

俯冲的大陆岛弧

——柴北缘片麻岩的地球化学和同位素证据

孟繁聪, 张建新, 杨经绥

中国地质科学院地质研究所, 北京, 100037

内容提要:柴北缘早古生代高压—超高压变质带的片麻岩分为花岗质片麻岩和副片麻岩, 花岗质片麻岩的原岩形成于新元古代(900~1000 Ma), 岩石类型为英云闪长岩-奥长花岗岩-石英二长岩-花岗岩, 非活动性元素的特征类似于岛弧环境形成的花岗岩。副片麻岩的原岩可能为富铝的沉积岩, 其稀土元素特征类似于 PAAS(后太古宙澳大利亚的平均页岩)的稀土元素分布, 非活动性元素的特征与大陆岛弧沉积岩的特征类似。根据花岗质片麻岩与副片麻岩的共生关系结合其地球化学特征推测它们的原岩形成于岛弧环境。

鱼卡河花岗质片麻岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = 3.2 (t = 1.0 \text{ Ga})$, $T_{\text{DM}} = 1.3 \text{ Ga}$, 表明岩浆源区有大量起源于亏损地幔的初始地壳物质。而落凤坡、锡铁山、沙柳河的花岗质片麻岩与副片麻岩的 Sm-Nd 同位素组成类似, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -3.4 \sim -7.3 (t = 1.0 \text{ Ga})$, $T_{\text{DM}} = 1.8 \sim 2.2 \text{ Ga}$, 表明岩浆源区为先存的大陆地壳, 两类片麻岩地球化学特征的相似性说明岩浆源区的成分类似于变质沉积岩的组成。这项研究说明柴北缘早古生代的深俯冲卷入了大量的大陆岛弧岩石。

关键词: 同位素; 地球化学; 片麻岩; 柴达木北缘

长期以来, 柴达木盆地北缘(简称柴北缘)、祁连山地区变质岩所代表的古老陆块被认为是中朝克拉通的一部分(王云山等, 1987; 毛景文等, 1997; 左国朝等, 2002), 早古生代期间华北克拉通西南边缘发生裂解形成了散落在北祁连早古生代火山-沉积岩系之间的一些古陆块。或者认为阿拉善、北祁连、柴达木、塔里木变质基底在新元古代组成统一的古陆块, 称之为西域地台或西域克拉通(葛肖虹等, 2000)。可见, 对这些前寒武纪古陆块成因的认识仍存在较大分歧。

近年来, 柴北缘榴辉岩和片麻岩的岩相学、矿物学和年代学的研究表明, 柴北缘存在一条早古生代的高压—超高压变质带(杨经绥等, 1998, 2000, 2001; 张雪亭等, 1999; 张建新等, 2000, 2001, 2002; 宋述光等, 2001; Song et al., 2003b; 许志琴等, 2003), 这一变质带作为柴达木地体与祁连地体之间的一个重要的构造边界(Wan et al., 2001; 陆松年, 2002; 史仁灯等, 2004), 对探讨中国西部大陆的形成和演化至关重要。

如果没有精确的年龄数据和必要的地球化学信

息不可能认识到各种岩石类型之间时代和成因上的关系(江博明, 1989), 本文根据近年来获得的柴北缘地区片麻岩的地球化学和 Nd 同位素资料来探讨这些岩石的成因和演化。

1 地质背景

中国西北部的柴北缘、祁连山地区呈现“三地块两边界”的构造格局, 由南往北依次为: 柴达木地块、柴北缘俯冲碰撞杂岩带、中-南祁连地块、北祁连俯冲杂岩带和阿拉善地块(许志琴等, 1999; 陆松年等, 2002)。本文主要讨论柴北缘俯冲碰撞杂岩带(图1)。

这条俯冲碰撞杂岩带构成了柴北缘的南部单元(张建新等, 2003), NW-SE 走向, 南北宽约 20~30 km, 东西长约 350 km, 由西向东包括鱼卡河、锡铁山、沙柳河等地, 主要由花岗片麻岩组成, 该类片麻岩含有少量的榴辉岩透镜体。其次为一套变质表壳岩, 称为沙柳河岩群(辛后田等, 2002; 陆松年等, 2002), 主要由大理岩、石英岩、含石榴片岩、片麻岩和条带状斜长角闪岩组成, 含有大量的榴辉岩透镜

注: 本文为国家自然科学基金(编号 49732070)、地质调查项目(编号 20031300058)和国土资源部科技司项目(编号 2001010101)资助的成果。

收稿日期: 2004-07-11; 改回日期: 2004-10-15; 责任编辑: 郝梓国。

作者简介: 孟繁聪, 男, 1967年生。1989年毕业于长春地质学院, 1999年获中国地质大学(北京)博士学位。现为中国地质科学院地质研究所副研究员, 主要从事火成岩研究。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万大街26号, 中国地质科学院地质研究所; 电话: 010-68999716; Email: mengfancong@ccsd.org.cn。

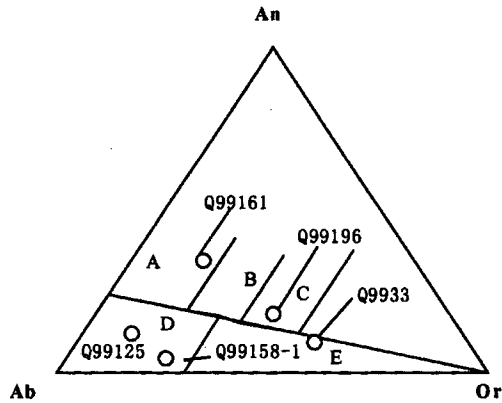


图 2 花岗片麻岩的 An-Ab-Or 分类图解

(据 O'Connor, 1965)

Fig. 2 An-Ab-Or triangular diagram showing feldspar normative composition of orthogneisses

(after O'Connor, 1965)

