

北祁连东草河蛇绿岩：一个早古生代的洋壳残片

曾建元 杨怀仁* 杨宏仪 刘敦一 蔡金郎 吴汉泉^③ 左国朝^④

(成功大学地球科学系, 台南 701; 中国地质科学院地质研究所, 北京离子探针中心, 北京 100037; 西安地质矿产研究所, 西安 710054; 甘肃地质调查局, 兰州 730000. * 联系人, E-mail: hjyang@mail.ncku.edu.tw)

摘要 位于北祁连山俯冲杂岩带南面的东草河蛇绿岩是一个构造移置岩块(大小为 3 km × 6 km). 其下部岩石组合为多期次侵入的岩床状堆晶纯橄岩-橄长岩-斜(钙)长岩-斜(钙)长质辉长岩-辉长岩系列, 其中可见不谐合的纯橄岩-橄长岩侵入体. 往上过渡到均质的辉长岩-苏长质辉长岩系列, 顶部则有辉绿岩质岩墙与玄武岩质熔岩. 矿物结晶顺序为橄榄石±铬尖晶石→斜长石→单斜辉石→斜方辉石→钛铁氧化物矿物. 堆晶岩中的铬尖晶石成分(Mg#: 42-66, Cr#: 41-57)类似于现今的洋壳特征. 堆晶岩石与均质岩石系列中的斜长石与单斜辉石成分变化, 反映了岩浆结晶分异的过程且与现今的洋壳成分特征相似. 辉绿-玄武质熔岩的全岩地球化学成分与 N-MORB 类似. 东草河蛇绿岩组成岩石群的 REE 与微量元素蛛网图分布特征显示它们是 N-MORB 岩浆分异的结果. 利用 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年法, 获得苏长质辉长岩的锆石 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为(497 ± 7) Ma, 代表东草河蛇绿岩的构造侵位年龄. 由岩石建造、矿物化学、全岩地球化学与定年学的研究结果, 可以确认东草河蛇绿岩是一个古祁连洋洋壳残片, 为古祁连洋向北俯冲的一个重要标志.

关键词 蛇绿岩 北祁连 洋壳 东草河

蛇绿岩是海洋岩石圈的残片 [1], 是产于洋盆扩张脊的洋壳+地幔的岩石组合 [2]. 中国蛇绿岩岩石组合的保存情况, 差异相当大, 通常是以蛇绿混杂岩的形式产出, 罕见岩石组合发育齐全且具层序性的蛇绿岩 [2]. 最近, 我们在野外岩石建造、岩相学与地球化学研究的基础上, 在北祁连造山带的俯冲杂岩带南面东草河上游发现保存完整的洋壳残片, 并命名为东草河蛇绿岩. 本文在对其野外关系、矿物化学、全岩地球化学和年代学研究的基础上, 讨论了东草河蛇绿岩形成的构造环境及潜在的地质意义.

1 地质背景及野外产状

北祁连造山带是一个典型的加里东造山带, 它保存有完整的早古生代板块构造记录, 是研究中国古板块体制的最佳造山带之一 [3-6].

传统上北祁连造山带的古板块体制被认为具有典型脊-沟-弧-盆体系特征 [6]. 在其中段, 古岛弧火山岩带主要沿走廊南山分布 [3,7]. 其南侧出露有俯冲杂岩 [8-10] (包括蓝片岩和低温榴辉岩)和蛇绿岩片 [3,7]. 北侧为弧后盆地, 主要由早古生代的火山-沉积岩系和蛇绿岩所组成 [6,7]. 其基本的地质构造格架如图 1(a)

所示.

东草河蛇绿岩出露于祁连县南 20 km 的火山岩带中(图 1(b)), 属于北祁连俯冲杂岩带南面托莱山蛇绿岩带的一部分. 它是一个构造移置岩块(大小为 3 km × 6 km), 夹在早古生代的沉积-火山岩系中. 根据野外产状, 可将东草河蛇绿岩的岩石组合划分作 3 个单元: () 堆晶纯橄岩-橄长岩-斜(钙)长岩-斜(钙)长质辉长岩-辉长岩系列, 明显是由多期次侵入的岩床组合而成, 底部由堆晶纯橄岩-橄长岩所组成, 反映的是橄榄石与斜长石堆晶作用的结果, 往上则为具有堆晶条带的钙长质辉长岩(图 2(a)). 堆晶条带主要是不同比例的浅色斜长石与暗色辉石所构成, 组合岩性为堆晶钙长岩-钙长质辉长岩-辉长岩. 堆晶岩系中也经常见到大小不一(长约 1~500 m)的不谐合的纯橄岩-橄长岩侵入体(discordant dunite-troctolite intrusive bodies). () 均质辉长岩系列, 主要由辉长岩-苏长质辉长岩所构成, 辉绿状岩脉则经常穿插其间. 堆晶辉长岩与均质辉长岩系列的界线是渐变的. 界线附近的堆晶辉长岩主要呈现岩脉状结构, 穿插在均质辉长岩中. () 顶部主要由辉绿岩质岩墙(图 2(b))与玄武岩质熔岩所构成, 结构上来看似乎是由均质辉

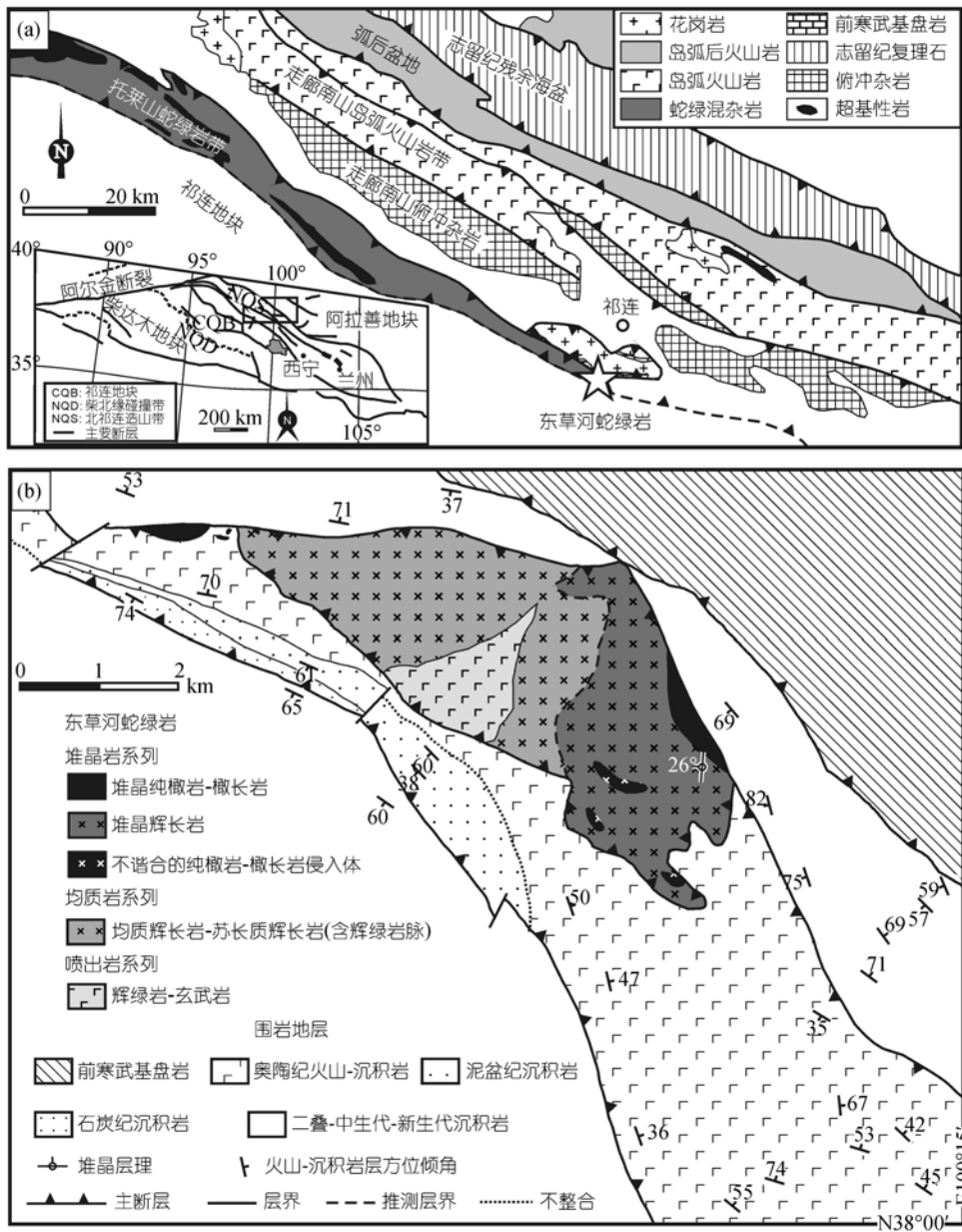


图 1

(a) 北祁连造山带中段的地质构造分带, 星号处为东草河蛇绿岩的位置; (b) 东草河蛇绿岩的地质产状图

长岩分异而出的熔体固结而成。整体上, 东草河蛇绿岩并没有遭受明显的变形作用。

2 岩相学

整体而言, 东草河蛇绿岩只经历洋底热水变质作用, 没有后期区域变质作用的叠加。堆晶纯橄岩-橄长岩的主要堆晶相为橄榄石和铬尖晶石, 斜长石与单斜辉石则为填隙相(图 2(c)), 由于洋底热水变质作用的影响, 只有铬尖晶石与少量的单斜辉石残存。

