

文章编号: 1006-6616 (2017) 02-0253-11

甘肃北山牛圈子地区志留纪骆驼圈西岩体的 岩石成因及构造意义

余吉远^{1,2,3}, 计波^{1,2,3}, 郭琳^{1,2}

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054;

2. 中国地质调查局造山带地质研究中心, 陕西 西安 710054;

3. 国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要: 北山牛圈子地区的骆驼圈西埃达克岩为过铝质钙碱性岩浆系列, 具有高的 SiO_2 ($> 57.94\%$)、 Al_2O_3 ($> 16.66\%$) 和低的 MgO ($< 4.32\%$) 含量, 较高的 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值 (> 3.13), 显示富钠的特征; 而在微量元素上, 高 Sr ($589 \times 10^{-6} \sim 1170 \times 10^{-6}$), 低 Y ($4.60 \times 10^{-6} \sim 13.90 \times 10^{-6}$) 和 Yb ($0.43 \times 10^{-6} \sim 1.32 \times 10^{-6}$); 轻重稀土分异明显 (La/Dy)_N = $4.60 \sim 13.87$ 、(La/Yb)_N = $7.17 \sim 20.58$, Eu 异常不明显 ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.85 \sim 1.32$); 富集轻稀土和大离子亲石元素, 而亏损高场强元素 Nb , Ta , Ti 和重稀土 HREE , 与世界上典型的俯冲洋壳熔融形成的埃达克岩特征相似。结合区域上埃达克岩的研究成果和出露的构造位置, 以及与牛圈子蛇绿岩的关系, 认为骆驼圈西埃达克岩是志留纪 (U-Pb 年龄为 428.9 Ma) 时期热的洋壳向公婆泉—东七一山早古生代活动陆缘带俯冲过程中部分熔融的产物。对该岩体的研究, 为进一步研究北山造山带早古生代北山洋盆闭合和晚古生代北山洋盆重新裂开提供新的依据。

关键词: 埃达克岩; 锆石 U-Pb 年龄; 志留纪; 俯冲洋壳的部分熔融; 骆驼圈西岩体; 甘肃北山

中图分类号: P595, P597

文献标识码: A

0 引言

埃达克岩是具有低 Yb 、 Y 含量和高 Sr/Y 比值等特殊地球化学特征, 代表大洋岩石圈俯冲作用有关的一类岩石。Kay 在 1978 年^[1]首次发现于阿留申群岛的 Adak 岛上, 直到 1990 年, Defant 等^[2]才将这种特殊的岩石命名为 adakite (埃达克岩), 并且认为埃达克岩是俯冲板片的部分熔融作用的产物^[2~3], 可能代表了俯冲作用开始的记录^[4]。

埃达克岩特殊的地球化学特征和成因对恢复岩石形成的大地构造背景和陆壳增生研究十分重要。同时, 在岩浆起源与构造意义研究方面, 埃达克岩与蛇绿岩处于同等重要的地位^[5], 它代表一个构造岩浆旋回的开始。北山地区已有报道的

埃达克岩主要集中在红石山地区^[6~9]、柳园地区^[10]和金塔县以东地区^[11,12], 而目前北山地区最受关注的牛圈子地区却没有相关研究成果报道。作者通过中国地质调查局与西澳大利亚地质调查局合作开展的调查项目, 对牛圈子地区前人划分的马鬃山构造混杂岩带内的侵入岩做了大量的野外和室内研究工作, 通过锆石 U-Pb 年代学、地球化学研究, 发现研究区一套中酸性侵入岩具有典型埃达克岩的地球化学特征。因此, 本文主要探讨牛圈子地区埃达克岩的成因及构造意义。这一研究将对北山地区的构造地质背景研究和大地构造单元划分提供重要依据。

1 地质背景

北山造山带位于华北板块、塔里木板块、西

收稿日期: 2016-11-03

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“特殊地质地貌区填图试点”(DD20160060); 国家自然科学基金中天山阿拉塔格环状杂岩体成因研究(41202045); 中国地质大调查项目甘肃北山牛圈子地区 6 幅 1:5 万区域地质调查(12120113046400)

作者简介: 余吉远 (1978-), 男, 高级工程师, 从事区域地质矿产调查、岩石地球化学研究。E-mail: yujiyuan111@163.com

绿泥石英片岩组成;片岩岩片主要岩性组合绿泥钠长石英片岩、斜长黑云石英片岩、绢云绿泥片岩、绿泥斜长片岩、角闪斜长片岩夹变砂岩、变玄武岩、石英岩、变流纹岩等组成。

研究区发育中酸性岩为主的侵入体,呈岩基、岩株和岩脉状产出,岩石类型有石英闪长岩、花岗闪长岩、英云闪长岩、黑云母花岗岩、二长花岗岩等。大部分呈不规则状或条带状沿区域构造方向展布。本文研究主要针对骆驼圈西岩体展开(岩性包括石英闪长岩和英云闪长岩),为北西—南东向条带状展布,灰色、灰白色、灰褐色等,中—中粗粒结构,岩石风化破碎强烈,有少量钾长花岗岩脉和辉绿岩脉侵入。糜棱岩化十分发育,糜棱面理产状与区域构造线一致。围岩为马鬃山构造混杂岩带中的片岩岩片。