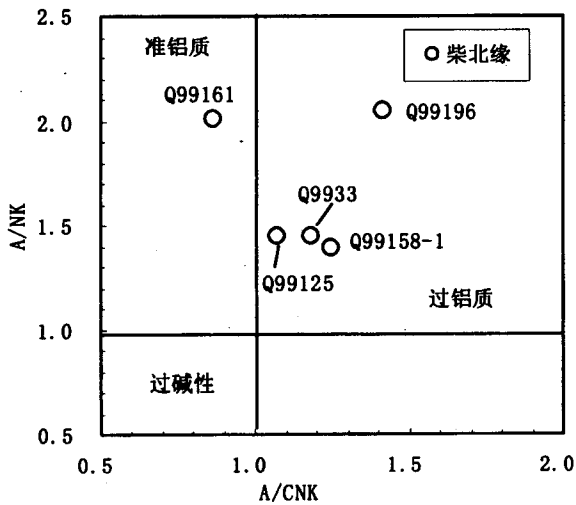
A—英云闪长岩; B—花岗闪长岩; C—石英二长岩;
D—奥长花岗岩; E—花岗岩A—Tonalite; B—granodiorite; C—quartzmonzonite;
D—trondhjemite; E—granite

图 3 A/CNK-A/NK 图解 (据 Maniar et al., 1989)

Fig. 3 Diagram of A/CNK vs A/NK (after Maniar et al., 1989)

0.38~0.74 之间。有 1 个样品特殊, Q99161 为 0.93, 这可能与它们成岩时的部分熔融过程或结晶分异过程有关, 也可能反映了花岗岩源岩的差异。

岩石富集 Rb、Sr、Ba, 亏损 Ti、P、Nb、Ta, 显示岛弧花岗岩的特征 (张建新等, 2003), 但其形成环境不明确。起源于下地壳和地幔柱的花岗岩都显示岛弧花岗岩的特征 (Kroner et al., 2001), 因此, 其形成环境需从岩石组合上综合分析。

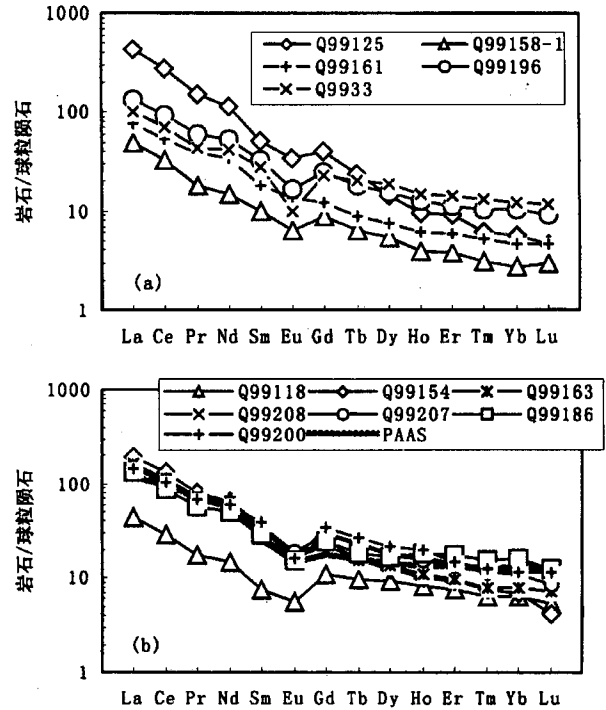


图 4 柴北缘高压—超高压变质带花岗片麻岩 (a) 和变质沉积岩的稀土元素配分模式 (b)

Fig. 4 Chondrite-normalized REE distribution patterns of gneisses (a—orthogneisses; b—metasediments) from HP—UHP metamorphic belt in North Qaidam Area 标准化的球粒陨石值据 Boynton (1984) (引自李昌年, 1992); PAAS—后太古宙澳大利亚的平均页岩 (McLennan, 1989) Chondrite normalization values are from Boynton (1984) (after Li C N, 1992); PAAS—post-Archean average Australian shale

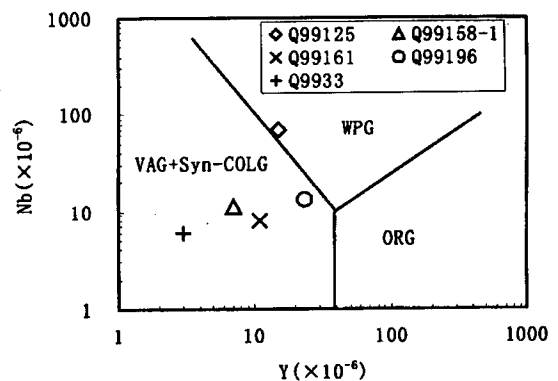


图 5 花岗片麻岩微量元素 Y-Nb 图解

Fig. 5 Diagram of Y-Nb of orthogneisses

VAG+Syn-COLG—火山弧花岗岩+同碰撞花岗岩; WPG—板内花岗岩; ORG—造山带花岗岩 (Pearce et al., 1984)

VAG+Syn-COLG—Volcanic-arc granite+syn-collisional granite;

WPG—within-plate granite; ORG—orogenic granite

(after Pearce et al., 1984)

表 1 柴北缘高压—超高压变质带片麻岩的主量元素(%)及微量元素($\mu\text{g/g}$)组成Table 1 Major(%) and trace element($\mu\text{g/g}$) contents of gneisses from HP-UHP metamorphic belt in North Qaidam area

