

青海不同矿区软玉地球化学特征及 Ar-Ar 定年研究

于海燕, 阮青锋, 廖宝丽, 李东升

(桂林理工大学 地球科学学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 为了探讨青海软玉的成矿物质来源、成矿环境及成矿年代, 对三岔口矿点、拖拉海沟矿点及大灶火矿点的样品进行了主量元素、微量元素、稀土元素及 Ar-Ar 法定年的测试。结果显示, 软玉样品的主量元素变化不大, 与透闪石的理论值相符; 微量元素差异较大, 说明不同矿点成矿环境不同; 稀土元素总量较低($0.29 \times 10^{-6} \sim 40.72 \times 10^{-6}$), Eu 中度负异常(0.49~0.84), 除大灶火青玉样品具左倾的重稀土元素富集模式[(La/Yb)_N = 0.16~0.61]外, 其他样品都具有右倾的轻稀土元素富集模式, (La/Yb)_N = 2.87~6.34。三岔口矿点、拖拉海沟矿点软玉样品的稀土元素分配曲线与纳赤台基性辉长岩相似, 大灶火矿点黄玉的稀土元素分配模式与二长花岗岩相似, 而青玉的分配模式与斜长花岗岩相似。样品的^TAl³⁺、^CAl³⁺和 Ti 含量变化表明, 翠青玉的成矿温度最高、压力最大, 黄玉成矿温度较高、压力较大; 烟青玉和青玉成矿温度较高、压力较低; 白玉、青白玉和糖玉成矿温度较低、压力较低。翠青玉和黄玉中明显较低的 Zr/Hf、Nb/Ta 和 Sr/Ba 值提示其成矿环境酸性明显加强。3 个矿点样品的成矿年代 301.38~237.28 Ma 介于晚石炭世—中三叠世之间, 属于印支-海西运动阶段。成矿年代均晚于侵入岩形成年代, 说明矿体经历了多次热液交代过程。

关键词: 软玉; 微量元素; 稀土元素; 成矿年代; 成矿环境

中图分类号: P578.955; P597+.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2018)04-0655-14

Geochemical characteristics and Ar-Ar dating of different deposits in Qinghai Province

YU Hai-yan, RUAN Qing-feng, LIAO Bao-li and LI Dong-sheng

(College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: In order to explore the metallogenetic substances, environment and ore-forming age of Sanchakou, Tuolahaigou and Dazaohuo nephrite deposits in NS-trending metallogenic belt of Qinghai, the authors conducted Ar-Ar dating and analysis of major elements, trace elements and rare earth elements (REE). Major elements analysis shows little change in all samples from three deposits, which is in accordance with theoretical value of tremolite. The content of rare-earth elements in all samples is generally lower ($0.29 \times 10^{-6} \sim 40.72 \times 10^{-6}$), with moderately negative Eu anomalies (0.49~0.84). Except for green nephrite, the chondrite-normalized REE patterns of samples exhibit relative light REE (LREE) enrichment and right-declined REE distribution patterns, with (La/Yb)_N values ranging from 2.87 to 6.34. Green nephrite samples are characterized by the enrichment of heavy REE (HREE) in the left-declined REE distribution patterns, with (La/Yb)_N values ranging from 0.16 to 0.61. REE distribution curves of samples from Sanchakou and Tuolahaigou nephrite deposits are similar to the patterns of Nachitai basic gabbro, and yellow nephrite samples from Dazaohuo deposit in northern metallogenic belt are similar to monzonitic granite, whereas green nephrite samples are similar to plagiogranite. The results indicate the source

收稿日期: 2017-08-07; 接受日期: 2018-05-16

基金项目: 广西自然科学基金资助项目(2014GXNSFAA118307); 桂林理工大学博士科研启动经费(002401003554)

作者简介: 于海燕(1973-), 女, 博士, 讲师, 从事珠宝教学, E-mail: 575976579@qq.com。

of mineralization of different deposits. The change of the content of Ti and Al_2O_3 in the sample shows changes in metallogenic temperature and pressure. The ratios of Zr/Hf, Nb/Ta and Sr/Ba in viridite and yellow nephrite samples are significantly lower than those of other samples, indicating that the alkalinity of metallogenic environment was obviously enhanced. The Ar-Ar dating shows that ore-forming ages of three deposits (301.38 ~ 237.28 Ma) are between Late Devonian to Middle Triassic, later than the geological age of intrusive rocks. The results indicate that Qinghai nephrite was mainly formed in the Hercynian-Indochina period, corresponding to multiple mineralization processes.

Key words: nephrite; trace elements; rare-earth elements; ore-forming age; metallogenic environment

Fund support: Guangxi Natural Science Foundation Funding Project(2014GXNSFAA118307); Science Research Start-up Funding for Doctor of Guilin University of Technology(002401003554)

青海软玉 1992 年发现于青海省东昆仑山中段海拔 4 000 m 以上的高山地区,1993 年被鉴定为透闪石玉(董必谦, 1996)。青海软玉储量大,易于开发,透明度高,质地细腻,颜色丰富,除了白玉、青白玉、青玉、碧玉、黄玉和墨玉外,还有其独特的品种翠青玉和烟青玉(刘永宏等, 2009)。国内学者在青海软玉的宝石学特征(李玉加等, 2002; 张攀等, 2011)、微观结构(冯晓燕等, 2004, 袁媛等, 2005)、矿物组成(李冉等, 2004; 周征宇等, 2008)、化学成分(王建军等, 2007; 汤红云等, 2012; 王兵, 2016)、致色(刘虹靓等, 2013; Yu *et al.*, 2016a; 罗泽敏等, 2017)等方面进行了大量研究,并取得了显著成果。但关于青海软玉的成矿物质来源、成矿环境和成矿年代方面的研究还存在欠缺,主要表现在:对青海软玉成因的研究多集中在三岔口玉矿(周征宇等, 2005, 2006; 毕思远, 2015; Yu *et al.*, 2016b),而无其他矿点的成因研究;对三岔口玉矿成因的研究多从岩相学、矿物学方面入手,缺乏地球化学方面的证据;青海软玉成矿年代的研究一直是空白。本文通过对来自青海不同矿区软玉样品全面而详细的主量元素、微量元素和稀土元素研究,并与矿区侵入岩进行对比,说明其成矿物质来源、成矿环境,同时,利用 Ar-Ar 法测定青海三大主要玉矿点的成矿年代。

1 地质背景

青海软玉矿床位于昆仑山脉中段的格尔木市大灶火西南山地区及昆仑东缘的格尔木纳赤台地区(董必谦, 1996),矿区以沙松乌拉山主脊为界可分为北玉石成矿区带和南玉石成矿区带(雷延祥, 2013)(图 1)。南玉石成矿带位于沙松乌拉山主脊

以南,赋存于上元古界万宝沟群碳酸盐岩组中,以白玉、青白玉为主,主要有没草沟、拖拉海沟、三岔口、九八沟矿点;北玉石成矿带位于沙松乌拉山主脊以北,产于元古界金水口岩群中,以青玉为主,主要有大灶火、向阳沟、胡热格里沟、拖拉海、福琨山矿点(图 1)。

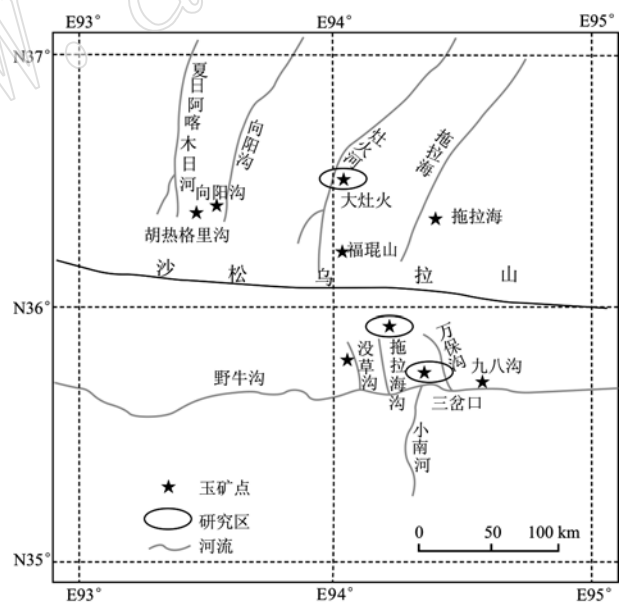


图 1 青海软玉成矿带及主要成矿区

Fig. 1 Map of metallogenic belt and main deposits of Qinghai nephrite

三岔口玉矿区出露的火成岩主要为基性辉长岩,矿体主要赋存于灰白色碳酸盐岩和火成岩接触带或附近的围岩裂隙中,主要有热液交代型和热液充填型两种成矿类型(周征宇等, 2005, 2006),产出的软玉按颜色可分为白玉、青白玉、青玉、烟青玉、翠青玉。其中烟青玉、翠青玉是青海软玉的独有品种(刘永宏等, 2009)。拖拉海沟玉矿区变质程度高,

