal of Mineralogy*, **10**, 1253-1265. <https://doi.org/10.1127/ejm/10/6/1253>
- [16] Meyer, C., Wunder, B., Meixner, A., Romer, R.L. and Heinrich, W. (2008) Boron-Isotope Fractionation between Tourmaline and Fluid: An Experimental Re-Investigation. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **156**, 259-267. <https://doi.org/10.1007/s00410-008-0285-1>
- [17] Smith, M.P. and Yardley, B.W.D. (1996) The Boron Isotopic Composition of Tourmaline as a Guide to Fluid Processes in the Southwestern England Orefield: An Ion Microprobe Study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **60**, 1415-1427. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(96\)00007-5](https://doi.org/10.1016/0016-7037(96)00007-5)
- [18] van Hinsberg, V.J., Henry, D.J. and Dutrow, B.L. (2011) Tourmaline as a Petrologic Forensic Mineral: A Unique Recorder of Its Geologic Past. *Elements*, **7**, 327-332. <https://doi.org/10.2113/gselements.7.5.327>
- [19] 魏春生, 郑永飞. 中国东部 A 型花岗岩 D-18O 亏损机理: 去气 vs 水/岩交换[J]. 地球学报: 中国地质科学院院报, 1997, 18(A00): 257-259.