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
采样地点	鱼卡	鱼卡	落凤坡	落凤坡	落凤坡	落凤坡	落凤坡	锡铁山	锡铁山	锡铁山	锡铁山	沙柳河
样品号	Q99118	Q99125	Q99154	Q99158-1	Q99161	Q99163	Q99208	Q99186	Q99196	Q99200	Q99207	Q9933
SiO ₂	67.04	57.66	65.57	75.27	58.85	64.23	68.56	62.23	63.30	70.84	69.68	73.39
TiO ₂	0.77	0.38	0.95	0.16	0.62	0.84	0.83	0.98	0.78	0.46	0.79	0.29
Al ₂ O ₃	16.73	19.24	19.09	13.99	17.60	17.95	15.50	20.48	16.87	15.19	15.50	13.17
Fe ₂ O ₃	0.56	0.85	0.73	0.03	1.39	1.29	4.54	0.82	1.28	0.18	0.75	0.45
FeO	4.90	8.78	5.05	1.17	4.54	5.51	1.60	5.53	4.76	3.22	4.29	2.10
MnO	0.04	0.17	0.02	0.03	0.13	0.11	0.15	0.09	0.12	0.06	0.10	0.06
MgO	1.53	0.78	1.38	0.48	2.89	1.59	1.48	1.71	2.02	0.77	1.40	0.66
CaO	0.66	2.60	0.16	0.68	6.40	0.28	0.81	0.55	2.05	1.28	1.09	1.18
Na ₂ O	1.04	7.05	0.78	4.68	4.03	1.06	0.84	1.47	2.57	2.18	1.88	2.24
K ₂ O	3.71	1.52	3.23	2.12	1.96	3.62	4.22	4.12	3.68	3.84	2.34	4.94
P ₂ O ₅	0.08	0.57	0.07	0.18	0.25	0.07	0.05	0.07	0.09	0.17	0.10	0.15
H ₂ O ⁺	2.22	0.92	2.50	0.92	0.82	2.86	1.60	1.64	1.46	1.88	1.98	0.72
CO ₂	0.55	0.18	0.27	0.27	0.18	0.18	0.18	0.09	0.37	0.40	0.33	0.28
DF	-3.0	7.0	-3.6	2.1	3.8	-3.2	-3.6	-1.7	0.1	-0.3	-2.6	0.1
A/CNK		1.07		1.24	0.82				1.41			1.18
A/NK		1.45		1.39	2.00				2.05			1.45
La	13.64	131.80	59.75	15.55	23.72	46.29	50.53	40.54	42.03	45.25	47.12	31.22
Ce	23.28	221.90	104.80	26.71	42.71	80.04	90.38	70.21	75.93	82.72	85.85	56.39
Pr	2.17	18.51	9.79	2.24	4.73	7.99	9.10	7.00	7.38	8.24	8.32	5.37
Nd	8.73	68.89	38.35	8.74	20.38	33.65	38.79	30.22	31.81	35.50	36.56	24.78
Sm	1.49	9.99	6.46	1.96	3.50	6.54	7.12	5.57	6.34	7.51	6.91	5.56
Eu	0.41	2.49	1.17	0.47	1.02	1.26	1.08	1.15	1.23	1.20	1.41	0.73
Gd	2.81	10.41	5.96	2.26	3.08	6.58	7.93	6.46	6.48	8.73	7.55	5.99
Tb	0.47	1.14	0.72	0.30	0.42	0.74	1.10	0.86	0.85	1.27	1.05	0.96
Dy	3.05	4.51	3.95	1.75	2.40	4.30	5.84	5.33	4.86	7.09	5.69	6.03
Ho	0.60	0.69	0.73	0.28	0.44	0.79	1.21	1.30	0.89	1.40	1.10	1.08
Er	1.57	1.95	1.96	0.78	1.23	2.04	2.96	3.62	2.31	3.09	2.81	2.98
Tm	0.21	0.20	0.24	0.10	0.17	0.26	0.42	0.50	0.33	0.40	0.37	0.42
Yb	1.33	1.18	1.48	0.56	0.97	1.64	2.74	3.40	2.13	2.40	2.34	2.54
Lu	0.18	0.15	0.14	0.10	0.15	0.24	0.40	0.42	0.30	0.38	0.28	0.39
$\sum \text{REE}$	59.94	473.81	235.50	61.80	104.92	192.36	219.60	176.58	182.87	205.18	207.36	144.44
Eu/Eu*	0.60	0.74	0.57	0.68	0.93	0.58	0.44	0.58	0.58	0.45	0.59	0.38
La _N /Yb _N	7	75	27	19	16	19	12	8	13	13	14	8
Y	14	15	16	7	11	17	28	28	23	32	25	3
Ba	584	297	468	232	1103	561	678	694	1151	591	474	392
Sc									8			3
V	102	6	132	9	138	94		117	90	41	78	
Cr	55	5	66	5	10	61	60	66	65	24	54	13
Co	8	13	9	5	15	15		13	38	8	12	
Ni	8	5	5	6	5	28	21	25	15	10	15	7
Rb	149	77	158	89	109	156	119	199	214	163	115	322
Sr	54	174	81	69	962	60	83	141	231	191	112	71
Zr	197	612	249	48	62	155	190	179	160	111	218	108
Nb	16	70	20	11	8	16	17	20	13	15	18	6
Th	14	15	16	5	5	7	10	13	14	14	8	16

岩石名称:1、3、6—石榴白云母石英片岩,2—二云斜长片麻岩,4—片麻状白云母花岗岩,5—片麻状黑云母花岗岩,7—石榴二云母变粒岩,8—砂线石榴二云母片岩,9—石榴二云母片麻岩,10—白云母二长片麻岩,11—砂线石榴二云母片麻岩,12—片麻状二云母花岗岩,空白处未检测。

在 Pearce 等(1984) Y-Nb 图解(图 5)上,显示为火山弧花岗岩。在 Pearce 等(1984)的(Yb+Ta)-Rb 图解上(图略)显示 Rb 的富集,具有同碰撞花岗岩的特征(陆松年等,2002)。

3.1.2 变质沉积岩

7 个样品为变质沉积岩,它们的 SiO₂ 含量为 62.23%~70.84%,且富钾贫钠:K₂O 含量为 3.23%~4.12%,Na₂O 含量为 0.78%~2.18%。Al₂O₃ 为 15.19%~20.48%,A/CNK 为 1.5~3.8,其原岩可能为富铝的泥砂质岩石,因而矿物组合中常出现石榴子石、矽线石等富铝矿物。

变质沉积岩的稀土元素配分模式为轻稀土富集型(表 1,图 4b),La_N/Sm_N 值为 4~6,La_N/Yb_N 值为 7~27,Eu/Eu* 为 0.45~0.60,明显的负铕异常。与澳大利亚的太古宙以后的泥质岩石(PAAS)的稀土元素组成很类似(McLennan,1989)。

变质沉积岩的 Th、Co、Zr 元素组成也与大陆岛弧环境的沉积岩的类似(Bhatia et al., 1986)(图 6)。La/Th 值多数介于 3.1~6.6,大于大陆岛弧沉积岩和大陆边缘的沉积岩的比值 2.4~1.8。