局部可达到麻粒岩相,印支期中基性侵入岩呈岩基产出,矿体主要产自二叠纪-三叠纪碳酸盐岩与中基性侵入岩接触带,产出白玉和青白玉。因常年有水,对裸露地表的玉石侵蚀,形成“糖包白”、“糖包青”的优质品种。拖拉海沟玉石矿点的糖玉不同于其他产地的糖玉,糖色呈麻点状分布,油性稍差(吴国忠等, 2012)。大灶火玉矿区内岩浆岩发育,主要为华力西期中酸性侵入岩,岩性有浅灰色斜长花岗岩和浅肉红色斑状二长花岗岩,玉矿多赋存在接触带附近变质作用形成的灰白色方解石或白云石大理岩中,属接触变质型软玉矿床(王建军等, 2007),产出软玉主要有白玉、青白玉、青玉、碧玉、黄口料、糖玉。该矿点是青海黄口料软玉的唯一产地,也是青海青玉的主要产地(王建军等, 2007; 汤红云等, 2012)。

2 样品及分析方法

2.1 样品

本次工作选取了17个质地优良的青海软玉样品,其中2个白玉(B-2、B-4)、2个青白玉(QB-1、QB-2)、3个烟青玉(Y-1、Y-2、Y-3)、2个翠青玉(C-1、C-3)样品来自三岔口玉石矿点,3个糖玉样品(T-1、T-2、T-3)来自拖拉海沟玉石矿点,2个黄口料(H-1、H-2)和3个青玉(Q-1、Q-2、Q-4)样品来自大灶火玉石矿点。三岔口矿点样品于2014年在矿点实地采集,拖拉海沟和大灶火玉石矿点样品购买于青海格尔木软玉市场,已通过颜色和质地鉴定,确定了样品产地。

2.2 分析方法

根据岩石薄片鉴定结果,选择质地纯净、透闪石含量在95%以上的玉石样品,将其磨成200目粉末状,并加热到100℃恒温24 h干燥,然后置于干燥器中冷却至室温备用。所有样品的主量元素分析采用X射线荧光光谱法(XRF),测试地点为南京大学现代分析测试中心,所用仪器为瑞士ARL公司型号9800的X射线荧光光谱仪,分析精度为5%,误差小于0.3%。微量元素和稀土元素含量测试均在南京大学内生金属矿床国家重点实验室完成,仪器为德国Finnigan MAT公司型号为ELEMENT 2的质谱仪,元素含量大于 20×10^{-6} 时,精度为 $\pm 5\%$,小于 20×10^{-6} 时,精度为 $\pm 10\%$ 。

选取3个玉石矿点的10个软玉样品进行了Ar-Ar法定年,测试地点为台湾大学地质系同位素实验

室,测试仪器为英国NU公司Noblesse稀有气体同位素比值质谱仪,采用Ar-Ar阶段加热法定年测试,加热时段为15个,加热最高温度为1500℃。具体测试方法见冯乾文等(2012)和沈晓明等(2013)。

3 分析结果

所有样品的主量元素、微量元素和稀土元素分析数据见表1。

3.1 主量元素特征

由表1可以得出,17个软玉样品的主要成分为 SiO_2 、CaO和MgO,其中 SiO_2 含量为55.97%~57.98%,平均为57.03%;CaO含量为12.39%~14.81%,平均为13.14%;MgO含量为21.41%~24.94%,平均为23.81%。与透闪石理论值(SiO_2 、CaO和MgO含量分别为58.18%、13.18%和24.16%)(Ballirano *et al.*, 2008)相比, SiO_2 和MgO含量偏低,CaO含量基本一致。软玉样品的次要成分主要有 Al_2O_3 (0.09%~2.03%,平均0.61%)、FeO(平均0.90%)、 Fe_2O_3 (平均0.53%)。 SiO_2 和MgO含量偏低与样品中离子置换有关。 Al^{3+} (0.053 nm)和 Fe^{3+} (0.055 nm)与四面体T位置上的 Si^{4+} (0.040 nm)离子半径相近, Fe^{2+} (0.078 nm)与八面体 M_1 、 M_2 、 M_3 位置上的 Mg^{2+} (0.072 nm)离子半径相近,容易发生离子置换,导致 SiO_2 和MgO含量的减少。按照角闪石命名方法,所有玉石样品 $\text{Ca}_B \geq 1.5$, $(\text{Na} + \text{K})_A < 0.5$, $^{T}\text{Si}^{4+} = 7.78 \sim 7.94$, $\text{Mg}^{2+}/(\text{Mg}^{2+} + \text{Fe}^{2+}) = 0.90 \sim 0.99$,属于透闪石矿物范围(图2)。软玉主要化学组分 SiO_2 、MgO和CaO含量的变异系数(为标准差与其平均值的比值,主要用来

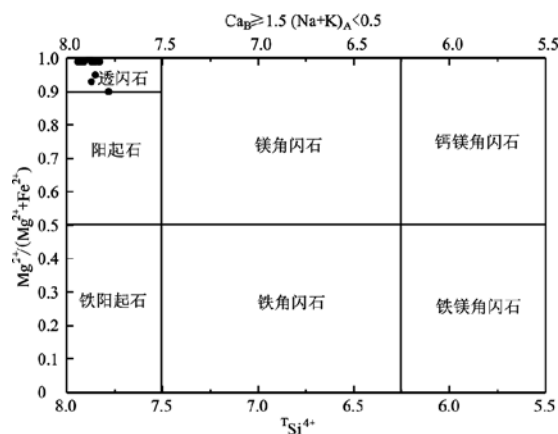


图2 软玉样品角闪石分类
Fig. 2 Antagonite classification of Qinghai nephrite

表 1 不同矿区软玉样品的主量元素 ($w_B/\%$)、微量元素和稀土元素 ($w_B/10^{-6}$) 分析数据
Table 1 Main elements ($w_B/\%$), trace elements and rare earth elements ($w_B/10^{-6}$) analysis data of Qinghai nephrite from different deposits

矿点 样号		三岔口矿点						拖拉海沟矿点						大灶火矿点				数值分析		
		B-2	B-4	QB-1	QB-2	Y-1	Y-2	Y-3	C-1	C-3	T-1	T-2	T-3	H-1	H-2	Q-1	Q-2	Q-4	平均	变异系数
主要元素氧化物																				
SiO ₂	57.79	57.32	57.42	57.98	56.99	56.53	56.88	56.98	57.01	57.71	57.33	57.33	56.98	56.83	56.01	56.47	55.97	57.03	0.01	
CaO	14.81	14.32	13.49	13.17	13.18	13.35	13.12	12.68	12.55	13.59	13.12	13.12	12.68	12.39	12.64	12.53	12.72	13.14	0.05	
MgO	24.75	24.16	24.94	24.68	24.19	24.03	23.95	23.35	23.39	24.19	24.40	24.40	23.69	23.82	21.41	22.53	22.84	23.81	0.04	
Al ₂ O ₃	0.09	0.13	0.10	0.21	0.95	0.69	0.55	2.03	1.55	0.15	0.15	0.15	0.57	0.49	1.06	0.63	0.61	0.59	0.92	
FeO	0.31	0.38	0.17	0.32	0.22	0.15	0.42	0.32	0.58	0.33	0.53	0.48	0.41	0.61	4.71	2.99	2.33	0.90	1.39	
TF ₂ O ₃	0.58	0.73	0.39	0.74	0.17	0.12	0.31	0.27	0.48	0.26	0.42	0.29	0.41	0.63	1.53	0.87	0.82	0.53	0.65	
MnO	0.04	0.04	0.04	0.10	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.06	0.08	0.07	0.02	0.02	0.17	0.20	0.12	0.06	0.91	
Na ₂ O	0.21	0.24	0.25	0.23	0.25	0.26	0.25	0.34	0.38	0.26	0.28	0.28	0.26	0.31	0.30	0.29	0.29	0.28	0.15	
K ₂ O	0.03	0.03	0.06	0.04	0.07	0.06	0.06	0.04	0.04	0.04	0.09	0.04	0.11	0.14	0.07	0.06	0.06	0.06	0.50	
P ₂ O ₅	0.04	0.03	0.03	0.03	0.06	0.04	0.04	0.04	0.05	0.03	0.04	0.01	0.13	0.04	0.02	0.04	0.04	0.04	0.61	
LOI	1.48	2.56	1.84	1.84	3.18	3.88	3.42	3.66	3.54	3.21	3.25	3.53	3.88	3.97	1.86	2.97	2.88	3.00	0.27	
Total	99.80	99.89	99.04	99.39	99.24	99.12	99.02	99.77	99.65	99.83	99.64	99.70	99.14	99.25	99.78	99.58	98.68	99.44	0	
晶体化学分析数据																				
^T Si ⁴⁺	7.83	7.86	7.88	7.91	7.87	7.88	7.91	7.85	7.87	7.94	7.91	7.92	7.94	7.93	7.78	7.87	7.85			
^T Al ³⁺	0.01	0.02	0.02	0.03	0.13	0.11	0.09	0.15	0.13	0.02	0.02	0.02	0.06	0.08	0.17	0.10	0.10			
Fe ³⁺	0.06	0.08	0.04	0.06	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.03	0.04	0.03	0.00	0.00	0.04	0.03	0.05			
Sum_ T	7.91	7.96	7.94	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	7.99	7.98	7.98	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00			
^C Al ³⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.18	0.13	0.00	0.00	0.00	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00			
^C Fe ³⁺	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.01	0.03	0.03	0.05	0.00	0.00	0.00	0.04	0.07	0.14	0.07	0.04			
^C Mg ²⁺	5.00	4.94	5.00	4.98	4.96	4.99	4.96	4.79	4.82	4.96	5.00	5.00	4.92	4.93	4.44	4.68	4.78			
^C Fe ²⁺	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.42	0.26	0.19			
^C Mn ²⁺	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
Sum_ C	5.00	4.99	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00			
^B Mg ²⁺	0.00	0.00	0.10	0.03	0.03	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.03	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00			
^B Fe ²⁺	0.04	0.00	0.02	0.04	0.03	0.02	0.04	0.04	0.06	0.00	0.06	0.06	0.05	0.07	0.10	0.09	0.09			
^B Mn ²⁺	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.02	0.02	0.01			
^B Ca ²⁺	1.96	2.00	1.87	1.92	1.95	1.98	1.95	1.87	1.86	2.00	1.91	1.91	1.89	1.85	1.88	1.87	1.90			
^B Na ⁺	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.06	0.05	0.05	0.01	0.01			
Sum_ B	2.01	2.01	2.01	2.01	2.01	2.01	2.00	2.00	2.00	2.08	2.08	2.08	2.00	2.00	2.05	2.00	2.01			
^A Ca ²⁺	0.19	0.11	0.11	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01			