部分堆晶橄长岩则是由橄榄石与斜长石的堆晶构成(图 2(d)), 单斜辉石仍为填隙相, 显然斜长石早于单斜辉石晶出。堆晶钙长岩-钙长质辉长岩-辉长岩则是由不同比例的堆晶斜长石和单斜辉石构成, 在野外则呈现韵律的堆晶结构。部分的堆晶辉长岩则出现嵌晶结构, 数个自形晶状的斜长石被包裹于单斜辉石中。

均质辉长岩系列相对堆晶纯橄岩-辉长岩系列新

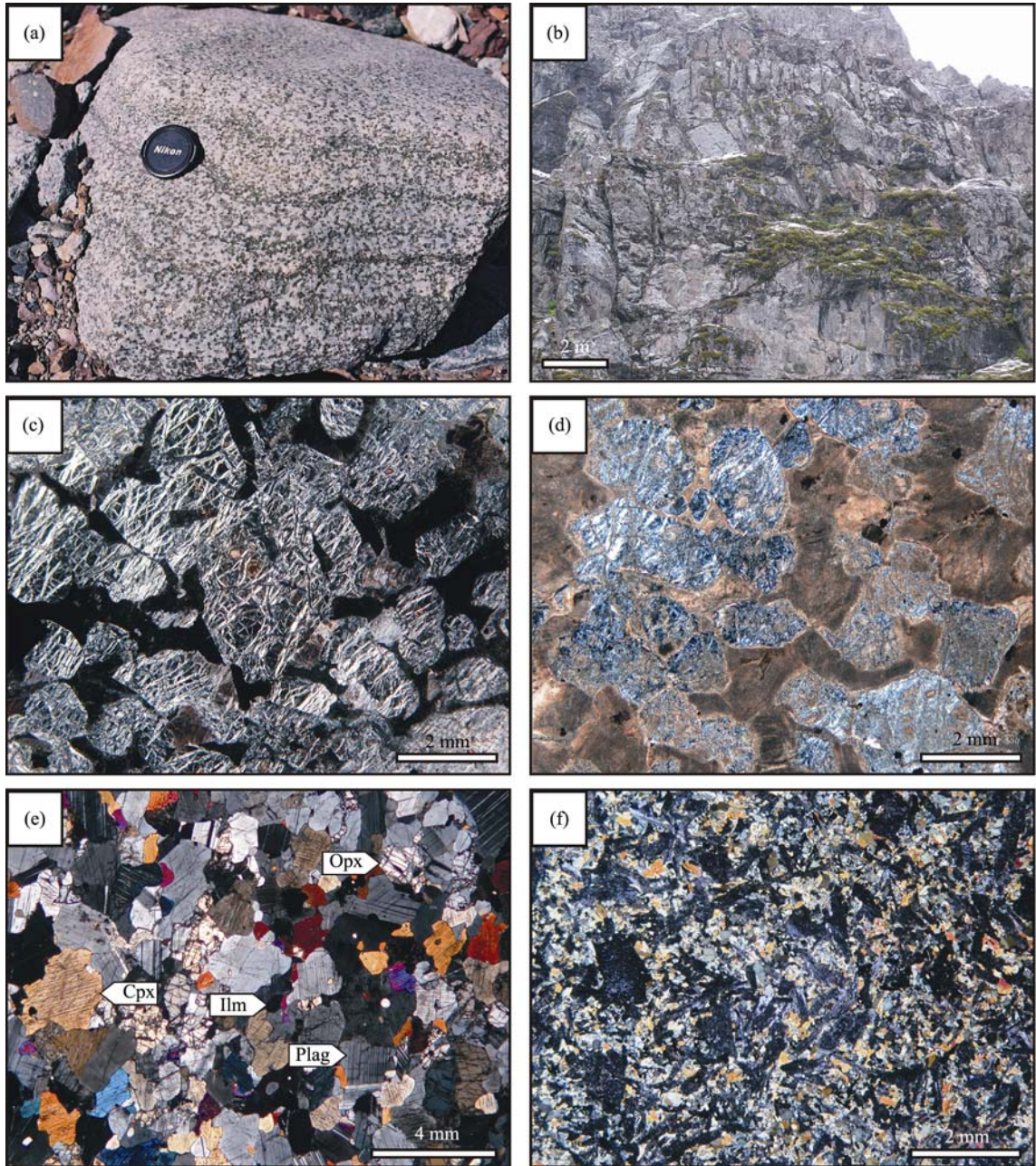


图 2

(a) 堆晶的钙质辉长岩; (b) 岩墙状(单个岩墙宽度约 2 m)的辉绿岩; (c) 堆晶纯橄岩, 堆晶橄榄石已蛇纹石化, 填隙的斜长石则已蚀变成钙铝榴石; (d) 堆晶橄长岩, 堆晶橄榄石已蚀变成灰黑色的蛇纹石, 填隙和堆晶的斜长石则已蚀变成黄灰色的葡萄石; (e) 均质苏长质辉长岩的岩相, 矿物名缩写为 Cpx: 单斜辉石, Opx: 斜方辉石, Plag: 斜长石, Ilm: 钛铁矿; (f) 辉绿岩

鲜, 没有明显的蚀变结构. 主要岩石有辉长岩和苏长质辉长岩, 两者的差异在于斜方辉石的有无. 苏长质辉长岩主要矿物相为斜长石、单斜辉石、斜方辉石和钛铁氧化物矿物, 不含橄榄石(图 2(e)). 部分苏长质辉长岩含有普通角闪石, 可能是热水作用所致^[4]. 某些角闪石则成为主要矿物相, 组成角闪辉长岩. 具有辉绿结构的

辉绿岩质岩墙(图 2(f))与玄武岩质熔岩, 是由经历辉长岩质堆晶作用的熔体冷却形成, 岩相上主要是由细粒的辉石、斜长石与钛铁氧化物矿物构成, 然而大部分已经历海水蚀变, 只有部分岩块可见残余的单斜辉石.

由岩石系列与堆晶矿物相的出现顺序, 可以清楚反映矿物结晶顺序为橄榄石±铬尖晶石→斜长石→

单斜辉石→斜方辉石→钛铁氧化物矿物. 这个结晶顺序为典型的洋壳矿物结晶顺序 [12].

3 矿物化学

矿物的电子探针分析在成功大学地球科学系完成. 所用的扫描电子显微镜型号为 JEOL JSM-840A, 探针分析的软件型号为 Oxford ISIS 300 series. 分析条件为加速电压 20 kV, 电流 400 pA, 电子束斑大小约 2 μm. 并利用光学显微镜对焦以确保固定的工作距离. 天然矿物与合成物质之元素能量频谱作为定量标准. 金属钴则用作随机测量的校正标准.

3.1 铬尖晶石

铬尖晶石(成分见网络版附录 1)仅出现在堆晶纯橄岩-橄长岩-钙长质辉长岩与不谐和的纯橄岩-橄长岩中. 堆晶纯橄岩-橄长岩中铬尖晶石 Mg#值为 42~66,

Cr#值为 41~57, 并且具有低的Fe³⁺#与TiO₂(图 3(a), (b)), 落入洋底橄长岩的范围内 [13]. 堆晶钙长质辉长岩中的铬尖晶石成分则比堆晶纯橄岩-橄长岩中铬尖晶石有稍低的Mg#值, 两者成分大致相似. 不谐和纯橄岩-橄长岩中的铬尖晶石明显有两种成分(图 3(a), (b)), 并且可以在薄片尺度同时存在. 棕红色铬尖晶石的Cr#值稍低于堆晶纯橄岩-橄长岩-钙长质辉长岩, 代表原生熔体的铬尖晶石成分. 而不透明的铬尖晶石成分上明显高Cr#, Fe³⁺#和TiO₂, 代表此原生熔体与围岩同化混染作用后新结晶的铬尖晶石 [14~16].