综合考虑变质花岗岩和变质沉积岩非活动性元素的含量以及变质花岗岩与变质沉积岩的共生关系,推测它们的原岩形成于岛弧环境的可能性较大。根据其地球化学特征的相似性以及变质沉积岩在变质花岗岩中呈包体(辛后田等,2002),推测变质沉积

岩的原岩比变质花岗岩的原岩形成早,沉积岩可能是花岗质岩石的源岩之一(Wan et al. 2001),目前还缺少年代学数据的支持。

3.2 Sm-Nd 同位素

柴北缘高压—超高压变质带变质花岗岩和变质沉积岩的 Sm-Nd 同位素组成见表 2。

参数计算如下(DePaolo, 1988):

(1)样品的亏损地幔钕模式年龄计算公式为:

$$T_{DM} = 1/\lambda \ln \{1 + [(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_s - (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{DM}] / [(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_s - (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{DM}]\}$$

式中 $\lambda = 0.00654 \text{ Ga}^{-1}$, s 代表样品的实测值,DM 为亏损地幔的参考值, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{DM} = 0.51315$, $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{DM} = 0.2137$ 。

(2) $\epsilon_{Nd}(0) = [(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_s / I_{CHUR}^{Nd}(0) - 1] \times 10000$ 。表示样品偏离球粒陨石钕同位素比值的程度。 s 代表样品的实测值, $I_{CHUR}^{Nd}(0) = 0.512638$,代表球粒陨石地幔源中 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 的现今值。

(3) $\epsilon_{Nd}(t)$ 代表球粒陨石地幔源中在 t 时的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值。 $\epsilon_{Nd}(t) = \epsilon_{Nd}(0) - Q \times f_{\text{Sm}/\text{Nd}} \times t$,其中 $Q = 25.1 \text{ Ga}^{-1}$, $f_{\text{Sm}/\text{Nd}} = (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_s / 0.1967 - 1$,表示样品偏离球粒陨石 Sm 同位素的程度,表中样品的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 按 $t = 1.0 \text{ Ga}$ 计算。

鱼卡河花岗质片麻岩的形成年龄为 1.02~1.03 Ga,取 $t = 1.0 \text{ Ga}$ 计算出的片麻岩的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 为 3.2(Q99125),平均地壳存留年龄为 1.3 Ga(表 2)。正的 $\text{Nd}(t)$ 值表明花岗岩的源区为起源于亏损地幔的初始物质,可能有少量新元古代之前的地壳物质的混合(Arandt et al., 1987; 江博明,1989)或者花岗岩由形成于 1.3 Ga 的基性下地壳物质部分熔融而成(Kroner et al., 2001)。

落凤坡的花岗片麻岩(Q99158)取 $t = 1.0 \text{ Ga}$ 计算出的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 为 -3.4,平均的地壳存留年龄为 2.2 Ga,3 个变质沉积岩的平均地壳存留年龄为 2.0~2.2 Ga,取 $t = 1.0 \text{ Ga}$ 计算出的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 介于 -5.5~-7.3(表 2)之间。花岗质片麻岩与变质沉积岩的 Sm-Nd 同位素组成十分相似,表明花岗岩的源岩与这些变质沉积岩的成分接近,花岗岩主要是由老的地壳物质改造而成的(Moller et al., 1998; Kroner et al., 2001)。

锡铁山的花岗片麻岩(Q99196)取 $t = 1.0 \text{ Ga}$ 计算出的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 为 -3.3,平均地壳存留年龄为 1.9 Ga,3 个变质沉积岩的平均地壳存留年龄 1.9~2.0 Ga,取 $t = 1.0 \text{ Ga}$ 计算出的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 介于 -3.8~-4.3(表 2),花岗质片麻岩与变质沉积岩的 Sm-Nd

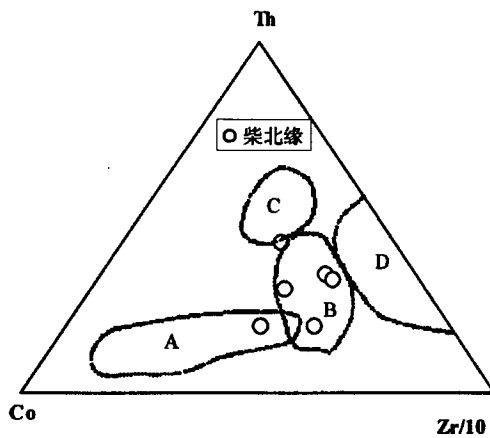


图 6 变质沉积岩的 Th-Co-Zr 图解
(据 Bhatia et al., 1986)

Fig. 6 Diagram of Th-Co-Zr of metasediments
(after Bhatia et al., 1986)

A—大洋岛弧; B—大陆岛弧; C—活动大陆边缘;
D—不活动大陆边缘

A—Oceanic island arc; B—continental island arc; C—active
continental margins; D—passive margins

表 2 柴北缘高压—超高压变质带片麻岩的 Sm-Nd 同位素组成
Table 2 Sm-Nd isotopic compositions of gneisses from HP—UHP metamorphic belt in North Qaidam Area

序号	样品号	采样位置	Sm($\mu\text{g/g}$)	Nd($\mu\text{g/g}$)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	2σ	t_{DM} (Ga)	$\epsilon_{\text{Nd}}(0)$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$
1	Q99125	大柴旦鱼卡河	12.980	79.500	0.09889	0.512161	7	1.31	-9.3	3.2
2	Q99154	大柴旦落凤坡	8.969	48.910	0.1109	0.511701	8	2.14	-18.28	-7.3
3	Q99158-1	大柴旦落凤坡	2.709	11.720	0.1397	0.512090	15	2.18	-10.69	-3.4
4	Q99163	大柴旦落凤坡	9.225	46.110	0.121	0.511929	7	2.01	-13.83	-4.2
5	Q99208	大柴旦落凤坡	11.060	58.780	0.1138	0.511815	7	2.03	-16.05	-5.5
6	Q99186	锡铁山	9.487	50.740	0.1131	0.511871	6	1.94	-14.96	-4.3
7	Q99196	锡铁山	7.520	39.600	0.1147	0.511930	14	1.88	-13.89	-3.3
8	Q99200	锡铁山	8.731	41.230	0.1281	0.511997	11	2.05	-12.5	-3.8
9	Q99207	锡铁山	7.128	35.660	0.1209	0.511929	6	2.00	-13.83	-4.2
10	Q9933	沙柳河	6.210	26.670	0.1408	0.512010	9	2.37	-12.23	-5.1