续表 1-1
Continued Table 1-1

矿点 样号	三岔口矿点							拖拉海沟矿点					大灶火矿点				数值分析			
	B-2	B-4	QB-1	QB-2	Y-1	Y-2	Y-3	C-1	C-3	T-1	T-2	T-3	H-1	H-2	Q-1	Q-2	Q-4	平均	变异系数	
微量元素	^A Na ⁺	0.06	0.06	0.07	0.06	0.07	0.07	0.06	0.01	0.02	0.07	0.08	0.08	0.02	0.03	0.08	0.07	0.08		
	^A K ⁺	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.03	0.01	0.01	0.01		
	Sum_A	0.25	0.17	0.19	0.07	0.08	0.10	0.07	0.02	0.03	0.09	0.12	0.12	0.04	0.06	0.10	0.08	0.10		
	Mg ²⁺ /(Mg ²⁺ +Fe ²⁺)	0.99	0.99	1.00	0.99	0.99	1.00	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.90	0.93	0.95		
	Li	2.09	1.35	1.02	0.94	2.51	1.25	1.83	4.67	5.57	3.85	4.14	3.28	3.64	3.05	0.21	1.03	0.40		
Be	0.09	0.08	0.05	0.04	0.10	0.16	0.29	0.06	0.07	0.37	0.36	0.35	4.53	4.02	3.67	9.75	9.99			
Sc	0.18	0.20	0.33	0.83	0.49	0.49	0.62	4.05	3.37	0.30	0.14	1.25	0.83	1.00	0.40	0.35	0.81			
Ti	24.76	20.62	25.62	20.33	163.10	163.04	215.45	2564.13	2093.86	37.17	42.26	30.45	256.63	314.27	213.00	207.87	297.73			
V	2.39	0.61	2.14	1.07	10.16	6.77	18.24	68.38	82.79	4.71	2.94	1.87	8.61	7.11	5.66	6.41	4.30			
Cr	20.52	5.16	19.41	14.07	15.57	19.85	20.73	260.26	296.34	16.40	9.99	4.05	39.73	34.89	14.29	15.76	18.54			
Mn	333.57	364.00	293.95	315.11	77.16	37.36	119.64	128.11	155.65	556.20	643.00	550.79	195.87	161.20	1190.00	1539.15	1061.62			
Co	1.66	1.69	9.80	8.30	0.82	0.85	0.89	1.97	1.91	0.80	0.72	1.30	2.40	2.60	24.68	8.83	7.94			
Ni	3.84	3.24	11.00	11.77	9.69	10.85	10.06	38.08	35.14	4.05	3.68	7.84	34.55	37.44	38.81	20.36	21.89			
Cu	4.42	5.46	3.99	3.09	5.18	19.03	15.62	14.39	14.85	2.96	2.67	1.31	11.34	10.98	4.80	6.15	3.67			
Zn	11.26	10.35	15.18	15.87	63.45	107.78	107.25	184.52	136.14	53.92	54.17	54.08	95.73	129.74	34.70	44.14	24.48			
Ga	0.22	0.16	0.18	0.18	3.50	0.37	0.74	0.69	0.89	0.28	0.32	0.28	2.93	2.26	1.19	0.81	0.74			
Rb	0.54	0.68	0.82	1.20	2.40	1.39	1.41	3.07	4.15	0.34	0.62	0.64	1.54	1.29	4.96	1.50	2.43			
Sr	10.09	8.01	10.84	12.56	13.23	19.44	13.33	8.52	10.11	9.56	10.06	8.76	10.26	9.32	10.85	10.06	9.55			
Y	0.17	0.14	0.26	0.21	0.83	0.73	0.63	7.29	9.06	0.18	0.18	0.07	4.62	3.72	1.47	0.62	0.91			
Zr	1.44	1.43	0.66	0.69	6.53	6.93	7.93	22.99	22.23	1.19	1.25	1.26	20.06	20.75	17.06	17.83	17.55			
Nb	0.52	0.54	0.48	0.50	0.58	0.51	0.32	4.55	4.66	0.22	0.21	0.22	1.41	0.96	0.82	1.31	1.05			
Mo	0.48	0.58	1.22	1.39	0.06	0.07	0.05	0.09	0.10	0.12	0.33	0.38	0.24	0.21	1.68	1.68	0.25			
Sn	0.24	0.26	0.60	0.63	0.70	4.00	2.96	3.80	3.51	0.47	0.52	0.53	3.67	3.98	0.00	1.30	0.61			
Cs	3.09	0.89	0.58	0.41	0.18	0.54	1.98	0.67	0.65	3.07	3.76	1.02	1.07	1.12	0.76	0.96	2.77			
Ba	4.63	2.52	4.08	3.22	10.50	15.63	11.25	10.90	13.25	5.20	6.48	5.39	18.41	17.63	8.30	7.17	6.87			
Hf	0.02	0.02	0.01	0.01	0.12	0.13	0.15	0.64	0.64	0.02	0.02	0.02	0.76	0.71	0.29	0.31	0.30			
Ta	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.64	0.65	0.01	0.01	0.01	0.66	0.69	0.04	0.06	0.05			
W	0.54	0.43	0.70	0.66	14.41	4.26	2.73	3.06	3.02	0.29	0.32	0.29	3.92	3.97	0.06	0.89	0.91			
Pb	1.76	1.00	6.22	4.45	4.41	4.63	6.63	3.76	5.54	0.41	1.69	0.87	11.81	8.01	0.67	33.05	4.96			
Bi	0.36	0.05	0.90	0.51	0.01	0.23	0.12	0.00	0.44	0.22	0.35	0.04	0.44	0.00	2.67	2.17	0.69			
Th	0.04	0.00	0.07	0.04	0.22	0.20	0.17	3.88	6.82	0.04	0.09	0.01	1.39	0.79	0.13	0.09	0.20			