3.2 辉石

总体上, 单斜辉石的成分(见网络版附录 2)变化可以反映结晶分异的趋势, 并且与洋壳结晶分异的趋势相似(图 4(a)~(d)) [17]. 单斜辉石中Cr₂O₃ 变化, 在堆晶辉长岩形成之后(Mg# < ~88)含量明显下降, 反映铬

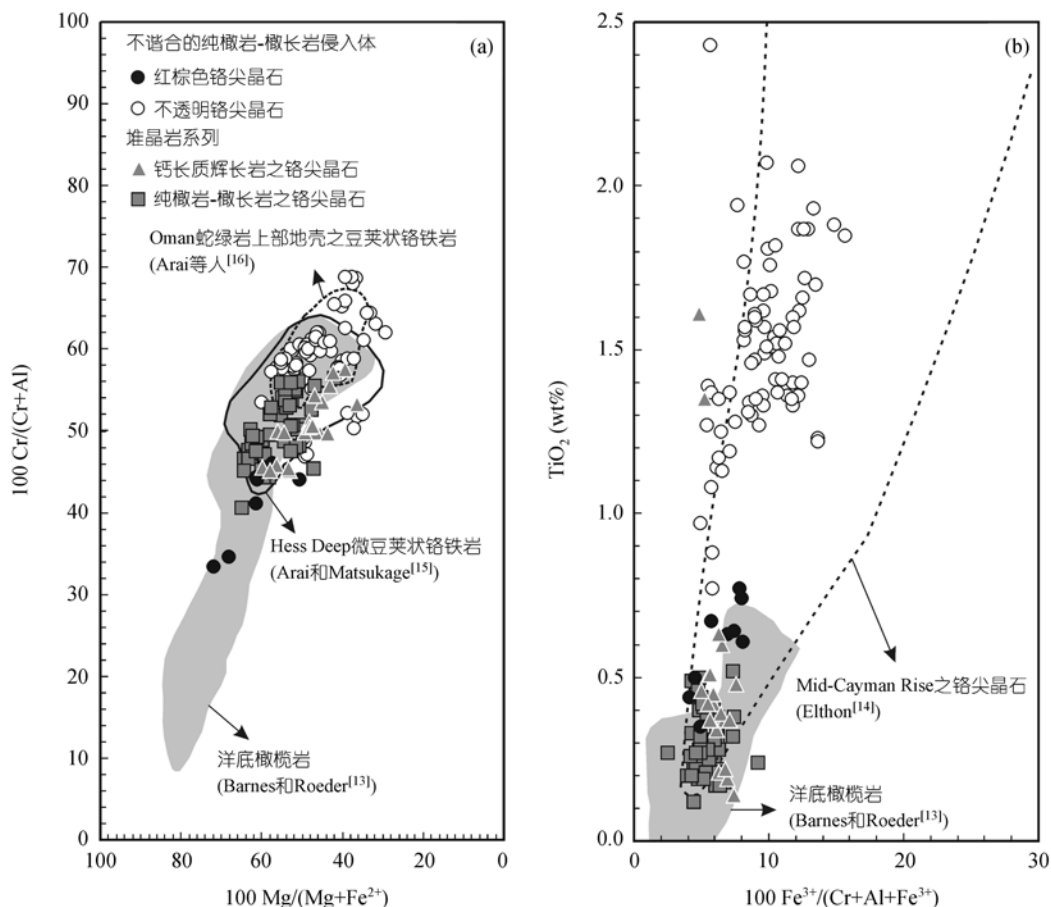


图 3

(a) 铬尖晶石的 Cr#-Mg#图; (b) 铬尖晶石的 Fe³⁺-TiO₂ 图. 堆晶纯橄岩-橄长岩的铬尖晶石成分主要分别落入(a)和(b)图中的灰色阴影的洋底橄长岩区域. 而不谐和纯橄岩-橄长岩中不透明的铬尖晶石成分明显与堆晶纯橄岩-橄长岩不同, 成因如本文所述

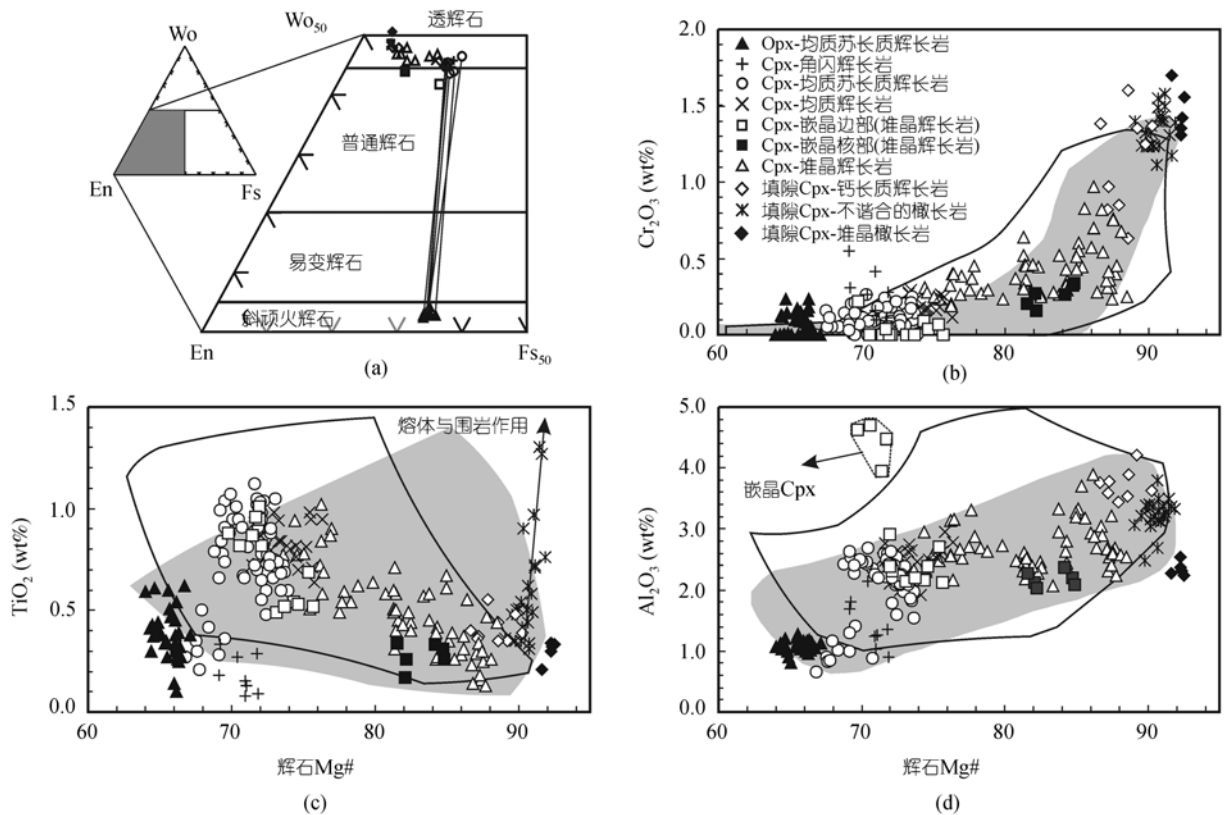


图 4

(a) 辉石矿物分类图; (b) 辉石中 Mg#对 Cr₂O₃的变化图; (c) 辉石中 Mg#对 TiO₂的变化图; (d) 辉石中 Mg#对 Al₂O₃的变化图. 灰色阴影区为海洋性堆晶辉石的成分, 实线范围则是洋中脊玄武岩的辉石斑晶与在 1 标准大气压下实验的辉石成分

尖晶石晶出之后消耗岩浆中大量Cr元素(图 4(b)). TiO₂ 的含量变化则是随着结晶分异作用而增加, 直到钛铁氧化物矿物晶出后, 导致部分晚期结晶的苏长质辉长岩与角闪石辉长岩(两者单斜辉石之Mg#约<70)中的TiO₂ 含量下降(图 4(c)). 不谐合纯橄岩-橄长岩中的TiO₂ 的含量变化则与结晶分异作用无关, 而是反映熔体与围岩作用的结果 [18,19]. Al₂O₃ 的含量变化主要反映斜长石晶出对岩浆化学成分的影响, 斜长石晶出会消耗岩浆中的Al₂O₃ 成分, 造成晚期结晶的单斜辉石Al₂O₃ 成分降低(图 4(d)). 具嵌晶结构高铝成分的单斜辉石则是因填隙的晶核在后堆晶作用中生长而成 [20](图 4(d)). 斜方辉石的成分变化见图 4(a)~(d)中.