英云闪长岩(见图2a、2b):片麻状、块状构

造,半自形—他形结构。主要矿物为斜长石40%~60%,石英15%~30%,角闪石10%~20%,黑云母5%~10%。斜长石半自形—他形,粒状变晶有时见环带,石英多呈聚晶团块分布,零呈小粒径者呈填隙结构。黑云母叶片状,常集合体出现;副矿物见有榍石、磁铁矿、帘石、锆石等。

石英闪长岩(见图2c、2d):半自形—他形结构,块状构造,主要矿物为斜长石50%~70%,石英10%~15%,角闪石5%~20%,黑云母5%~10%。斜长石多呈半自形板柱状、大致定向分布,具有绢云母化、帘石化,个别出现环带构造,局部粒状变晶结构。石英单晶或聚晶,多数定向不明显,个别拉长定向,以他形粒状为主。角闪石半自形—他形粒状,褐绿—绿多色性,黑云母叶片状、褐—浅褐多色性,二者都大致定向。副矿物有磷灰石、榍石、帘石、磁铁矿、锆石等。

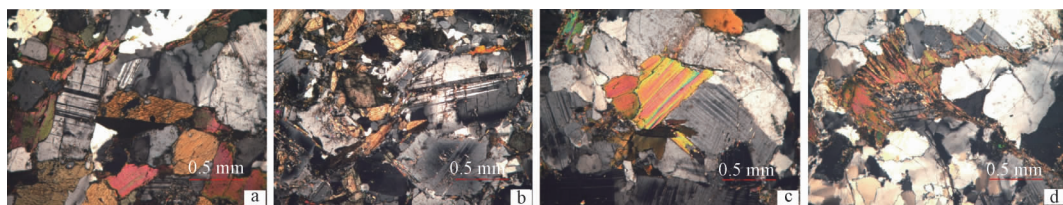


图2 石英闪长岩和英云闪长岩镜下照片

Fig. 2 Microscope photographs of Quartz diorite and Tonalite

2 分析方法

主量元素、微量元素均由中国地质调查局西安地质调查中心国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室分析测试。主量元素通过荧光光谱仪(XRF)测定,分析精度优于5%,分析方法采用熔融制片法,用碱熔法测 Fe_2O_3 ,用酸溶法测 FeO 。微量元素采用ICP-MS(等离子质谱法)分析,分析精度均高于10%。锆石的CL图像和LA-ICP-MS法单颗粒锆石微区U-Pb年龄测定是在西北大学大陆动力学教育部重点实验室完成。锆石年龄采用国际标准锆石91500作为外标标准物质,元素含量采用NIST SRM610作为外标,29Si作为内标。测试结果通过GLITTER(ver4.0, Mac-quarie University)软件计算得出,用LAM-ICPMS Common Lead Correction(ver3.15)对其进行了普通铅校正,年龄计算及谐和图采用Isoplot(ver3.0)完成。详细分析步骤和数据处理方法参见参考文献^[23]。

3 数据与结果

骆驼圈西埃达克岩的主量元素、微量元素、稀土元素分析结果见表1。

3.1 主量元素

骆驼圈西埃达克岩在主量元素组成上: SiO_2 为57.94%~69.17%, Al_2O_3 为16.66%~18.49%, Na_2O 为3.33%~4.85%,具有相对较低 MgO (0.97%~4.32%),而有相对较高的镁指数($\text{Mg}^\# = 44.32 \sim 62.68$),以及较低的 TiO_2 (0.25%~0.86%)和 CaO (3.86%~7.58%)含量。岩石的全碱含量为4.27%~5.99%, $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$,所有样品的 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} > 2$ (3.13~5.99),表明该岩石为富钠花岗岩,且 A/CNK 比值为1.55~1.74,明显大于1;而样品碱度率 AR 为1.39~1.77,为过铝质钙碱性岩浆系列岩石。在主量元素协变图解上,均具有较好的线性关系(见图3)。