续表 1-2
Continued Table 1-2

矿点 样品	三岔口矿点							拖拉海沟矿点					大灶火矿点				数值分析		
	B-2	B-4	QB-1	QB-2	Y-1	Y-2	Y-3	C-1	C-3	T-1	T-2	T-3	H-1	H-2	Q-1	Q-2	Q-4	平均	变异系数
U	0.25	0.25	0.44	0.43	0.28	0.42	0.37	0.03	0.04	0.75	0.54	0.50	2.00	2.13	0.14	0.09	0.23		
Σ	429.19	429.74	410.57	418.53	406.22	426.94	561.41	3 343.20	2 911.45	703.10	790.82	676.86	739.05	783.84	1 581.31	1 839.70	1 501.44		
Zr/Hf	72.00	71.50	66.00	69.00	54.42	53.31	52.87	35.92	34.73	59.50	62.50	63.00	26.39	29.23	58.83	57.52	58.50		
Nb/Ta	26.00	27.00	24.00	25.00	19.33	17.00	16.00	7.11	7.17	22.00	21.00	22.00	2.14	1.39	20.50	21.83	21.00		
Sr/Ba	2.18	3.18	2.66	3.90	1.26	1.24	1.18	0.78	0.76	1.84	1.55	1.63	0.56	0.53	1.31	1.40	1.39		
稀土元素																			
La	0.06	0.08	0.11	0.15	0.45	0.72	0.57	2.87	3.81	0.14	0.13	0.17	3.37	2.54	0.16	0.11	0.05		
Ce	0.08	0.11	0.19	0.29	1.48	1.74	1.44	11.98	13.84	0.36	0.37	0.43	6.61	5.62	0.75	0.63	0.43		
Pr	0.01	0.01	0.03	0.04	0.14	0.14	0.11	2.33	2.38	0.02	0.02	0.05	0.56	0.54	0.05	0.02	0.02		
Nd	0.06	0.05	0.13	0.17	0.59	0.57	0.48	8.88	12.92	0.10	0.10	0.17	2.16	1.48	0.18	0.09	0.10		
Sm	0.02	0.02	0.03	0.04	0.12	0.13	0.11	2.11	2.53	0.02	0.03	0.04	0.52	0.43	0.05	0.03	0.02		
Eu	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.03	0.34	0.39	0.01	0.01	0.01	0.13	0.11	0.01	0.01	0.01		
Gd	0.02	0.02	0.02	0.04	0.12	0.11	0.10	1.18	1.28	0.02	0.03	0.03	0.55	0.46	0.08	0.04	0.06		
Tb	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02	0.27	0.30	0.00	0.00	0.01	0.12	0.10	0.02	0.01	0.02		
Dy	0.02	0.02	0.03	0.04	0.11	0.12	0.11	1.41	1.62	0.02	0.03	0.03	0.75	0.66	0.16	0.07	0.12		
Ho	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.24	0.27	0.00	0.01	0.01	0.14	0.13	0.04	0.02	0.03		
Er	0.01	0.01	0.02	0.02	0.06	0.06	0.06	0.55	0.67	0.02	0.02	0.01	0.38	0.31	0.21	0.07	0.10		
Tm	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.09	0.10	0.00	0.00	0.00	0.07	0.06	0.05	0.02	0.03		
Yb	0.01	0.02	0.01	0.03	0.06	0.08	0.07	0.48	0.54	0.01	0.02	0.02	0.44	0.39	0.48	0.12	0.20		
Lu	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.06	0.07	0.00	0.00	0.00	0.06	0.05	0.09	0.02	0.03		
ΣREE	0.29	0.35	0.58	0.85	3.21	3.75	3.14	32.79	40.72	0.72	0.77	0.98	15.86	12.88	2.33	1.26	1.22		
LREE	0.23	0.27	0.49	0.69	2.50	3.12	2.54	28.25	35.76	0.53	0.53	0.82	13.42	10.09	0.81	0.39	0.29		
HREE	0.07	0.09	0.09	0.15	0.40	0.45	0.40	4.67	5.43	0.09	0.11	0.11	2.51	2.17	1.13	0.36	0.58		
δCe	0.84	0.85	0.77	0.82	1.18	1.18	1.18	1.05	1.09	1.12	1.14	1.12	1.01	1.04	1.25	1.27	1.31		
δEu	0.50	0.52	0.53	0.45	0.52	0.57	0.84	0.54	0.52	0.66	0.65	0.61	0.74	0.77	0.68	0.49	0.81		
LR/HR	3.18	3.10	5.30	4.56	6.25	7.00	6.33	6.04	6.59	6.26	4.67	7.47	5.34	4.64	0.71	1.09	0.51		
(La/Yb) _N	3.00	2.87	4.82	3.34	5.30	5.86	5.34	4.08	4.81	6.34	3.89	6.30	5.18	4.39	0.23	0.61	0.16		
(La/Sm) _N	2.48	3.02	2.36	2.31	2.36	3.62	3.34	0.86	0.95	3.58	3.09	2.83	4.07	3.68	1.96	2.18	1.40		
(Gd/Yb) _N	0.93	0.79	0.94	0.97	1.63	1.09	1.13	1.69	1.84	1.21	1.02	1.48	1.01	0.96	0.14	0.25	0.24		

衡量数据的离散程度)为 0.01 ~ 0.05(表 1),表明软玉样品主要化学组分相对稳定,而次要元素 FeO、Fe₂O₃、Al₂O₃、MnO 含量的变异系数都比较高(>0.9),说明成矿环境的不同。

3.2 微量元素特征

软玉样品微量元素的含量差别比较大,介于 $410.57 \times 10^{-6} \sim 3\,343.20 \times 10^{-6}$ 之间(表 1)。Ti 和 Mn 的平均含量比较高,分别为 387.66×10^{-6} 和 432.03×10^{-6} ,其中翠青玉 Ti 的含量最高,青玉 Mn 的含量最高,其他微量元素的平均含量都低于 100×10^{-6} (表 1)。由图 3 可以得出,同一矿点相同颜色软玉样品的微量元素分配模式基本相同,不同玉矿及同一玉矿不同颜色的软玉样品微量元素的分配模式存在一定的差异。图 3a 中白玉、青白玉、烟青玉和图 3b 中的糖玉的微量元素分配模式基本相似,表现大离子亲石元素(LILE)较为富集,高场强元素(HFS)较为平坦,具有明显的 Cs、U 和 Pb 正异常;翠

青玉中 LILE 元素富集程度减弱,Cs、Th 和 Pb 正异常,U 和 Sr 出现负异常(图 3a)。黄玉 LILE 元素轻微富集,Cs、U 和 Pb 明显正异常而 Ti 和 Sr 为明显的负异常(图 3c);青玉中元素 Ti 出现轻微负异常,其他微量元素为正异常,其中 Rb、Cs、U、Ta、Pb 和 Hf 处有明显的尖峰。

3.3 稀土元素特征

软玉样品的稀土元素总量差异比较大,介于 $29 \times 10^{-6} \sim 40.72 \times 10^{-6}$ 之间。除翠青玉($32.79 \times 10^{-6} \sim 40.72 \times 10^{-6}$)和黄玉($12.88 \times 10^{-6} \sim 15.86 \times 10^{-6}$)外,其他颜色样品稀土元素含量都较低,白玉、青白玉、糖玉的稀土元素含量均低于 1×10^{-6} ,轻稀土元素(LREE)为 $0.23 \times 10^{-6} \sim 35.75 \times 10^{-6}$,重稀土元素(HREE)为 $0.07 \times 10^{-6} \sim 5.43 \times 10^{-6}$,LREE/HREE = 0.51 ~ 7.47, $(La/Yb)_N = 0.16 \sim 6.34$, $(La/Sm)_N = 0.86 \sim 4.07$, $(Gd/Yb)_N = 0.14 \sim 1.84$, $\delta Eu = 0.45 \sim 0.84$,具 Eu 中等负异常,

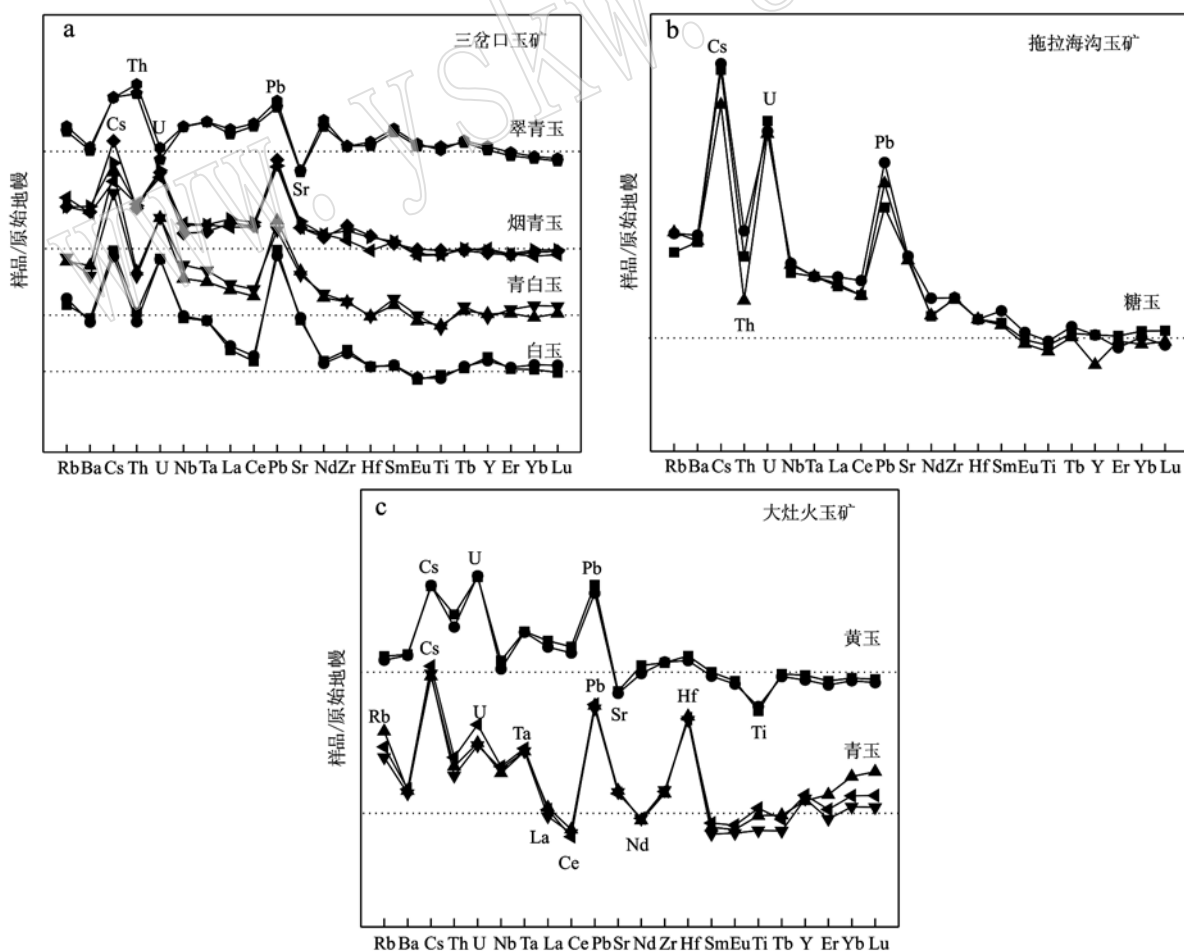


图 3 不同矿区软玉样品微量元素比值蛛网图

Fig. 3 The spider diagrams of trace element of Qinghai nephrite samples from three deposits