3.3 斜长石

从堆晶钙长质辉长岩→堆晶辉长岩→均质辉长岩→均质苏长质辉长岩→角闪辉长岩中的斜长石An值变化(矿物成分见网络版附录 3), 大致为An₉₀→An₈₈₋₆₃→An₆₈₋₅₈→An₆₆₋₅₄→An₅₆₋₅₀. 通常认为高压环境, 如岛弧环境, 结晶之斜长石具有的高An值(An > 75) [21]. 所以典型岛弧环境的Troodos蛇绿岩, 其晶出

的斜长石An值较高(图 5) [22]. 从东草河蛇绿岩的斜长石与单斜辉石的成分变化来看, 与现今洋壳(例如东太平洋中洋脊Hess Deep) [23]的成分十分类似(图 5).

4 全岩地球化学

选定 8 个代表性岩石进行全岩地球化学的分析, 它们分别为堆晶橄长岩、钙长质辉长岩、辉长岩, 均质苏长质辉长岩, 玄武岩和辉绿岩. 测试是委托美国华盛顿州立大学地质系地质分析实验室(Geoanalytical Laboratory, Washington State University, USA)完成. 主要元素与部分微量元素用X射线荧光光谱法(XRF)测定, 微量元素则用酸溶等离子质谱法(ICP-MS)测定. 测试结果见表 1.

从球粒陨石标准化稀土元素分配图可以看出, 3 个玄武岩(辉绿岩)明显呈现轻稀土亏损分布(图 6(a)), (La/Sm)_N=0.58~0.76, (La/Yb)_N=0.59~0.82, 与典型的洋中脊玄武岩相似 [24]. 堆晶岩与均质岩系列的Eu元素正异常主要反映斜长石结晶的结果(图 6(a)). 辉长岩与苏长质辉长岩的重稀土含量较高, 可能与单斜

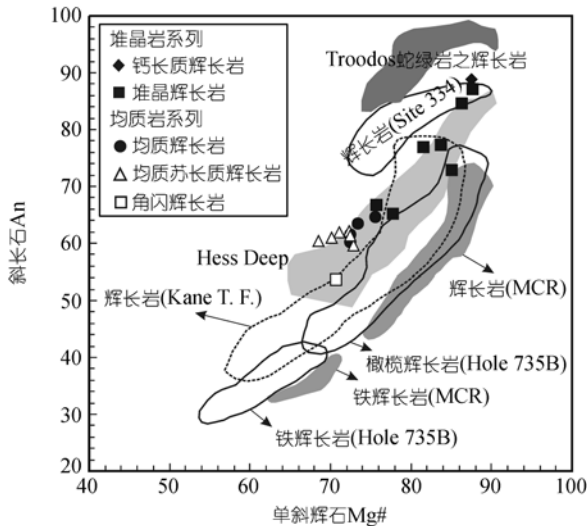


图5 单斜辉石的Mg#对斜长石An值图

东草河蛇绿岩的成分变化类似于Hess Deep(东太平洋中洋脊)的成分。Site 334, Hole 735B, MCR (Mid-Cayman Rise), Hess Deep, Kane T. F. (Kane transform fault)的数据来源参考Constantin等人^[23]、Troodos蛇绿岩的数据来源参考Thy等人^[22]

辉石与斜方辉石晶出有关(单斜辉石与斜方辉石的重稀土分配系数 D_{HREE} 约在0.1~0.5之间^[25],明显高出橄榄石与斜长石10倍以上)。由N-MORB标准化的微量元素分布图来看,3个玄武岩(辉绿岩)明显呈现平坦分布,稍高的Th与Sr元素可能与海水的蚀变作用有关^[26](图6(b))。经N-MORB标准化的堆晶岩与均质岩系列的微量元素分布图,则呈现较大的差异,但整体仍是反映结晶分异的特征。Sr和Eu同时正异常的现象主要反映斜长石的控制。Nb元素负异常则是因为堆晶岩与均质岩系列中没有(或缺乏)Nb元素兼容(分配系数 $D_{Nb} > 1$)的矿物相。

5 SHRIMP U-Pb 锆石定年

选定约30 kg的新鲜苏长质辉长岩进行锆石分选。分选出的锆石颗粒长轴约为80~120 μm,多数为短柱状自形晶,长宽比小于2,晶面与晶面界棱线外型清楚完整,背散射式影像显示岩浆结晶的振荡环带与晶面大致平行(图7(a))。SHRIMP 锆石 U-Pb 定年在北京离子探针中心完成,分析条件和过程依标准程序

表1 东草河蛇绿岩之全岩地球化学成分^{a)}

岩石系列	堆晶岩系列				均质岩系列	辉绿岩墙	玄武质熔岩	
样本编号	BGS-11A3	BGS-10C7	BGS-11A2	BGS-12A13	BGS-12A21	BGS-12A20	BG-03A	BG-04E
岩石种类	橄长岩	橄长岩	钙长质辉长岩	辉长岩	苏长质辉长岩	辉绿岩	玄武岩	玄武岩
XRF 分析之主要元素(wt%)和微量元素(μg/g)								
SiO ₂	41.66	43.84	44.43	49.46	51.55	49.81	50.99	51.04
TiO ₂	0.018	0.042	0.041	0.19	0.51	1.22	1.35	1.32
Al ₂ O ₃	5.51	15.73	26.25	19.08	15.72	15.12	14.26	14.27
FeO _{tot}	8.99	6.21	3.36	4.18	8.31	10.59	11.16	11.74
MnO	0.129	0.096	0.055	0.10	0.18	0.18	0.28	0.20
MgO	40.94	25.58	10.17	9.69	8.95	7.05	7.38	7.56
CaO	0.72	8.33	14.45	13.66	12.45	10.99	9.06	10.43
Na ₂ O	0.05	0.03	1.25	2.26	2.34	2.97	3.25	2.87
K ₂ O	0.00	0.00	0.07	0.46	0.04	0.51	0.46	0.43
P ₂ O ₅	0.008	0.009	0.009	0.005	0.004	0.096	0.117	0.110
总量	98.03	99.87	100.07	99.08	100.06	98.54	98.31	99.97
LOI	12.40	8.49	6.32	2.90	0.52	2.15	2.17	1.68
mg-no.	90.4	89.5	86.3	82.8	69.0	57.9	57.8	57.1
FeO	7.75	5.35	2.89	3.60	7.17	9.13	9.62	10.13
Fe ₂ O ₃	1.36	0.94	0.50	0.63	1.26	1.60	1.69	1.78
Ni	2378	1073	463	169	72	63	52	53
Cr	5154	1555	248	993	244	172	101	112
V	36	25	23	119	224	282	312	317
Ga	2	5	12	13	14	16	17	16
Zn	51	40	24	23	50	57	203	66
Cu	19	263	96	131	34	30	74	82
ICP-MS 分析之微量元素(μg/g)								
Ba	0.32	1.94	3.58	40.57	8.38	51.49	69.46	64.00
Rb	0.14	0.10	0.88	11.41	0.13	5.39	4.59	5.00

表 1(续)

岩石系列	堆晶岩系列				均质岩系列	辉绿岩墙	玄武质熔岩	
样本编号	BGS-11A3	BGS-10C7	BGS-11A2	BGS-12A13	BGS-12A21	BGS-12A20	BG-03A	BG-04E
岩石种类	橄长岩	橄长岩	钙长质辉长岩	辉长岩	苏长质辉长岩	辉绿岩	玄武岩	玄武岩
Sr	0.58	4.96	110.6	209	97	162	161	174
Zr	0.61	0.90	1.04	3.81	2.74	56.76	64.35	68.00
Y	0.38	0.81	1.08	5.84	9.00	29.20	29.30	31.92
Nb	0.010	0.009	0.010	0.08	0.05	1.65	2.82	2.44
Cs	0.02	0.61	0.29	4.45	0.06	0.44	0.47	0.78
Sc	5.45	4.78	5.48	39.1	47.2	43.2	42.1	49.1
Hf	0.020	0.035	0.035	0.16	0.17	1.74	1.98	2.03
Ta	0.002	0.002	0.002	0.008	0.006	0.118	0.210	-
Pb	0.63	0.75	0.20	0.27	0.29	0.26	0.37	1.48
Th	0.015	0.013	0.013	0.072	0.053	0.237	0.303	0.180
U	0.005	0.006	0.005	0.012	0.010	0.059	0.070	0.050
La	0.035	0.051	0.080	0.23	0.19	2.38	3.33	3.00
Ce	0.078	0.160	0.204	0.78	0.68	6.73	8.82	8.52
Pr	0.011	0.027	0.039	0.14	0.13	1.10	1.34	1.37
Nd	0.049	0.144	0.188	0.83	0.93	6.37	7.37	7.57
Sm	0.019	0.053	0.080	0.42	0.57	2.64	2.82	2.97
Eu	0.014	0.067	0.122	0.29	0.48	0.97	1.00	1.12
Gd	0.030	0.112	0.133	0.70	1.03	3.76	3.93	4.20
Tb	0.007	0.020	0.027	0.15	0.21	0.74	0.75	0.81
Dy	0.051	0.127	0.194	1.04	1.55	5.10	5.18	5.60
Ho	0.013	0.029	0.043	0.22	0.36	1.10	1.15	1.21
Er	0.048	0.083	0.118	0.62	1.00	3.15	3.22	3.40
Tm	0.008	0.014	0.017	0.09	0.15	0.46	0.47	0.50
Yb	0.051	0.098	0.104	0.54	0.93	2.87	2.90	3.18
Lu	0.010	0.017	0.017	0.09	0.15	0.45	0.46	0.50