注: $t=1000$ Ma。

组成十分相似,表明花岗岩的源岩与这些变质沉积岩的成分接近,也主要是老的地壳物质改造而成。

沙柳河的花岗片麻岩(Q9933)取 $t=1.0$ Ga 计算出的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)=-5.1$,平均的地壳存留年龄为 2.4 Ga(表 2),同样表明花岗岩主要是由老地壳物质改造而成的。

4 讨论

4.1 Nd 模式年龄对柴北缘地壳形成时代的约束

柴北缘最早的地壳何时形成? 回答这个问题的关键在于识别地壳增长年龄和地壳改造年龄。Nd 模式年龄和锆石 U-Pb 年龄的综合制约,则有可能将地壳增长年龄和地壳改造年龄有效地区分出来(Arndt et al., 1987; 李献华等, 1991)。Nd 模式年龄与锆石 U-Pb 年龄接近,代表存在地壳的增生事件,否则可能以古老地壳的改造为主。柴北缘花岗质片麻岩的形成年龄为 900~1000 Ma(Wan et al., 2001; 郝国杰等, 2001; 宋述光, 2001; 陆松年, 2002; 张建新等, 2003),而多数片麻岩的 Nd 模式年龄偏老,为 1.8~2.1 Ga(表 2, 图 7)。这有两种可能性: ①初始地壳形成于古元古代(1.8~2.1 Ga),花岗岩是由古元古代的地壳改造而成。但由于花岗岩缺少古元古代的锆石 U-Pb 年龄记录,这一解释令人产生怀疑,除非在地壳改造过程中,锆石的古元古代年龄记录被彻底重置(Xie et al., 2001); ②古元古代的 Nd 模式年龄为新元古代新生的初始地壳与新元古代之前的古老地壳组分混合的“平均”年龄(Arndt et al., 1987; DePaolo, 1988; 江博明, 1989)。这除了需要有新元古代新生的地壳物质外,还必须大量古元古代之前的地壳岩石。花岗岩的地球化学特征显示新元古代在鱼卡河有新地壳的形成(表 2),其他地区主要为古老地壳的改造,并无新地壳形成。片麻岩 Nd 模式年龄和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值暗示存在新元古代

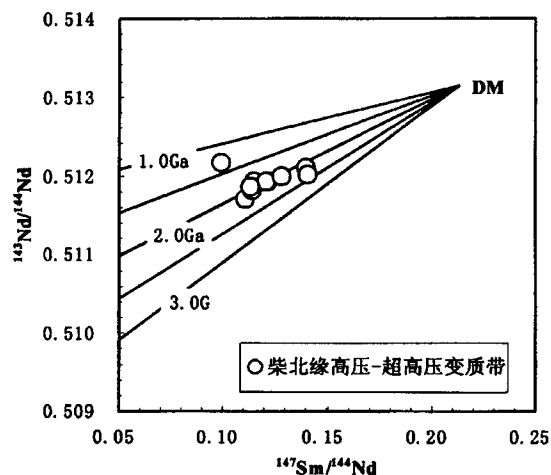


图 7 柴北缘高压—超高压变质带片麻岩的 Sm-Nd 同位素组成及演化

Fig. 7 Variation diagram of $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ - $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ of gneisses from HP-UHP metamorphic belt in North Qaidam Area

模式年龄(T_{DM})的参考线据江博明(1989)

Reference lines of model age (T_{DM}) after Jahn Bor-ming (1989)

之前的老地壳(表 2),但目前柴北缘高压—超高压变质带的岩石还没有古元古代及更老的锆石 U-Pb 年龄记录,这一问题还有待进一步测试探讨。

研究表明,1.8 Ga 是世界范围内大陆地壳增长的重要时期,如在我国华南 1.8 Ga 是地壳大规模增长的时期,形成华南地壳的大部分(李献华等, 1991),1.8 Ga 也是天山地壳增长的时期(Hu et al., 2000),在芬兰南部也有 1.8 Ga(1.7~1.9 Ga)大陆地壳增生的实例(Patchett et al., 1986)。考虑这些情况,柴北缘片麻岩古元古代的 Nd 模式年龄(1.8~2.1 Ga)可能反映当时存在大规模的地壳增长事件,而新元古代则以陆壳的改造为主,局部有地幔物

质的添加(如鱼卡)。

4.2 被俯冲的新元古代的大陆岛弧

柴北缘高压—超高压变质带的花岗质片麻岩的原岩形成于新元古代,它们的成分特征类似于TTG(英云闪长岩-奥长花岗岩)(图2),有两个样品的 Eu/Eu^* 值接近1(图4a),部分微量元素也显示岛弧花岗岩的特征。而与花岗片麻岩共生的变质沉积岩的Th、Co、Zr等微量元素与大陆岛弧环境的沉积岩类似(图6),推测片麻岩的原岩可能形成于大陆岛弧环境。都兰南带榴辉岩的原岩为低 TiO_2 高 Al_2O_3 ,轻稀土富集,高场强元素亏损的玄武质岩石,被认为形成于岛弧环境(Song et al., 2003a)。因此,柴北缘早古生代有大量岛弧性质的岩石组合卷入了深俯冲作用。