$\delta\text{Ce} = 0.77 \sim 1.31$, 具 Ce 中等负异常到轻微正异常 (表 1)。样品稀土元素总量差异大, 说明矿体具有不同的成矿来源及成矿条件。

由图 4 可以看出, 除青玉为重稀土元素明显富集、轻稀土元素较为亏损外, 其他样品都为轻稀土元素富集型, 重稀土元素较为平坦。

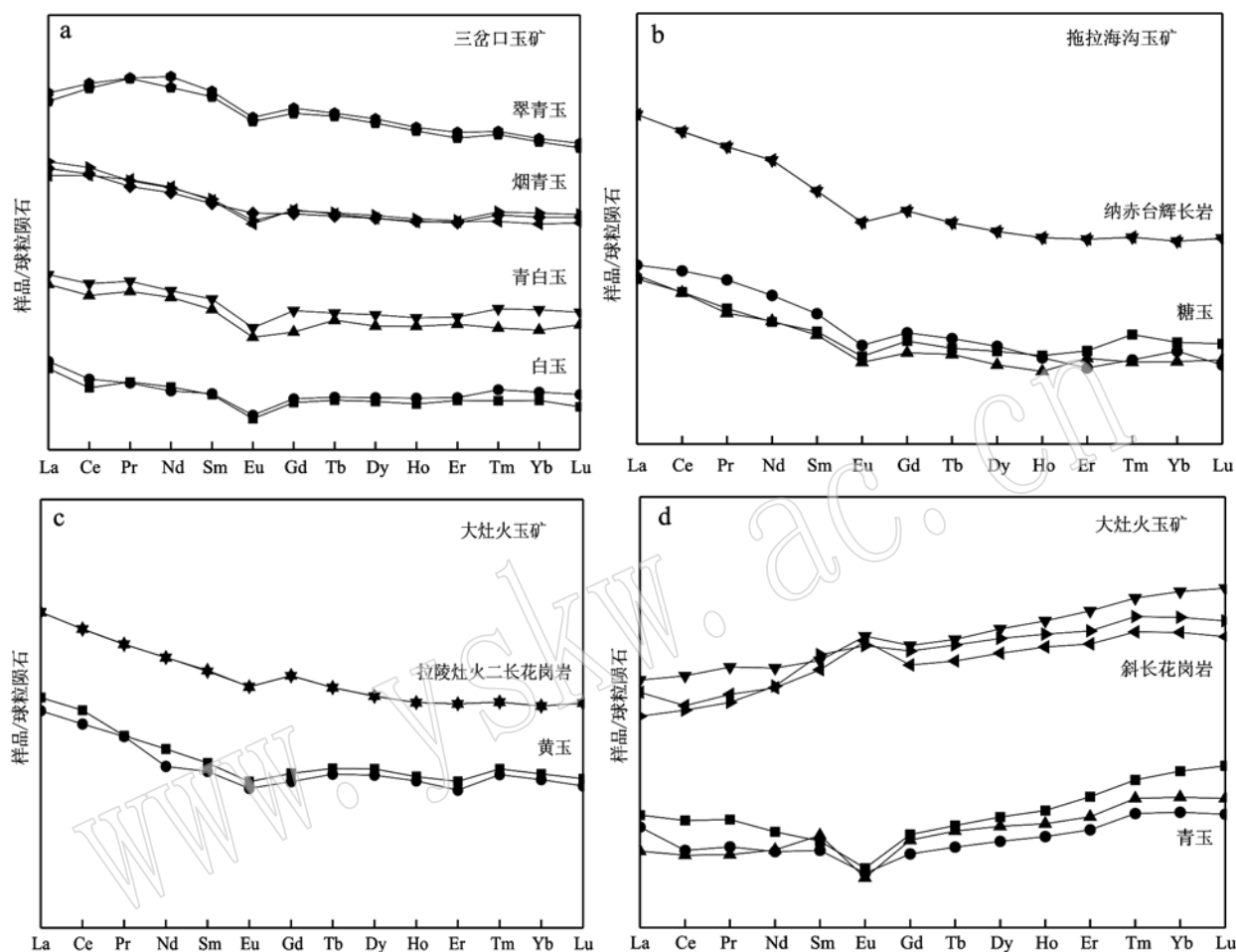


图 4 不同矿区软玉样品稀土元素分配模式图

Fig. 4 The rare earth element distribution patterns of Qinghai nephrite samples from three deposits

3.4 Ar-Ar 法定年数据

共选取了 10 个样品进行了 Ar-Ar 法定年, 其中样品 B-2、B-4、QB-2、C-1 和 T-1 的 K_2O 含量均低于 0.05%, 数据匹配程度较差, 结果不能视为有效的地质年龄。测试成功的样品有 5 个, 分别为样品 QB-1、Y-1 (三岔口玉石矿点), H-1、Q-1 (大灶火玉石矿点), T-2 (拖拉海沟玉石矿点)。样品 QB-1 的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 坪年龄为 240.59 ± 1.74 Ma, 等时线年龄为 238.98 ± 3.49 Ma; 样品 Y-1 的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 坪年龄为 247.86 ± 0.64 Ma, 等时线年龄为 247.51 ± 0.78 Ma; 样品 H-1 的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 坪年龄为 237.28 ± 1.14 Ma, 等时线年龄为 236.38 ± 1.25 Ma; 样品 Q-1 的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 坪年龄为 301.38 ± 1.54 Ma, 等时线年龄为 $301.25 \pm$

1.68 Ma; 样品 T-2 的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 坪年龄为 271.72 ± 22.44 Ma, 等时线年龄为 254.71 ± 29.46 Ma (图 5)。5 个样品的等时线年龄与坪年龄均在误差范围内, 反映所测样品的地质年龄真实可靠, 坪年龄代表样品的成矿年龄。

4 讨论

4.1 不同矿区的成矿来源

南部玉石成矿带的三岔口玉矿样品 (白玉、青白玉、烟青玉、翠青玉) 和托拉海沟玉矿样品 (糖玉) 的稀土元素分配模式相似 (图 4a、4b), 并与附近矿区纳赤台辉长岩稀土元素分配模式 (周征宇等, 2005,

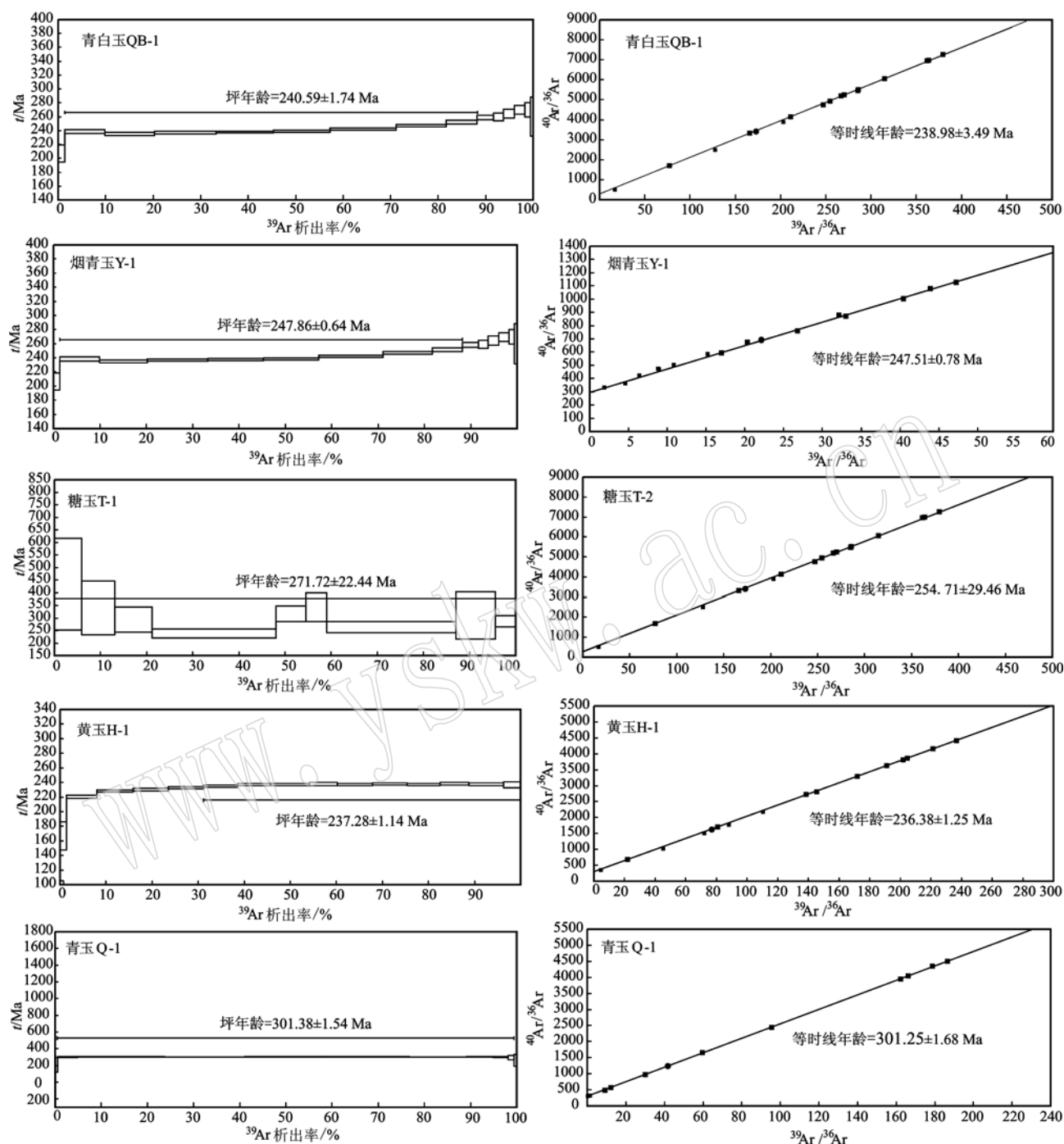


图5 不同矿区软玉样品的 Ar-Ar 定年图

Fig. 5 Ar-Ar plateau age and isochron age map of Qinghai nephrite samples from three deposits