a) LOI: 烧失量; Fe₂O₃ 占全部 Fe 的 0.15, FeO 占全部 Fe 的 0.85; mg-no = 100Mg/(Mg+Fe²⁺); -: 未测

进行 [27]。用 ²⁰⁴Pb 作普通铅校正, 数据处理用 SQUID 和 Isoplot 程序 [28], 加权平均年龄计算误差为 2σ。

共在 17 粒锆石中测定 17 个数据点, 它们的 Th/U 比值为 0.64~0.99, 具有典型岩浆结晶锆石的特征 [29], 其 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄的加权平均值为 (497 ± 7) Ma (MSWD = 2.6)(见表 2 与图 7(b))。

由于亏损地幔处于 Zr 不饱和状态, 所以起源于洋壳的原始蛇绿岩和辉长岩不可能结晶出可供 U-Pb 定年用的锆石 [30]。显然, 苏长质辉长岩中锆石 U-Pb 年龄测定, 无法代表软流圈地幔熔融产生原始岩浆后的橄榄岩-辉长岩结晶事件。因此, 如果在蛇绿岩组合的橄榄岩-辉长岩中发现岩浆成因锆石, 可能说明在蛇绿岩构造侵位过程中或者发生部分熔融直接结晶出锆石, 或者受到地壳混染后发生部分熔融结晶出锆石, 或者是残留的壳源锆石 [30]。北祁连造山带的邻近地区皆为元古代陆壳 [31-33], 早奥陶世锆石 U-Pb 年龄显然不是残留的壳源锆石。所以, 存在于东草河蛇绿岩中苏长质辉长岩的锆石年龄可能纪录了蛇绿岩构造侵位过程中出现的部分熔融事件时代。

因此, 可以推断的古祁连洋应该存在于晚寒武-中寒武世或更早, 而不是早奥陶世。

6 地质意义

东草河蛇绿岩的岩石组合、矿物结晶顺序、矿物化学特性、元素地球化学与 Nd-Sr 同位素特征(另文发表)都反映出洋中脊(N-MOR)环境的特征, 表明其形成于洋中脊或成熟的弧后盆地环境。从岩石建造来看, 东草河蛇绿岩是一个保存完整的洋壳残片。早古生代保存完整的单一洋壳残片并不多见, Newfoundland 的 Annieopsquotch 蛇绿岩(约 480 Ma)是其中一个, 但它相对缺失橄榄堆晶岩的部分 [34]。东草河蛇绿岩则是保存相对较完整的一个实例。

多数的研究认为, 古祁连洋在奥陶纪时向北俯冲 [3,6,7,10]。在北祁连造山带中段的构造分带上, 由南向北分别为: 托莱山蛇绿岩带、走廊南山俯冲杂岩带、走廊南山主岛弧带与走廊南山北坡的弧后盆地 [3]。张建新等人 [35] 测定了主岛弧带的酸性火山岩的单颗粒锆石年代为 466~481 Ma, 而宋述光等人 [36] 利用锆石

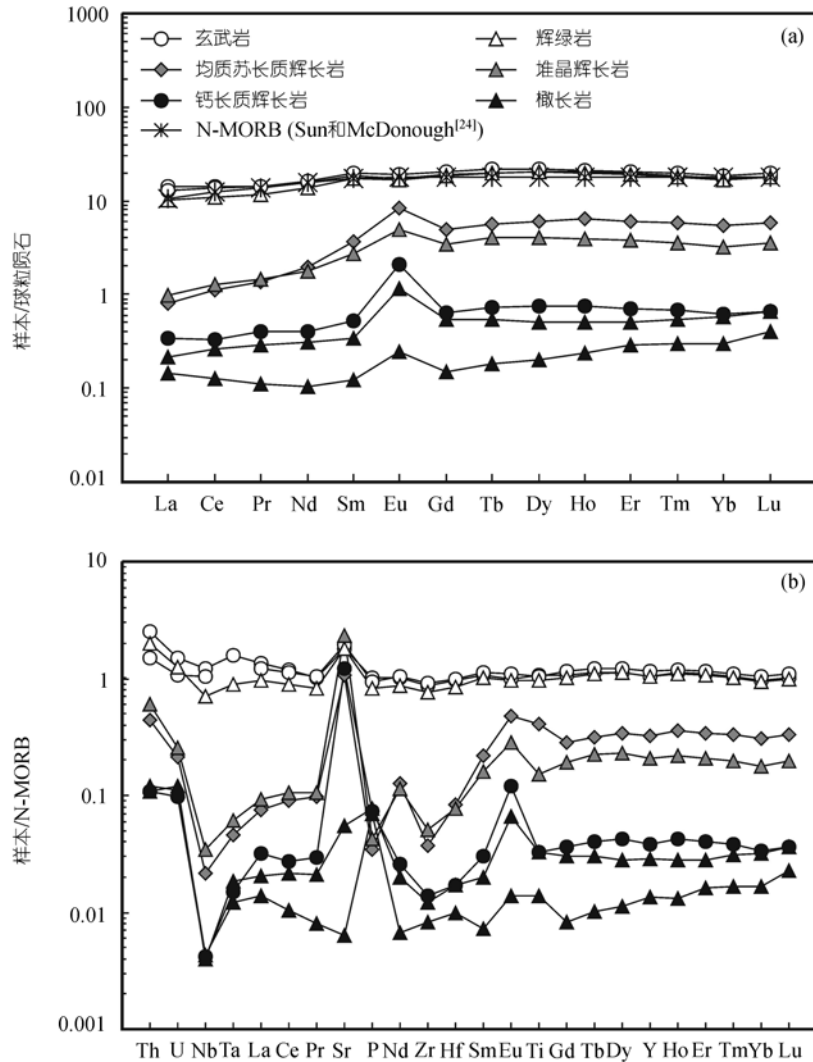


图 6

(a) 球粒陨石标准化稀土元素分配图; (b) N-MORB标准化的微量元素分布图. 标准化数据来源Sun和McDonough^[24]

SHRIMP法测定了俯冲杂岩带高压变质榴辉岩年代为 463~468 Ma. 上述的年龄数据反映了古祁连洋发生俯冲与其俯冲引发的岛弧火山活动主要在中奥陶世^[36]. 东草河蛇绿岩属于托莱山蛇绿岩带的一部分, 属古祁连洋的残留部分, 而锆石年代学研究表明其构造侵位时代为早奥陶世, 从古板块构造运动的时序来看, 代表古祁连洋至少在早奥陶纪(约 497 Ma)前就向北俯冲, 比岛弧岩浆活动及俯冲杂岩带高压榴辉岩变质作用的年代更早. 所以, 东草河蛇绿岩是古祁连洋向北俯冲的一个重要时间制约.

当然, 也有部分的研究者认为古祁连洋向南俯冲^[37]或者是双向俯冲^[4]. 因此, 张旗等人^[4]认为北祁连山的蛇绿岩属科迪勒拉型. 也就是说, 北祁连蛇绿

岩都是岛弧或小洋盆环境. 这些小洋盆的形成与演化都与一个大洋盆的活动有关^[4]. 已有的研究认为托莱山蛇绿岩带中的玉石沟蛇绿岩的形成时代(或构造侵位年代)约为 550 Ma^[38]. 假如玉石沟蛇绿岩和东草河蛇绿岩(构造侵位年代约 497 Ma)形成于同一小洋盆或成熟的弧后盆地环境, 两者的年代学差异则暗示这些小洋盆或弧后盆地至少存在 50 Ma以上, 而与之相关的大洋盆存在时间应更长.