5 结论

(1) 柴北缘高压—超高压变质带中片麻岩Sm-Nd同位素组成显示这一地区地壳形成的最早时代可能为古元古代或更老。

(2) 柴北缘新元古代花岗岩的形成主要为先存陆壳的改造,无明显的地幔物质添加,但鱼卡地区新元古代有新地壳的形成。片麻岩的原岩花岗岩和沉积岩形成于大陆岛弧环境。

(3) 柴北缘早古生代发生的大陆俯冲作用,使新元古代岛弧型的岩石组合再次受到改造。

致谢:万渝生研究员提供了Sm、Nd含量数据,成文过程中与张宗清研究员进行了有益的讨论,在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- 葛肖虹,刘俊来. 2000. 被肢解的“西域克拉通”. 岩石学报, 16(1): 59~66.
- 郝国杰,陆松年,李怀坤,郑健康. 2001. 柴北缘沙柳河榴辉岩岩石学及年代学初步研究. 前寒武纪研究进展, 24(3): 154~162.
- 江博明. 1989. 太古代岩石的定年-方法学和局限性的讨论. 地球化学, (2): 103~119.
- 李昌年. 1992. 火成岩微量元素岩石学. 武汉: 中国地质大学出版社, 1~195.
- 李怀坤,陆松年,王辉初,袁振群,郑健康. 2003. 青海柴北缘新元古代超大陆裂解的地质记录——全集群. 地质调查与研究, 26(1): 27~37.
- 李献华,赵振华,桂训唐,于津生. 1991. 华南前寒武纪地壳形成时代的Sm-Nd和U-Pb同位素制约. 地球化学, (3): 255~263.
- 陆松年. 2002. 青藏高原北部前寒武纪地质初探. 北京: 地质出版社, 1~125.
- 陆松年,王惠初,李怀坤,袁桂邦,辛后田,郑健康. 2002. 柴达木盆地北缘“达肯大坂群”的再厘定. 地质通报, 21(1): 19~23.
- 毛景文,张招崇,杨建民,宋彪,吴茂炳,左国朝. 1997. 北祁连山西段前寒武纪地层单颗粒锆石测年及地质意义. 科学通报, 42(3):

- 1414~1417.
- 孟繁聪,张建新,杨经绥,许志琴. 2003. 柴北缘锡铁山榴辉岩的地球化学特征. 岩石学报, 19(3): 443~451.
- 青海地质矿产局. 1991. 青海区域地质志. 北京: 地质出版社, 1~662.
- 史仁灯,杨经绥,吴才来, Tsuyoshi Izuka, Takafumi Hirata. 2004. 柴达木北缘超高压变质带中的岛弧火山岩. 地质学报, 78(1): 52~64.
- 宋述光,杨经绥. 2001. 柴达木盆地北缘都兰地区榴辉岩中透长石+石英包裹体: 超高压变质作用的证据. 地质学报, 75(2): 179~185.
- 宋述光. 2001. 柴北缘都兰超高压地体的岩石学、矿物学、变质演化过程及构造意义. [博士学位论文] 北京: 中国地质科学院地质研究所, 1~96.
- 王云山,陈基娘. 1987. 青海省及毗邻地区变质地带及变质作用. 北京: 地质出版社, 213~220.
- 辛后田,郝国杰,王惠初,陈能松,韩英善,祁生胜. 2002. 柴北缘前寒武纪地层系统的新认识. 前寒武纪研究进展, 25(2): 113~119.
- 许志琴,杨经绥,张建新,姜枚,李海兵,崔军文. 1999. 阿尔金断裂两侧构造单元的对比及岩石圈剪切机制. 地质学报, 73(3): 193~205.
- 许志琴,杨经绥,吴才来,李海兵,张建新,戚学祥,宋述光,万渝生,陈文,邱海峻. 2003. 柴达木北缘超高压变质带形成与折返的时限及机制. 地质学报, 77(2): 163~176.
- 杨经绥,宋述光,许志琴,吴才来,史仁灯,张建新,李海兵,万渝生,刘焰,邱海峻,刘福来, Maruyama S. 2001. 柴达木盆地北缘早古生代高压—超高压变质带中发现典型超高压矿物——柯石英. 地质学报, 75(2): 175~179.
- 杨经绥,许志琴,李海兵,吴才来,崔军文,张建新,陈文. 1998. 柴北缘地区榴辉岩的发现及潜在的地质意义. 科学通报, 43(14): 1544~1549.
- 杨经绥,许志琴,宋述光,吴才来,史仁灯,张建新,万渝生,李海兵,金小赤, Marc Jolivet. 2000. 青海都兰榴辉岩的发现: 试论我国中央造山带中的高压—超高压变质带的分布及构造意义. 地质学报, 74(2): 156~168.
- 张建新,孟繁聪,戚学祥. 2002. 柴达木盆地北缘大柴旦和锡铁山榴辉岩中石榴子石环带对比及地质意义. 地质通报, 21(3): 123~129.
- 张建新,万渝生,孟繁聪,杨经绥,许志琴. 2003. 柴北缘夹榴辉岩的片麻岩(片岩)地球化学、Sm-Nd和U-Pb同位素研究——深俯冲的前寒武纪变质基底? 岩石学报, 19(3): 443~451.
- 张建新,万渝生,许志琴,杨经绥,孟繁聪. 2001. 柴达木北缘德令哈地区基性麻粒岩的发现及其形成时代. 岩石学报, 17(3): 452~458.
- 张建新,杨经绥,许志琴,张泽明,陈文,李海兵. 2000. 柴北缘榴辉岩的峰期和退变质年龄: 来自U-Pb及Ar-Ar同位素测定的证据. 地球化学, 29(3): 217~222.
- 张雪亭,吕惠庆,陈正兴,张宝华,李福祥,朱跃升,李朝兰,王彦. 1999. 柴北缘造山带沙柳河地区榴辉岩相高压变质岩石的发现及初步研究. 青海地质, 2: 1~12.
- 左国朝,刘义科,张崇. 2002. 北祁连造山带中-西段陆壳残块群的构造-地层特征. 地质科学, 37(3): 302~312.