2006)相似。纳赤台辉长岩轻稀土元素较为富集, $LREE/HREE = 4.30 \sim 5.35$, 具 δEu 中等负异常, 与三岔口玉矿和托拉海沟玉矿中样品稀土元素特征数据相似, 说明它们具有相似的起源。

大灶火玉矿中黄玉与青玉的稀土元素分配曲线差异较大(图4c、4d)。拉陵灶火地区二长花岗岩的

$LREE/HREE = 4.46 \sim 5.41$, $\delta Eu = 0.71 \sim 0.76$, 具有中等负 Eu 异常(陈静, 2013), 稀土元素特征数据和稀土元素分配模式与大灶火玉矿中黄玉相似(图4c、表1), 再结合该矿的地质条件, 推测黄玉的成矿与二长花岗岩有关(雷延祥, 2013)。而青玉主要产在灰白色斜长岩与白云质大理岩的接触带上(王建军

等,2007),其中斜长花岗岩产于蛇绿岩中,含有石榴石,其 $LREE/HREE = 0.52 \sim 0.89$, δEu 的正异常主要由斜长石的存在所致(胡培远等,2009),稀土元素分配模式与青玉相似(图 4d),因此认为青玉的成矿来源主要为斜长花岗岩。

4.2 不同矿区软玉的成矿环境

(1)根据角闪石的晶体化学性质, Al^{3+} 取代四面体 T 位置上的 Si^{4+} ,形成 $^TAl^{3+}$, Al^{3+} 还可取代八面体 M_1 、 M_2 、 M_3 位置上的 Mg^{2+} ,形成 $^CAl^{3+}$ 。一般来讲,若角闪石中 $^TAl^{3+}$ 含量高,代表 $^TAl^{3+}$ 代替 Si^{4+} 数

量大,形成温度高,而 $^CAl^{3+}$ 含量高,则显示其形成的压力大(陈光远等,1987;薛君治等,1991)。同时,角闪石中 Ti 的含量也与成矿温度有关,一般温度越高,角闪石中 Ti 的含量就越高(薛君治等,1991)。不同颜色软玉样品的晶体化学数据(表 1)表明, $^CAl^{3+}$ 只在翠青玉(0.183 ~ 0.121)和黄玉(0.017 ~ 0.043)中出现,说明成矿压力要高于其他样品。将不同颜色软玉样品的 $^TAl^{3+}$ 与 Ti 的含量按照从低到高的顺序排列,由图 6a、6b 可知,白玉、青白玉、糖玉成矿温度较低,黄玉、青玉、烟青玉的成矿温度较高,

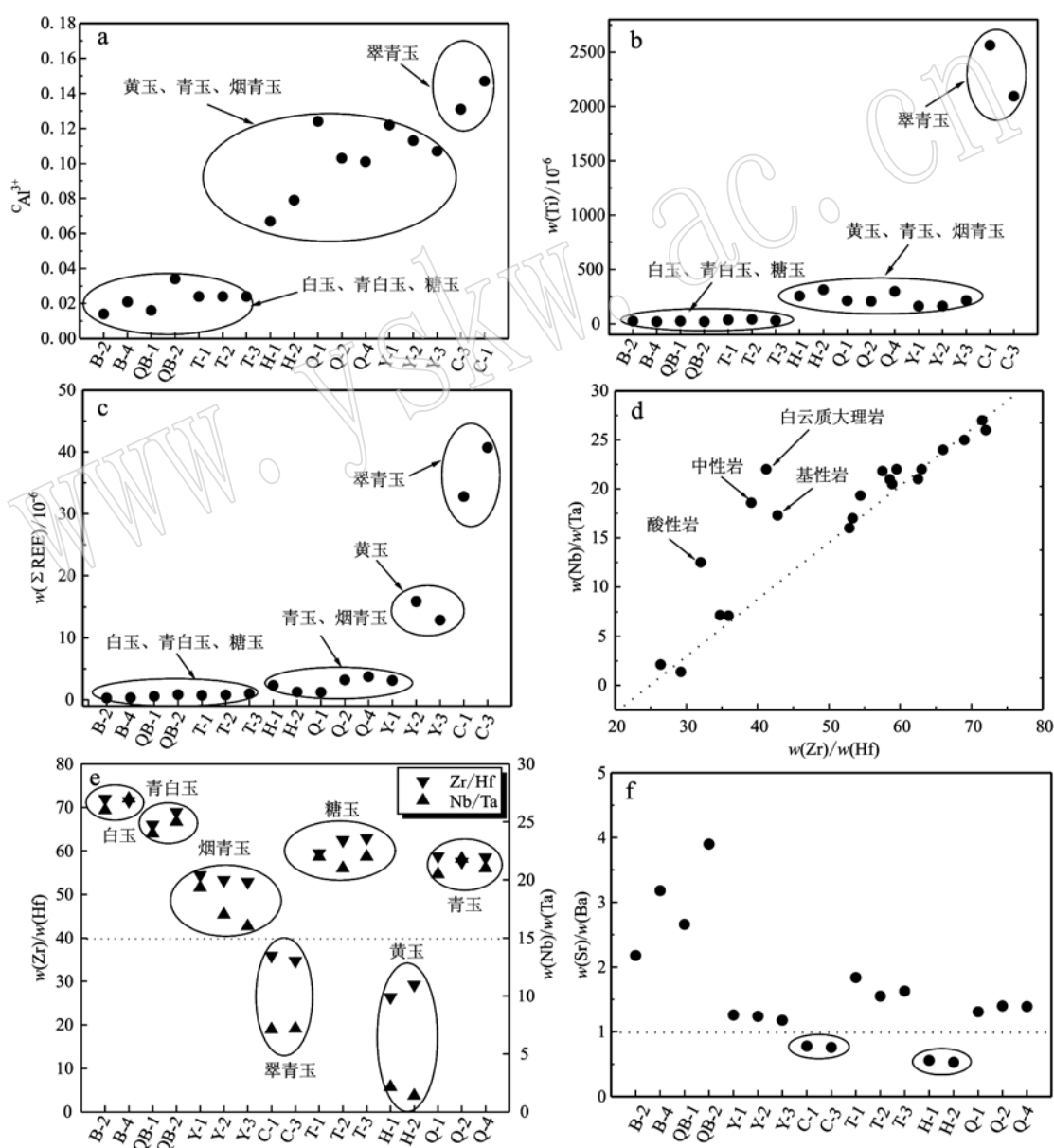


图 6 不同矿区软玉样品的特征元素及其比值图

Fig. 6 Characteristic element ratio diagrams of Qinghai nephrite samples from three deposits

翠青玉的成矿温度最高。翠青玉的成矿温度和压力明显高于其他颜色软玉,结合翠青玉产状特点(非单独成矿),可以推测翠青玉成矿为热液充填成矿类型。再将不同颜色样品的 $^T\text{Al}^{3+}$ 、 $^C\text{Al}^{3+}$ 、Ti 的含量数据进行对比,可以得出,白玉、青白玉、糖玉的成矿压力较小,成矿温度较低;烟青玉和青玉成矿压力较小,成矿温度较高;黄玉成矿压力较高,成矿温度较高;翠青玉成矿压力最高,成矿温度最高。青海软玉样品中稀土元素的含量与成矿温度和压力呈正相关关系(图 6c)。