最近的研究显示^[39,40], 北祁连山的九个泉、大岔大阪、老虎山与玉石沟蛇绿岩都具有印度洋MORB型的同位素组成特征, 表明古祁连洋可能曾是特提斯构造域的一部分. 侯青叶等人^[39]指出, 对于已知的特提斯构造域的蛇绿岩, 其MORB型玄武岩的微量元

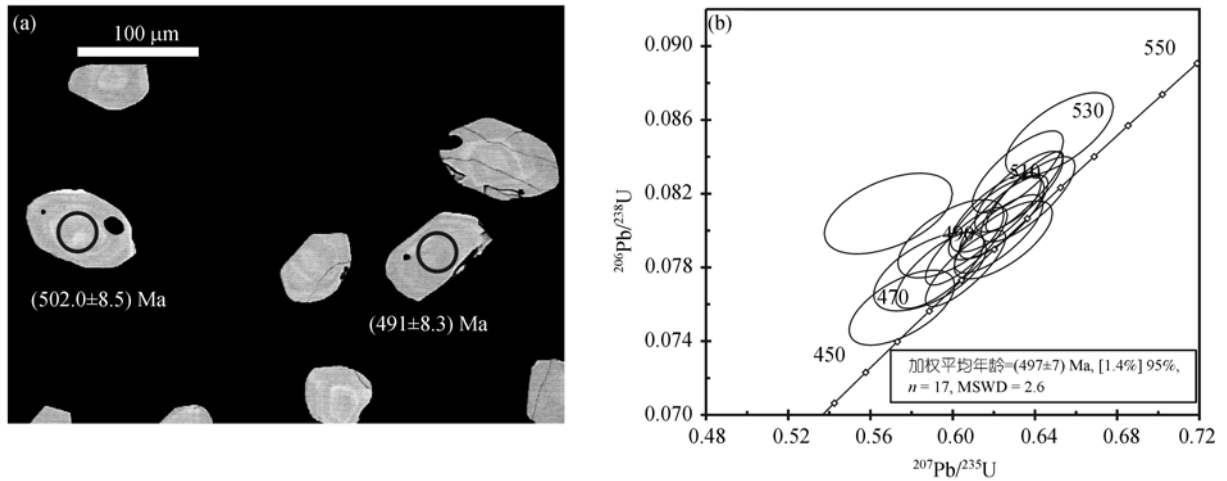


图 7

(a) 苏长质辉长岩之锆石的背散射式影像; (b) 东草河蛇绿岩苏长质辉长岩之锆石 U-Pb 谐和年龄图

表 2 东草河蛇绿岩之苏长质辉长岩中的锆石 SHRIMP 定年资料

测点	$^{206}\text{Pb}_c/\%$	浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$			$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄/Ma	放射性同位素比值					
		U	Th	$^{206}\text{Pb}^*$			$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	$\pm\%$	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$\pm\%$
BGS-1	0.13	391	288	26.2	0.76	483.3 ± 8.2	0.05531	1.6	0.594	2.4	0.0778	1.8
BGS-2	0.03	290	253	20.1	0.90	500.5 ± 8.9	0.05613	1.3	0.625	2.3	0.0807	1.8
BGS-3	0.31	373	296	26.1	0.82	501.5 ± 8.6	0.0510	3.1	0.570	3.6	0.0809	1.8
BGS-4	0.52	429	359	30.3	0.87	508.7 ± 8.6	0.05585	1.4	0.632	2.2	0.0821	1.8
BGS-5	0.04	412	256	29.5	0.64	515.1 ± 8.7	0.05508	1.5	0.632	2.3	0.0832	1.8
BGS-6	0.12	395	380	27.1	0.99	495.0 ± 8.4	0.05656	1.5	0.623	2.3	0.0798	1.8
BGS-7	0.70	527	483	38.6	0.95	527.1 ± 8.9	0.0555	2.0	0.652	2.6	0.0852	1.8
BGS-8	0.64	352	282	23.0	0.83	471.1 ± 8.0	0.0550	2.4	0.576	2.9	0.0758	1.8
BGS-9	0.28	312	241	21.6	0.80	500.1 ± 8.9	0.05586	1.6	0.622	2.5	0.0807	1.8
BGS-10	0.44	494	398	34.7	0.83	506.2 ± 9.1	0.05652	1.5	0.637	2.4	0.0817	1.9
BGS-11	0.74	418	336	28.7	0.83	493.0 ± 8.3	0.0570	1.8	0.626	2.5	0.0795	1.8
BGS-12	0.02	478	350	32.0	0.76	483.8 ± 8.2	0.05641	1.2	0.606	2.1	0.0779	1.7
BGS-13	0.52	420	403	29.3	0.99	502.0 ± 8.5	0.05561	1.5	0.621	2.3	0.0810	1.8
BGS-14	0.26	396	340	27.0	0.89	491.0 ± 8.3	0.05559	1.3	0.607	2.2	0.0791	1.8
BGS-15	0.08	180	116	12.0	0.67	482.8 ± 8.4	0.0549	2.5	0.589	3.1	0.0778	1.8
BGS-16	0.21	573	497	40.5	0.90	508.8 ± 8.5	0.05608	0.90	0.635	2.0	0.0821	1.7
BGS-17	0.68	403	292	27.7	0.75	493.4 ± 8.4	0.0546	2.2	0.600	2.8	0.0795	1.8

素比值大致在一定的范围内变化。东草河蛇绿岩的玄武质岩石微量元素比值特征为: Zr/Nb (22.8~34.4), La/Nb (1.2~1.4), Ti/Zr (116~129), Ti/V (25.0~26.0), TiO_2/O_5 (11.5~12.7), Th/La (0.06~0.10), Rb/Sr (0.028~0.033), 与特提斯构造域的蛇绿岩是一致的, 这暗示着东草河蛇绿岩也是原特提斯洋盆的一部分。

致谢 SHRIMP 定年工作得到了万渝生和陶华的帮助。成文期间, 得到了张建新与孟繁聪的帮助, 两位评审专家提出的建设性修改意见, 在此一并致谢。

参 考 文 献

- 1 Coleman R G. Ophiolites, Ancient Oceanic Lithosphere? New York: Springer, 1977
- 2 张旗, 周国庆. 中国蛇绿岩. 北京: 科学出版社, 2001
- 3 许志琴, 徐惠芬, 张建新, 等. 北祁连走廊南山加里东俯冲杂岩增生地体及其动力学. 地质学报, 1994, 68(1): 1—15
- 4 张旗, 孙晓猛, 周德进. 北祁连蛇绿岩的特征、形成环境及其构造意义. 地球科学进展, 1997, 12: 366—393
- 5 Yang H Y, Wu Y M, Wu C. Petrology of an arc-oceanic crust con-