References

- Arndt N T, Goldstein S L. 1987. Use and abuse of crust-formation ages. *Geology*, 15: 893~895.
- Bhatia M R, Crook K A W. 1986. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary

- basins. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92:181~193.
- Bureau of Geology and Mineral Resource of Qinghai Province. 1991. Regional geology of Qinghai province. Beijing: Geological Publishing House, 1~662(in Chinese with English abstract).
- DePaolo D J. 1988. Neodymium isotope geochemistry. Berlin: Springer, 1~186.
- Ge Xiaohong, Liu Junlai. 2000. Broken "Western China Craton". *Acta Petrologica Sinica*, 16(1):59~66(in Chinese with English abstract).
- Hao G J, Lu S N, Li H K, Zheng J K. 2001. Determination and significance of eclogite on Shaliuhe, in the north margin of the Qaidam basin. *Progress in Precambrian Research*, 24 (3):154~162(in Chinese with English abstract).
- Hu Aiqin, Jahn Bor-ming, Zhang Guoxin, Zhang Qinfeng, Chen Yibing. 2000. Crustal evolution and Phanerozoic crustal growth in northern Xinjiang; Nd-Sr isotopic evidence. Part I: isotopic characterisation of basement rocks. *Tectonophysics*, 328(1,2):15~51.
- Jahn Bor-ming, Zhang Zongqing. 1984. Rare earth geochemistry and petrogenesis of Archean granulite-gneisses from eastern Hebei province, north China. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 224~243.
- Jahn Bor-ming. 1989. Dating of Archean rocks-discussion on methodology and limitation. *Geochimica*. (2): 103~119 (in Chinese with English abstract).
- Kroner A, Willner A P, Hegner E, Jaeckel P, Nemchin A. 2001. Single zircon ages, PT evolution and Nd isotopic systematics of high-grade gneisses in southern Malawi and their bearing on the evolution of the Mozambique belt in southeastern Africa. *Precambrian Research*, 109:257~291.
- Li C N. 1992. Petrology of trace element of igneous. Wuhan: Publishing House of China University of Geosciences, 1~195(in Chinese).
- Li Huaikun, Lu Songnian, Wang Huichu, Xiang Zhenqun, Zhen Jiankang. 2003. Quanji Group—the geological record of the Rodinia supercontinent break-up in the Early Neoproterozoic preserved in the northern Qaidam margin, Qinghai, northwest China. *Geological Survey and Research*, 26 (1): 27~37 (in Chinese with English abstract).
- Li Xianhua, Zhao Zhenhua, Gui Xuntang, Yu Jinsheng. 1991. Sm-Nd isotopic and zircon U-Pb constraints on the age of formation of the Precambrian crust in southeast China. *Geochimica*, (3):255~263(in Chinese with English abstract).
- Lu S N. 2002. Preliminary study of Precambrian geology in the north Tibet—Qinghai Plateau. Beijing: Geological Publishing House, 1~125(in Chinese).
- Lu S N, Wang H C, Li H K, Yuan G B, Xin H T, Zheng J K. 2002. Redefinition of the "Dakendaban Group" on the northern margin of the Qaidam basin. *Geological Bulletin of China*, 21 (1):19~23 (in Chinese with English abstract).
- Maniar P D, Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101:635~643.
- Mao Jingwen, Zhang Zhaochong, Yang Jianmin, Song Biao, Wu Maobing, Zuo Guochao. 1997. Single-zircon dating of Precambrian strata in the west sector of the northern Qilian Mountains and its geological significance. *Chinese Science Bulletin*, 42(3):1414~1417(in Chinese).
- Meng F C, Zhang J X, Yang J S, Xu Z Q. 2003. Geochemical characteristics of eclogites in Xitieshan area, North Qaidam of northwestern China. *Acta Petrologica Sinica*, 19(3):443~451(in Chinese with English abstract).
- McLennan S M. 1989. Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes. Lipin B R, et al., ed. *Geochemistry and Mineralogy of Rare Earth Elements*, Reviews in Mineralogy, 21:169~200.
- Moller A, Mezger K, Schenk V. 1998. Crustal age domains and the evolution of the continental crust in the Mozambique Belt of the Tanzania: combined Sm-Nd, Rb-Sr and Pb-Pb isotopic evidence. *Journal of Petrology*, 39(4):749~783.
- O'Connor J T. 1965. A classification for quartz-rich igneous rocks based on feldspar ratio. USGS prof. paper, 525B:79~84.
- Patchett P J, Kouvo O. 1986. Origin of continental crust of 1.9~1.7 Ga age; Nd isotopes and U-Pb zircon ages in the Svecokarelian terrains of South Finland. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 92:1~12.
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rock. *Journal of Petrology*, 25:956~983.
- Shaw D M. 1972. The origin of the Apsley gneiss, Ontario. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 9:18~35.
- Shi Rendeng, Yang Jingsui, Wu Cailai, Tsuyoshi Iizuka, Takafumi Hirata. 2004. Island arc volcanic rocks in the North Qaidam UHP metamorphic belt. *Acta Geologica Sinica*, 78(1):52~64.
- Song Shuguang. 2001. Petrology, mineralogy and metamorphic evolution of the Dulan UHP terrane in North Qaidam, NW China, and its tectonic implications [Ph. D. Dissertation]. Beijing: Institute of Geology, CAGS, 1~96.
- Song S G, Yang J S, Liou J G, Xu Z Q. 2003a. Petrology, geochemistry and isotopic ages of eclogites from the Dulan UHP Terrane, the North Qaidam, NW China. *Lithos*, 70:195~211.
- Song S G, Yang J S, Xu Z Q, Liou J G and Shi R D. 2003b. Metamorphic evolution of the coesite-bearing ultrahigh-pressure terrane in the North Qaidam, Northern Tibet, NW China. *Journal of Metamorphic Geology*, 21(6):631~644.
- Song S G, Yang J S. 2001. Sanidine + quartz inclusions in Dulan eclogites: evidence for UHP metamorphism on the north margin of the Qaidam basin, NW China. *Acta Geologica Sinica*, 75(2): 179~185(in Chinese with English abstract).
- Wan Y S, Xu Z Q, Yang J S, Zhang J X. 2001. Age and composition of the Precambrian high-grade basement of the Qilian terrane and its adjacent areas. *Acta Geologica Sinica*, 75(4):375~384.
- Wang Yunshan, Chen Jiniang. 1987. Metamorphic zones and metamorphism in Qinghai Province and its adjacent areas. Beijing: Geological Publishing House, 213~220 (in Chinese).
- Xie Z, Chen J F, Zheng Y F, Zhang X, Li H M, Zhou T X. 2001. Zircon U-Pb dating of the metamorphic rocks of different grades from the southern part of the Dabie terrain in China. *Phys. Chem., Earth (A)*, 26(9~10):685~693.
- Xin H T, Hao G J, Wang H C, Chen N S, Han Y S, Qi S S. 2002. New idea on Precambrian strata in the Northern margin of Qaidam massif. *Progress in Precambrian Research*, 25(2):113~119(in Chinese with English abstract).
- Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Zhang Jianxin, Jiang Mei, Li Haibing, Cui Junwen. 1999. A Comparison between the tectonic units on the two sides of the Altun sinistral strike-slip fault and the mechanism of lithospheric shearing. *Acta Geologica Sinica*, 73(3):193~205

(in Chinese with English abstract).

- Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Wu Cailai, Li Haibing, Zhang Jianxin, Qi Xuexiang, Song Shuguang, Wan Yusheng, Chen Wen, Qiu Haijun. 2003. Timing and mechanism of formation and exhumation of the Qaidam ultra-pressure metamorphic belt. *Acta Geologica Sinica*, 77(2):163~176.
- Yang J S, Xu Z Q, Li H B, Wu C L, Cui J W, Zhang J X, Chen W. 1998. The discovery of eclogite in the northern margin of Qaidam basin, China. *Chin. Sci. Bull.*, 43(14):1544~1549 (in Chinese).
- Yang J S, Song S G, Xu Z Q, Wu C L, Shi R D, Zhang J X, Li H B, Wan Y S, Liu Y, Qiu H J, Liu F L, Maruyama S. 2001. Discovery of coesite in the north Qaidam early Paleozoic ultrahigh-pressure (UHP-HP) metamorphic belt, NW China. *Acta Geologica Sinica*, 75(2):175~179 (in Chinese with English abstract).
- Yang J S, Xu Z Q, Song S G, Wu C L, Shi R D, Zhang J X, Wan Y S, Li H B, Jin X C, Marc J. 2000. Discovery of eclogite in Dulan, Qinghai province and its significance for studying the HP-UHP metamorphic belt along the central orogenic belt of China. *Acta Geologica Sinica*, 74(2):156~168 (in Chinese with English abstract).
- Yang J S, Xu Z Q, Zhang J X, Song S G, Wu C L, Shi R D, Li H B and Maurice B. 2002. Early palaeozoic north Qaidam UHP metamorphic belt on the north-eastern Tibet plateau and a paired subduction model. *Terra Nova*, 14(5):397~404.
- Zhang J X, Meng F C, Qi X X. 2002. Comparison of garnet zoning between eclogites in Da Qaidam and Xitieshan on the northern of the Qaidam basin. *Geological Bulletin of China*, 21(3):123~129 (in Chinese with English abstract).
- Zhang J X, Wan Y S, Meng F C, Yang J S, Xu Z Q. 2003. Geochemistry, Sm-Nd and U-Pb isotopic study of gneisses (schists) enclosing eclogites in the north Qaidam mountains-deeply subducted Precambrian metamorphic basement? *Acta Petrologica Sinica*, 19(3):443~451.
- Zhang J X, Wan Y S, Xu Z Q, Yang J S, Meng F C. 2001. Discovery of basic granulite and its formation age in Delingha area, North Qaidam Mountains. *Acta Petrologica Sinica*, 17(3):452~458 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jianxin, Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Zhang Zeming, Chen Wen, Li Haibing. 2000. Peak and retrograde age of eclogites at the northern margin of Qaidam basin, NW China: Evidences from U-Pb and Ar-Ar dates. *Geochimica*, 29(3):217~222 (in Chinese with English abstract).
- Zhang J X, Yang J S, Meng F C, Wan Y S, Li H M, Wu C L. 2005. U-Pb isotopic studies of eclogites and their host gneisses in the Xitieshan area of the North Qaidam Mountains, western China: New evidence for an early Paleozoic HP-UHP metamorphic belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, (in press).
- Zhang X T, Lu H Q, Chen Z X, Zhang B H, Li F X, Zhu Y S, Li C L, Wang Y. 1999. Discovery of high-pressure metamorphic rocks of eclogite facies in Shaliuhe area of the north margin orogenic belt of Qaidam basin and its preliminary study. *Qinghai Geology*, 2:1~12 (in Chinese with English abstract).
- Zuo Guochao, Liu Yike, Zhang Chong. 2002. Tectono-stratigraphic characteristics of continent crustal remnants in central-western sector of the north Qilian Orogen. *Chinese Journal of Geology*, 37(3):302~312 (in Chinese with English abstract).

Subducted Continental Arc: Geochemical and Isotopic Evidence of Gneisses in the North Qaidam

MENG Fancong, ZHANG Jianxin, YANG Jingsui

Laboratory of Continental Dynamics, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037

Abstract

The gneiss of early Palaeozoic HP-UHP metamorphic belt in the north Qaidam subdivided into orthogneiss and paragneiss. Protoliths of orthogneiss formed in Neoproterozoic (900~1000 Ma), rock type of protoliths belong to tonalite-trondhjemite-quartzmonzonite-granite and their immobile trace element concentration is similar to granites formed in island Arc setting. Protoliths of paragneiss possibly were Al_2O_3 -rich sedimentary rocks, whose REE distribution patterns are similar to PAAS and immobile trace elements (Zr, Th, Co) are likely to sedimentary graywacks. According to associating of orthogneisses occurring with paragneisses extrapolate their protoliths are products in island arc setting.

The $\epsilon_{Nd}(t)$ values in orthogneisses from Yuka river for emplacement age of 1.0 Ga are 3.2~4.2, whereas the mean crustal residence age (T_{DM}) is 1.2~1.3 Ga. The positive $\epsilon_{Nd}(t)$ indicates an origin of the gneiss protolith from the depleted mantle juvenile material, but the Sm-Nd isotopic composition of orthogneisses and paragneisses from Luofengpo Xitieshan and Shaliuhe area is similar, with their $\epsilon_{Nd}(t)$ values are -3.4~-7.3 ($t=1.0$ Ga); whereas the mean crustal residence age (T_{DM}) is 1.8~2.2 Ga, indicating original source of magma is older crust of undetermined age. Geochemical and isotopic comparability between orthogneisses and paragneisses suggest a composition of original source of magma is similar to paragneisses. We consider deep subduction involved the great amount of assemblage of continental island arc.

Key words: isotopic composition; geochemistry; gneiss; North Qaidam