(2) Zr 和 Hf、Nb 和 Ta 是地球化学性质相近的不相容元素对, Zr/Hf 和 Nb/Ta 值在不同地质背景和地质过程中不容易发生改变,但热液的性质对 Zr/Hf、Nb/Ta 值有一定的影响(Stolz, 1996)。将样品与基性岩、中性岩、酸性岩和白云质大理岩的 Zr/Hf 和 Nb/Ta 值比较(图 6d),发现偏移较大,说明 Zr/Hf 和 Nb/Ta 值主要受到成矿热液性质的影响。前人研究表明,Zr 相对于 Hf, Nb 相对于 Ta,在酸性溶液中的络合物能力要强,说明在酸性溶液中,Zr/Hf 和 Nb/Ta 值较大,在碱性溶液中,Zr/Hf 和 Nb/Ta 值会减小(Godfrey *et al.*, 1996; Firdaus *et al.*, 2008)。在青海软玉样品中,Zr/Hf 和 Nb/Ta 值在翠青玉中分别为 34.73 ~ 35.92 和 7.11 ~ 7.17,在黄玉中分别为 26.39 ~ 29.23 和 2.14 ~ 1.39(表 1),低于其他颜色样品的 Zr/Hf 和 Nb/Ta 值(52.87 ~ 72.00, 16.00 ~ 27.00)(表 1、图 6e),说明翠青玉和黄玉成矿时,不利于 Zr 和 Nb 的沉积,成矿环境趋于酸性。另一方面,翠青玉和黄玉中 Sr/Ba 值均小于 1,而其他样品 Sr/Ba 值均大于 1(图 6f)。Sr 和 Ba 的化学性质相似,Sr 的迁移能力及硫酸盐的溶解度远大于 Ba,因此在酸性环境中,Ba 先于 Sr 以 BaSO_4 的形式发生沉淀,从而导致 Sr/Ba 值减小。在沉积环境的研究中,以 Sr/Ba 值大于 1 对应海水沉积环境,小于 1 对应淡水沉积环境(钱焕菊等,2009),因此根据翠青玉和黄玉中 Sr/Ba 值也可以说明其成矿环境趋于酸性。

4.3 不同矿区软玉样品成矿年代分析

三岔口玉矿样品 QB-1 和 Y-1 的成矿年代分别为 240.59 ± 1.74 Ma 和 247.86 ± 0.64 Ma,可以推测三岔口玉石矿点成矿年代为早三叠世。拖拉海沟玉石矿点样品 T-2 的成矿年代为 271.32 ± 2.24 Ma,成矿年代为早二叠世。大灶火玉矿样品 H-1 的成矿年代为 237.28 ± 1.14 Ma,属中三叠世;样品 Q-1 的成矿年代为 301.38 ± 1.54 Ma,为晚石炭世。定年测试

结果表明青海软玉成矿年代为印支-海西构造阶段。3 个玉矿点的成矿年代跨度在 70 Ma 左右,说明青海软玉的成矿与多期岩浆作用有关。

东昆仑拉陵灶火地区产出的二长花岗岩锆石 U-Pb 年代学研究表明,该岩体的形成年龄为 396.2 ± 2 Ma(陈静等,2013),时代为中泥盆世早期。大灶火玉矿黄玉 H-1 和青玉 Q-1 成矿年代为中三叠世和晚石炭世,晚于侵入岩的成矿年代。三岔口玉矿和拖拉海沟玉矿的侵入岩主要为纳赤台群基性火山岩,地质年代为奥陶纪(440 ~ 500 Ma)(郭宪璞等,2006; 陈有炘等,2013),早于三岔口玉石矿点和拖拉海沟玉石矿点的成矿年代早三叠世和早二叠世。这说明青海软玉可能经过多期热液交代作用成矿,成矿年代晚于侵入岩时代。

5 结论

(1) 3 个矿区软玉的主量元素含量基本一致,都属于透闪石。微量元素分配模式表现为 LILE 轻度富集,变化较大,HFS 分布较为平坦。稀土元素分配模式除青玉外,均为右倾轻稀土元素富集型,青玉为左倾重稀土元素富集型。轻稀土元素与重稀土元素分馏较为明显, δEu 中等负异常, δCe 在白玉和青白玉中为中等负异常,在其他颜色软玉中表现为轻微正异常。

(2) 南部玉石成矿带的三岔口矿点和拖拉海沟矿点的成矿来源主要为辉长岩,北玉石成矿带大灶火矿点的黄玉和青玉分别与二长花岗岩和斜长花岗岩有关。

(3) $^T\text{Al}^{3+}$ 、 $^C\text{Al}^{3+}$ 、Ti 的含量数据表明,翠青玉的成矿温度和压力最高,结合成矿特点,可推断为充填交代作用。黄玉成矿温度和压力较高,青玉和烟青玉成矿温度较高但压力较低,白玉、青白玉和糖玉成矿温度和压力都较低。此外,青海软玉中稀土元素的含量与成矿温度和压力有一定正相关关系。黄玉和翠青玉的 Zr/Hf 和 Nb/Ta 值明显低于其他颜色的青海软玉样品,Sr/Ba 值小于 1,说明其成矿环境酸性增强。

(4) 定年结果表明,3 个不同矿区软玉成矿年代主要为晚石炭世—中三叠世,与青海软玉成矿阶段为印支-海西构造阶段的推测相符,但晚于侵入岩地质年代,说明经过多期热液成矿作用。

致谢 本文工作得到了本人博士导师南京大学王汝成教授的关心和帮助,桂林理工大学张良钜教授给予指导和建议,在此一并表示衷心的感谢!

References

- Ballirano P, Andreozzi G B and Belardi B. 2008. Crystal chemical and structural characterization of fibrous tremolite from Susa Valley, Italy, with comments on potential harmful effects on human health[J]. *American Mineralogist*, 93(8~9): 1 349 ~1 355.
- Bi Siyuan. 2015. The Gemological Characteristic and Cause Study of Nephrite in Nachitai Golmud Qinghai China[D]. Beijing: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).
- Chen Guangyuan, Sun Daisheng and Yin Huian. 1987. Genetic Mineralogy and Prospecting Mineralogy[M]. Chongqing Publishing House, 234 ~235(in Chinese).
- Chen Jing, Xie Zhiyong, Li Bin, *et al.* 2103. Petrogenesis of Devonian intrusive rocks in Lalengzaohuo area, eastern Kunlun, and its geological significance[J]. *Journal of Mineral. Petrol.*, 33(2): 26 ~34(in Chinese with English abstract).
- Chen Youxin, Pei Xianzhi, Li Ruibao, *et al.* 2013. Zircon U-Pb age geochemical characteristics and tectonic significance of meta-volcanic rocks from Nachitai Groups, east section of Kunlun[J]. *Earth Science Frontiers*, 20(6): 1 215 ~1 216(in Chinese with English abstract).
- Cui Ning. 2016. Quantitative Forecast Evaluation of Nickel in Dazaohuo, East Kunlun, Qinghai [D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese).
- Dong Biqian. 1996. Geological situation and characteristics of Qinghai nephrite from Golmud in Qinghai Province[J]. *Geol. Build Mater*, 87: 23 ~28(in Chinese).
- Feng Qianwen, Li Jinyi, Liu Jianfeng, *et al.* 2012. Ages and geological significance of the dark dykes emplaced in the Karamay pluton and adjacent area, in western Junggar, Xinjiang, NW China: Evidence from LA-ICP-MS zircon chronology and Ar-Ar amphibole chronology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(7): 2 158 ~2 170(in Chinese with English abstract).
- Feng Xiaoyan and Zhang Beili. 2004. Study on composition and texture characteristics of nephrite from Qinghai Province[J]. *Journal of Gems and Gemmology*, 6(4): 7 ~9(in Chinese with English abstract).
- Firdaus M L, Minami T, Norisuye K, *et al.* 2011. Strong elemental fractionation of Zr-Hf and Nb-Ta across the Pacific Ocean[J]. *Nature Geoscience*, 4(4): 227 ~230.
- Firdaus M L, Norisuye K, Nakagawa Y, *et al.* 2008. Dissolved and labile particulate Zr, Hf, Nb, Ta, Mo and W in the western North Pacific Ocean[J]. *Journal of Oceanography*, 64(2): 247 ~257.
- Guo Xianpu, Wang Naiwen, Ding Xiaozhong, *et al.* 2006. Palaeontological proof of the Naij Tal Group-Complex as mélange aggregation in the eastern Kunlun orogenic belt and its geologic significance[J]. *Geological Review*, 52(3): 289 ~294(in Chinese with English abstract).
- Hu Peiyuan, Li Cai, Li Linqing, *et al.* 2009. Geochemical characteristics of Early Palaeozoic plagioclase granite from ophiolitic cumulate in central Qiangtang, northern Tibet, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 28(9): 1 297 ~1 308(in Chinese with English abstract).
- Jin Bingfu, Yue Wei and Wang Kunshan. 2013. The crystallochemistry characteristics and genetic analysis of amphibole in the sediments the Huanghe River[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 35(1): 131 ~143(in Chinese with English abstract).
- Lei Yanxiang. 2013. Golmud Jade Ore Geological Characteristics and Ore-prospecting Criteria of Fukunshan, in Golmud Qinghai Province [D]. Beijing: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).
- Li Ran, Liao Zongting, Li Yujia, *et al.* 2004. Wollastonite in Qinghai nephrite jade and its significance[J]. *Journal of Gems and Gemmology*, 6(1): 17 ~19(in Chinese with English abstract).
- Li Yujia, Liao Zongting and Shi Xiaming. 2002. Contrast research between Qinghai nephrite and Xinjiang nephrite[J]. *Shanghai Geology*, 3: 58 ~61(in Chinese).
- Liu Hongliang, Yang Mingxing, Yang Tianxiang, *et al.* 2013. Study on colour and gemmological characteristics[J]. *Journal of Gems and Gemmology*, 15(1): 7 ~14(in Chinese with English abstract).
- Liu Yonghong and Guo Tingfeng. 2009. Study on nephrite Qinghai Province[J]. *Qinghai National Territory*, (2): 42 ~43(in Chinese).
- Luo Zemin, Shen Xitian and Yang Mingxing. 2007. Study on color quantitative expression, replication and color origin of gray-purple nephrite from Qinghai, China based on spectroscopy method[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 37(3): 822 ~828(in Chinese with English abstract).
- Qian Huanju, Lu Xiancai, Zhang Xuefen, *et al.* 2009. Spatial paleosalinity distribution and element geochemistry of argillaceous source