- tact zone in the Laohushan back-arc basin, the eastern section of the North Qilian Mountains, NW China. *Acta Geol Sin-Engl Ed*, 2002, 76: 1—13
- 6 Xia L Q, Xia Z H, Xu X Y. Magmagenesis in the Ordovician backarc basins of the Northern Qilian Mountains, China. *Geol Soc Am Bull*, 2003, 115: 1510—1522[DOI]
- 7 Wang C Y, Zhang Q, Qian Q, et al. Geochemistry of the early Paleozoic Baiyin volcanic rocks (NW China): Implications for the tectonic evolution of the North Qilian orogenic belt. *J Geol*, 2005, 113: 83—94[DOI]
- 8 Wu H Q, Feng Y M, Song, S G. Metamorphism and deformation of blueschist belts and their tectonic implications, North Qilian Mountains, China. *J Metamorph Geol*, 1993, 11: 523—536[DOI]
- 9 宋述光. 北祁连俯冲杂岩代的构造意义. *地球科学进展*, 1997, 12(4): 351—365
- 10 Song S G, Zhang L F, Niu Y L, et al. Evolution from oceanic subduction to continental collision: A case study from the northern Tibetan Plateau based on geochemical and geochronological data. *J Petrol*, 2006, 47: 435—455[DOI]
- 11 McCollom T M, Shock E L. Fluid—rock interactions in the lower oceanic crust: Thermodynamic models of hydrothermal alteration. *J Geophys Res*, 1998, 103: 547—575[DOI]
- 12 Bloomer S H, Meyer P S, Dick H J B, et al. Textural and mineralogical variations in gabbroic rocks from Hole 735B. In: von Herzen R P, Robinson P T, eds. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results 118*. College Station, Texas, Ocean Drilling Program, 1991. 21—39
- 13 Barnes S J, Roeder P L. The range of spinel compositions in terrestrial mafic and ultramafic rocks. *J Petrol*, 2001, 42: 2279—2302[DOI]
- 14 Elthon D. Petrology of gabbroic rocks from the Mid-Cayman rise spreading center. *J Geophys Res*, 1987, 92: 658—682
- 15 Arai S, Matsukage K. Petrology of a chromitite micropod from Hess Deep, equatorial Pacific: A comparison between abyssal and alpine-type podiform chromitites. *Lithos*, 1998, 43: 1—14[DOI]
- 16 Arai S, Uesugi J, Ahmed A H. Upper crustal podiform chromitite from the northern Oman ophiolite as the stratigraphically shallowest chromitite in ophiolite and its implication for Cr concentration. *Contrib Mineral Petrol*, 2004, 147: 145—154[DOI]
- 17 Elthon D, Stewart M, Ross D K. Compositional trends of minerals in oceanic cumulates. *J Geophys Res*, 1992, 97: 15189—15199
- 18 Arai S, Matsukage K. Petrology of the gabbro-troctolite-peridotite complex from Hess Deep, equatorial Pacific: Implications for mantle-melt interaction within the oceanic lithosphere. In: Mével C, Gillis K M, Allan J F, et al, eds. *Proceeding of the Ocean Drilling Program, Scientific Results 147*. College Station, Texas, Ocean Drilling Program. 1996. 135—155
- 19 Arai S, Matsukage K, Isobe E, et al. Concentration of incompatible elements in oceanic mantle: Effect of melt/wall interaction in stagnant or failed melt conduits within peridotite. *Geochim Cosmochim Acta*, 1997, 61: 671—675[DOI]
- 20 Ross K, Elthon D. Cumulus and postcumulus crystallization in the oceanic crust: Major- and trace-element geochemistry of LEG 153 gabbroic rocks. In: Karson J A, Cannat M, Miller D J, et al, eds. *Proceeding of the Ocean Drilling Program, Scientific Results 153*. College Station, Texas, Ocean Drilling Program, 1997. 333—350
- 21 Takagi D, Sato H, Nakagawa M. Experimental study of a low-alkali tholeiite at 1~5 kbar: Optimal condition for the crystallization of high-An plagioclase in hydrous arc tholeiite. *Contrib Mineral Petrol*, 2005, 149: 527—540[DOI]
- 22 Thy P, Schiffman P, Moores E M. Igneous mineral stratigraphy and Chemistry of the Cyprus crustal study project drill core in the Plutonic sequences of the Troodos Ophiolite. In: Gibson I L, Malpas J, Robinson P T, et al, eds. *Cyprus Crustal Study Project: Initial Report. Hole CY-4*, 1989. 147—185
- 23 Constantin M, Hékinian R, Bideau D, et al. Construction of the oceanic lithosphere by magmatic intrusions: Petrological evidence from plutonic rocks formed along the fast-spreading East Pacific Rise. *Geology*, 1996, 24(8): 731—734
- 24 Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders A D, Norry M J, eds. *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publication 42. Oxford: Blackwell, 1989. 313—346
- 25 Bédard J H. A procedure for calculating the equilibrium distribution of trace elements among the minerals of cumulate rocks, and the concentration of trace elements in the coexisting liquids. *Chem Geol*, 1994, 118: 143—153[DOI]
- 26 Valsami-Jones E, Ragnarsdóttir K V. Controls on uranium and thorium behavior in ocean-floor hydrothermal systems: Examples from the Pindos ophiolite, Greece. *Chem Geol*, 1997, 135: 263—274[DOI]
- 27 Williams I S. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. *Rev Econ Geol*, 1998, 7: 1—35
- 28 Ludwig K R. *Isoplot/Ex version 2.4. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel*. Berkeley Geochron Centre Spec Publ, 2000. 1—56
- 29 Hoskin P W O, Schaltegger U. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. In: Hancher J M, Hoskin P W O, eds. *Zircon: Reviews in Mineralogy and Geochemistry 53*. Mineralogical Society of America, 2003. 27—62
- 30 Zheng Y F, Zhao Z F, Wu Y B, et al. Zircon U-Pb age, Hf and O isotope constraints on protolith origin of ultrahigh-pressure eclogite and gneiss in the Dabie orogen. *Chem Geol*, 2006, 231: 135—158[DOI]
- 31 Wan Y S, Xu Z Q, Yang J S, et al. Ages and compositions of the Precambrian high-grade basement of the Qilian terrane and adjacent areas. *Acta Geol Sin-Engl Ed*, 2001, 75(4): 375—384
- 32 曹建元, 杨宏仪, 万渝生, 等. 北祁连山变质杂岩中新元古代 (~775 Ma) 岩浆活动纪录的发现: 来自 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年的证据. *科学通报*, 2006, 51(5): 575—581

- 33 董国安, 杨宏仪, 刘敦一, 等. 龙首山岩群碎屑锆石 SHRIMP U-Pb 年代学及其地质意义. 科学通报, 2007, 52(6): 688—697
- 34 Lissenberg C J, Bédard J H, van Staal C R. The structure and geochemistry of the gabbro zone of the Annieopsquotch ophiolite, Newfoundland: Implications for lower crustal accretion at spreading ridges. *Earth Planet Sci Lett*, 2004, 229: 105—123[DOI]
- 35 张建新, 许志琴, 徐惠芬, 等. 北祁连中段俯冲杂岩、火山弧的时代探讨. *岩石矿物学杂志*, 1997, 16: 112—119
- 36 宋述光, 张立飞, Niu Y L, 等. 北祁连山榴辉岩锆石 SHRIMP 定年及其构造意义. 科学通报, 2004, 49(6): 592—595
- 37 Gehrels G E, Yin A, Wang X F. Magmatic history of the northeastern Tibetan Plateau. *J Geophys Res*, 2003, 108(B9), 2423, doi: 10.1029/2002JB001876[DOI]
- 38 史仁灯, 杨经绥, 吴才来, 等. 北祁连玉石沟蛇绿岩形成于晚震旦世的 SHRIMP 年龄证据. *地质学报*, 2004, 78(5): 649—657
- 39 侯青叶, 赵志丹, 张宏飞, 等. 北祁连玉石沟蛇绿岩印度洋 MORB 型同位素组成特征及其地质意义. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2005, 35(8): 710—719
- 40 侯青叶, 赵志丹, 张本仁, 等. 青藏高原东北缘特提斯构造域界线的探讨. *岩石学报*, 2006, 22(3): 567—577

附录 1 东草河蛇绿岩的代表性铬尖晶石电子探针成分^{a)}

样本号	矿物相	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	总量	Mg#	Cr#	Fe ³⁺ #
堆晶纯橄岩-橄长岩												
10B1	Spl	28.73	0.19	37.40	14.37	4.57	-	14.56	99.82	64.4	46.6	5.1
11A3	Spl	26.62	0.39	38.94	16.76	4.69	-	13.02	100.42	58.1	49.5	5.4
11A3-2	Spl	21.7	0.24	40.28	20.06	7.70	0.41	9.96	100.35	47.0	55.5	9.2
11A7	Spl	25.78	0.22	39.59	19.24	3.93	-	11.11	99.87	50.7	50.7	4.6
不谐和的纯橄岩-橄长岩												
04A	Spl	18.28	1.62	41.58	19.84	7.70	-	10.70	99.72	49.0	60.4	9.6
04B	Spl	15.81	1.87	40.24	25.62	9.96	0.44	6.70	100.64	31.8	63.1	12.9
	Spl*	35.24	0.64	27.89	13.36	6.81	-	16.11	100.04	68.3	34.7	7.5
05A	Spl	20.75	0.77	42.41	22.44	4.77	0.41	8.61	100.16	40.6	57.8	5.8
10C3	Spl	27.95	0.77	33.90	16.84	6.71	-	13.06	99.23	58.0	44.9	7.8
11A5	Spl	17.91	1.60	41.93	20.33	7.12	0.47	9.94	99.29	46.6	61.1	9.0
钙长质辉长岩												
11A6	Spl	24.81	0.60	38.69	20.37	5.58	-	10.65	100.70	48.2	51.1	6.6

a) Spl: 铬尖晶石(Cr-spinel); Mg#: 100Mg/(Mg+Fe²⁺); Cr#: 100Cr/(Cr+Al); Fe³⁺#: 100Fe³⁺/(Fe³⁺+Cr+Al); FeO 和 Fe₂O₃ 系利用 AB₂O₄ 标准配位数计算. Spl*: 红棕色铬尖晶石; -: 未测

附录 2 东草河蛇绿岩的代表性辉石电子探针成分^{a)}

样本号	矿物相	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	总量	Mg#	En	Fs	Wo
堆晶橄长岩															
11A7	Cpx	52.56	2.28	0.21	1.70	2.49	0.00	15.33	24.82	0.36	99.75	91.7	44.4	4.0	51.6
不谐和的纯橄岩-橄长岩															
04A	Cpx	50.96	3.50	1.30	1.31	2.64	0.15	15.90	23.24	0.47	99.47	91.5	46.7	4.3	49.0
04B	Cpx	52.66	3.05	0.54	1.32	3.12	0.15	16.14	23.72	0.24	100.94	90.2	46.2	5.0	48.8
11A5	Cpx	51.32	3.62	0.39	1.37	3.09	0.18	16.03	23.68	0.34	100.02	90.2	46.1	5.0	48.9
钙长质辉长岩															
11A2	Cpx	51.70	3.59	0.36	0.82	4.21	0.19	16.07	22.86	0.17	99.97	87.2	46.1	6.8	47.1
堆晶辉长岩															
10B2	Cpx	53.06	2.64	0.39	0.43	5.35	0.09	16.04	22.48	0.35	100.83	84.2	45.6	8.5	45.9
10B3	Cpx	53.03	3.21	0.16	0.31	4.40	0.14	17.15	22.21	0.37	100.98	87.4	48.2	6.9	44.9
10B5	Cpx	52.51	3.27	0.35	0.60	4.80	0.12	15.40	23.41	0.21	100.67	85.1	44.1	7.7	48.2
10B7	Cpx	51.81	2.69	0.54	0.27	7.13	0.20	14.45	22.83	0.29	100.21	78.3	41.5	11.5	47.1
10B13	Cpx	51.85	3.04	0.23	0.82	4.48	0.00	16.40	22.79	0.30	99.91	86.7	46.5	7.1	46.4
12A12	Cpx	51.60	2.66	0.87	0.26	7.35	0.26	13.72	23.44	0.37	100.53	76.9	39.6	11.9	48.6
12A13	Cpx	52.12	2.62	0.51	0.52	6.31	0.18	15.43	22.43	0.20	100.32	81.3	44.0	10.1	45.9
具嵌晶结构之堆晶辉长岩															
10B6	Cpx ^c	52.83	2.09	0.26	0.34	5.33	0.17	16.74	21.60	0.48	99.84	84.8	47.5	8.5	44.0
	Cpx ^r	48.79	4.47	0.96	0.04	10.29	0.32	14.62	19.84	0.39	99.72	71.7	42.2	16.7	41.2
均质辉长岩															
04M	Cpx	51.43	2.96	0.64	0.25	7.95	0.20	13.96	22.19	0.37	99.95	75.8	40.6	13.0	46.4
12A6	Cpx	51.37	2.47	0.90	0.21	9.34	0.31	13.79	21.68	0.41	100.48	72.5	39.8	15.1	45.0
12A10	Cpx	52.18	2.46	0.73	0.05	9.39	0.23	13.50	21.85	0.46	100.85	71.9	39.2	15.3	45.6
12A14	Cpx	51.12	2.44	0.88	0.20	9.42	0.13	13.78	22.03	0.34	100.34	72.3	39.5	15.1	45.4
均质苏长质辉长岩															
04K	Cpx	52.04	0.85	0.21	0.11	10.76	0.44	12.68	22.81	0.17	100.07	67.7	36.1	17.2	46.7
	Opx	52.75	1.07	0.47	0.15	20.59	0.53	22.18	2.25	-	99.99	65.8	62.7	32.7	4.6
12A2	Cpx	51.63	2.54	0.69	0.15	9.42	0.12	13.90	21.09	0.44	99.98	72.5	40.5	15.4	44.1
	Opx	53.28	0.96	0.26	0.07	20.86	0.39	23.00	1.45	0.16	100.43	66.3	64.3	32.7	2.9
12A5	Cpx	52.05	2.13	0.77	0.06	9.28	0.15	13.70	22.24	0.31	100.69	72.5	39.3	14.9	45.8
	Opx	52.96	1.07	0.34	0.10	21.26	0.31	22.52	1.88	0.17	100.61	65.4	62.9	33.3	3.8
12A8	Cpx	51.08	2.41	1.04	0.09	9.31	0.16	13.60	21.38	0.34	99.41	72.3	39.8	15.3	44.9
	Opx	52.93	1.12	0.54	-	20.73	0.41	22.72	1.39	0.15	99.99	66.1	64.3	32.9	2.8
12A17	Cpx	51.65	2.64	0.98	0.09	9.60	0.33	13.89	21.47	0.21	100.86	72.1	40.0	15.5	44.5
	Opx	52.70	0.81	0.38	-	21.42	0.52	22.41	1.40	0.12	99.76	65.1	63.2	33.9	2.8
12A21	Cpx	51.43	2.54	0.84	0.20	10.65	0.18	13.46	20.86	0.41	100.57	69.3	39.1	17.4	43.5
	Opx	52.64	1.06	0.37	-	21.68	0.35	22.18	1.48	-	99.76	64.6	62.6	34.3	3.0
角闪辉长岩															
04L	Cpx	52.54	1.26	0.13	0.10	9.83	0.37	13.53	22.42	0.30	100.48	71.0	38.5	15.7	45.8

a) Cpx: 单斜辉石(clinopyroxene); 全部 Fe 视为 FeO; Mg#: 100Mg/(Mg+Fe²⁺); Cpx^c: 嵌晶 cpx 之核部; Cpx^r: 嵌晶 cpx 之边部; Opx: 斜方辉石(orthopyroxene); 全部 Fe 视为 FeO

附录3 东草河蛇绿岩的代表性斜长石电子探针成分^{a)}

样本号	矿物相	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	Na ₂ O	总量	Ab	An	Or
钙长质辉长岩											
11A2	Plag	44.88	34.84	0.33	0.00	18.60	1.05	99.70	9.3	90.7	0.0
堆晶辉长岩											
10B2	Plag	47.88	33.07	0.00	0.28	15.65	2.23	99.11	20.2	78.2	1.7
10B3	Plag	46.05	34.44	0.30	0.00	17.89	1.38	100.06	12.2	87.8	0.0
10B5	Plag	50.34	32.03	0.19	0.00	14.66	3.19	100.41	28.3	71.7	0.0
10B7	Plag	51.42	30.73	0.40	0.00	13.77	3.71	100.03	32.8	67.2	0.0
10B13	Plag	46.79	33.79	0.57	0.00	17.31	1.70	100.16	15.1	84.9	0.0
12A12	Plag	50.74	30.69	0.33	0.11	13.64	3.68	99.19	32.6	66.8	0.6
12A13	Plag	48.33	32.54	0.47	0.00	15.78	2.48	99.60	22.1	77.9	0.0
具嵌晶结构之堆晶辉长岩											
10B6	Plag	52.49	29.08	0.79	0.00	12.30	4.40	99.06	39.3	60.7	0.0
均质辉长岩											
04M	Plag	51.42	30.70	0.33	0.00	13.28	4.00	99.73	35.3	64.7	0.0
12A6	Plag	52.46	30.34	0.48	0.00	12.86	4.24	100.38	37.4	62.6	0.0
12A10	Plag	53.02	30.00	0.38	0.00	12.54	4.50	100.44	39.4	60.6	0.0
12A14	Plag	52.93	30.04	0.19	0.13	12.49	4.36	100.14	38.4	60.8	0.8
均质苏长质辉长岩											
04K	Plag	52.93	29.25	0.26	0.13	12.05	4.48	99.10	39.9	59.3	0.8
12A2	Plag	55.11	28.85	0.47	0.14	11.34	5.16	101.07	44.8	54.4	0.8
12A5	Plag	51.80	29.89	0.51	0.10	12.68	4.33	99.31	38.0	61.5	0.6
12A8	Plag	52.81	29.66	0.44	0.00	12.57	4.45	99.93	39.0	61.0	0.0
12A17	Plag	52.46	29.95	0.30	0.16	12.54	4.27	99.68	37.8	61.3	0.9
12A21	Plag	53.06	29.75	0.27	0.00	12.30	4.47	99.85	39.7	60.3	0.0
角闪辉长岩											
04L	Plag	54.95	28.64	0.29	0.00	10.81	5.45	100.14	47.7	52.3	0.0

a) Plag: 斜长石(Plagioclase); Ab: 钠长石(albite); An: 钠长石(anorthite); Or: 钾长石(orthoclase); 全部 Fe 视为 Fe₂O₃