- rocks in the upper part of 4th Member of Tertiary Shahejie Formation in Dongying Sag [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 28(2): 161 ~ 168 (in Chinese with English abstract).
- Shen Xiaoming, Zhang Haixiang and Ma Lin. 2013. Zircon U-Pb and amphibole $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of Kuerti ophiolite in Altay and geological implication[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 33(3): 394 ~ 405 (in Chinese with English abstract).
- Stolz A J. 1996. Fluid and melt-related enrichment in the subarc mantle: Evidence from Nb/Ta variations in island-arc basalts[J]. *Geology*, 24(7): 587 ~ 590.
- Tang Hongyun, Qian Weiji, Lu Xiaoying, *et al.* 2012. Geological and composition feature of nephrite from Qinghai province[J]. *Journal of Gems and Gemmology*, 14(1): 24 ~ 31 (in Chinese with English abstract).
- Wang Bing. 2016. Comparative study on the characteristics and structures between Xinjiang and Qinghai nephrite[J]. *Journal of Xinjiang Vocational University*, 24(3): 80 ~ 83 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jianjun, Gan Yanhui, Li Jian, *et al.* 2007. Aanalysis on nephrite conditions and discovery prospects in Dazaohuo area in Qinghai Province[J]. *Plateau Earthquake Research*, 19(4): 47 ~ 51 (in Chinese with English abstract).
- Wu Guozhong, Liu Yonghong, Yang Hongjun, *et al.* 2012. Study on Kunlun Nephrite[M]. Beijing: Geological Publishing House, 30 ~ 100 (in China).
- Xue Junzhi, Bai Xuerang, Chen Wu, *et al.* 1991. Genetic Mineralogy [M]. Beijing: China University of Geosciences Press, 1 ~ 161 (in Chinese).
- Yu Haiyan, Wang Rucheng, Guo Jichun, *et al.* 2016a. Color-inducing elements and mechanisms in nephrites from Golmud, Qinghai, NW China: Insights from spectroscopic and compositional analyses[J]. *Journal of Mineralogical & Petrological Sciences*, 59: 1 597 ~ 1 609.
- Yu Haiyan, Wang Rucheng, Guo Jichun, *et al.* 2016b. Study of the mineralogical mechanism and origin of Qinghai nephrite from Golmud, Qinghai, northwest China[J]. *Chinese Science: Earth Science*, 59(8): 1 ~ 13.
- Yuan Yuan, Liao Zongting and Zhou Zhengyu. 2005. Study on compositions and micro-textures of water-line in nephrite from Qinghai Province[J]. *Shanghai Geology*, (4): 68 ~ 70 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Pan, Liu Xifeng, Li Jingyan, *et al.* 2011. Comparative analysis of germological characteristics of brown-white nephrite from Xinjiang, Qinghai and Russia[J]. *Journal of Gems and Gemmology*, 13(4): 31 ~ 38 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Zhengyu, Liao Zongting, Chen Ying, *et al.* 2008. Rock mineralogical characteristics of Qinghai nephrite[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 27(1): 17 ~ 20 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Zhengyu, Liao Zongting, Ma Tingting, *et al.* 2005. Study on ore-forming type and genetic mechanism of Sanchakou nephrite deposit in Qinghai Province [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 39(9): 1 191 ~ 2 000 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Zhengyu, Liao Zongting, Ma Tingting, *et al.* 2006. Study on the genetic mechanism and material source of Sanchakou nephrite deposit in East Kunlun[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 21(3): 195 ~ 198 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 毕思远. 2015. 青海格尔木纳赤台软玉的玉石学特征及成因分析 [D]. 北京: 中国地质大学.
- 陈光远, 孙岱生, 殷辉安. 1987. 成因矿物学与找矿矿物学[M]. 重庆: 重庆出版社, 234 ~ 235.
- 陈静, 谢智勇, 李彬, 等. 2013. 东昆仑拉陵灶火地区泥盆纪侵入岩成因及其地质意义[J]. *矿物岩石*, 33(2): 26 ~ 34.
- 陈有炘, 裴先治, 李瑞保, 等. 2013. 东昆仑东段纳赤台岩群变火山岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其构造意义[J]. *地学前缘*, 20(6): 1 215 ~ 1 216.
- 崔宁. 2016. 青海东昆仑大灶火区域镍矿定量预测与评价[D]. 北京: 中国地质大学.
- 董必谦. 1996. 青海省格尔木玉地质简况及玉石特征[J]. *建材地质*, (5): 23 ~ 24.
- 冯乾文, 李锦轶, 刘建峰, 等. 2012. 新疆西准噶尔克拉玛依岩体中暗色岩墙的形成时代及地质意义——来自锆石 LA-ICP-MS 和角闪石 Ar-Ar 定年的证据[J]. *岩石学报*, 28(7): 2 158 ~ 2 170.
- 冯晓燕, 张蓓莉. 2004. 青海软玉的成分及结构特征[J]. *宝石和宝石学杂志*, 6(4): 7 ~ 9.
- 郭宪璞, 王乃文, 丁孝忠, 等. 2006. 东昆仑纳赤台岩群混杂堆积的古生物学证据及其地质意义[J]. *地质论评*, 52(3): 289 ~ 294.
- 胡培远, 李才, 李林庆, 等. 2009. 藏北羌塘中部早古生代蛇绿岩堆晶岩中斜长花岗岩的地球化学特征[J]. *地质通报*, 28(9):

- 1 297 ~ 1 308.
- 金秉福, 岳伟, 王昆山. 2013. 黄河沉积中角闪石矿物晶体化学特征和成因分析[J]. 海洋学报, 35(1): 131 ~ 143.
- 雷延祥. 2013. 青海省格尔木市福琨山玉石矿地质特征与找矿标志[D]. 北京: 中国地质大学.
- 李冉, 廖宗廷, 李玉加, 等. 2004. 青海软玉中硅灰石的确定及其意义[J]. 宝石和宝石学杂志, 6(1): 17 ~ 19.
- 李玉加, 廖宗廷, 史霞明. 2002. 青海软玉与新疆软玉的对比研究[J]. 上海地质, (3): 58 ~ 61.
- 刘虹靓, 杨明星, 杨天翔, 等. 2013. 青海翠青玉的宝石学特征及颜色研究[J]. 宝石和宝石学杂志, 15(1): 7 ~ 14.
- 刘永宏, 郭廷锋. 2009. 试论青海昆仑(软)玉[J]. 青海国土经略, (2): 42 ~ 43.
- 罗泽敏, 沈锡田, 杨明星. 2017. 青海三岔口灰紫色软玉颜色定量表达与紫色成因研究[J]. 光谱学与光谱分析, 37(3): 822 ~ 828.
- 钱焕菊, 陆现彩, 张雪芬, 等. 2009. 东营凹陷沙四段上部泥质烃源岩元素地球化学及其古盐度的空间差异性[J]. 岩石矿物学杂志, 28(2): 161 ~ 168.
- 沈晓明, 张海祥, 马林. 2013. 新疆阿尔泰山地区库尔提蛇绿岩的锆石 U-Pb 和角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学及其地质意义[J]. 桂林理工大学学报, 33(3): 394 ~ 405.
- 汤红云, 钱伟吉, 陆晓颖, 等. 2012. 青海软玉产出的地质特征及物质成分特征[J]. 宝石和宝石学杂志, 14(1): 24 ~ 31.
- 王兵. 2016. 新疆和田玉与青海和田玉结构特征的对比研究[J]. 新疆职业大学学报, 24(3): 80 ~ 83.
- 王建军, 甘艳辉, 李健, 等. 2007. 大灶火玉石矿成矿条件及找矿远景分析[J]. 高原地震, 19(4): 47 ~ 51.
- 吴国忠, 刘永宏, 杨红军, 等. 2012. 昆仑玉鉴[M]. 北京: 地质出版社, 30 ~ 100.
- 薛君治, 白学让, 陈武, 等. 1991. 成因矿物学[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1 ~ 161.
- 袁媛, 廖宗廷, 周征宇. 2005. 青海软玉水线的物相分析和微观形貌研究[J]. 上海地质, (4): 68 ~ 70.
- 张攀, 刘喜锋, 李竞妍, 等. 2011. 新疆、青海、俄罗斯糖白玉的宝石学特征对比分析[J]. 宝石和宝石学杂志, 13(4): 31 ~ 38.
- 周征宇, 廖宗廷, 陈盈, 等. 2008. 青海软玉的岩石矿物学特征[J]. 岩矿测试, 27(1): 17 ~ 20.
- 周征宇, 廖宗廷, 马婷婷, 等. 2005. 青海三岔口软玉成矿类型及成矿机制探讨[J]. 同济大学学报(自然科学版), 33(9): 1 191 ~ 2 000.
- 周征宇, 廖宗廷, 马婷婷, 等. 2006. 东昆仑三岔口软玉成矿机制及成矿物源分析[J]. 地质找矿论丛, 21(3): 195 ~ 198.