表 1 牛圈子地区埃达克岩主量 (%) 与微量元素 (10⁻⁶) 化学分析结果

Table1 Major and trace element compositions of the adakite from Niujuanzi region

sample	131042	131062	131044	131064	132001	131061	131012	131041
岩性	英云闪长岩					石英闪长岩		
SiO ₂	69. 17	66. 68	67. 70	66. 87	65. 10	57. 94	60. 16	60. 54
TiO ₂	0. 25	0. 34	0. 35	0. 31	0. 36	0. 86	0. 67	0. 67
Al ₂ O ₃	16. 59	17. 42	16. 66	17. 35	17. 32	18. 49	17. 05	17. 10
Fe ₂ O ₃	0. 90	1. 14	1. 15	1. 18	1. 83	1. 99	1. 86	1. 84
FeO	1. 37	1. 72	1. 88	1. 56	1. 42	2. 79	3. 79	3. 49
MnO	0. 05	0. 05	0. 06	0. 05	0. 06	0. 08	0. 09	0. 10
MgO	0. 97	1. 35	1. 37	1. 27	1. 54	4. 32	3. 61	3. 33
CaO	3. 86	4. 46	4. 48	4. 70	4. 63	7. 58	6. 47	5. 69
K ₂ O	1. 03	1. 26	1. 20	1. 07	0. 81	0. 94	0. 92	1. 21
Na ₂ O	4. 64	4. 73	4. 24	4. 57	4. 85	3. 33	3. 60	3. 77
P ₂ O ₅	0. 11	0. 13	0. 14	0. 13	0. 13	0. 13	0. 19	0. 21
LOI	0. 89	0. 51	0. 55	0. 77	1. 79	1. 22	1. 15	1. 63
total	99. 84	99. 79	99. 78	99. 82	99. 84	99. 67	99. 56	99. 57
AR	1. 77	1. 75	1. 69	1. 69	1. 69	1. 39	1. 48	1. 56
A/CNK	1. 74	1. 67	1. 68	1. 68	1. 68	1. 56	1. 55	1. 6
Mg [#]	0. 44	0. 47	0. 46	0. 46	0. 47	0. 63	0. 54	0. 54
Cr	8. 5	8. 9	14	9. 8	11. 7	34. 9	55. 4	48. 9
Ni	5. 55	7. 94	10. 4	7. 05	13. 2	18. 7	46	40. 8
V	39. 2	54. 4	51. 4	50. 5	59. 7	112	147	121
Sc	4. 82	5. 21	5. 22	5. 25	7. 28	12. 1	14. 5	15
Co	5. 99	8	8. 49	7. 43	9. 34	18. 2	20. 5	19. 6
Rb	21. 5	29. 1	25. 8	16. 3	13	20. 1	23. 5	37. 6
Cs	1	2. 28	1. 46	1. 34	0. 76	0. 8	1. 26	1. 74
Sr	595	654	602	695	694	1170	592	589
Ba	313	355	408	407	277	191	272	315
Ga	17. 4	18. 7	17. 9	18. 1	18. 3	19. 3	19. 3	19. 1
Pb	12. 6	12	9. 02	11. 3	9. 6	6. 89	10. 1	10. 2
U	0. 57	0. 62	0. 58	0. 47	0. 52	0. 44	1. 06	1. 56
Th	4. 05	1. 17	3. 79	1. 5	1. 99	1. 08	4. 32	4. 76
Nb	2. 36	2. 36	3. 11	1. 92	2. 42	2. 54	3. 42	5. 38
Ta	0. 22	0. 22	0. 28	0. 18	0. 15	0. 2	0. 29	0. 43
Zr	84. 1	74. 5	103	63. 3	90. 1	79. 3	129	88. 9
Hf	2. 79	2. 1	2. 86	1. 69	2. 57	2. 47	3. 44	2. 65
Y	5. 05	5. 22	6. 41	4. 6	6. 93	10. 9	13	13. 9
La	13. 2	6. 47	11. 6	8. 58	7. 56	10	12. 9	16. 8
Ce	26. 5	14	23. 9	18. 2	17. 6	24. 8	29. 5	38. 2
Pr	3. 28	1. 72	2. 8	2. 13	2. 43	3. 32	3. 85	5. 03
Nd	11. 2	7. 29	10. 6	8. 17	10	13. 5	15. 6	19. 6
Sm	2. 19	1. 81	2. 19	1. 62	2. 13	2. 91	3. 76	4. 31
Eu	0. 56	0. 65	0. 8	0. 67	0. 69	1. 08	1. 1	1. 12
Gd	1. 53	1. 47	1. 8	1. 42	1. 78	2. 65	3. 28	3. 57
Tb	0. 2	0. 19	0. 25	0. 18	0. 25	0. 4	0. 48	0. 52
Dy	1. 02	1. 03	1. 42	0. 97	1. 46	2. 33	2. 72	2. 96
Ho	0. 18	0. 2	0. 24	0. 19	0. 29	0. 44	0. 52	0. 54
Er	0. 47	0. 5	0. 64	0. 48	0. 71	1. 1	1. 32	1. 41
Tm	0. 06	0. 08	0. 09	0. 07	0. 10	0. 16	0. 20	0. 21
Yb	0. 46	0. 47	0. 64	0. 43	0. 65	1	1. 29	1. 32
Lu	0. 059	0. 074	0. 076	0. 066	0. 093	0. 14	0. 19	0. 2
Σ REE	60. 91	35. 95	57. 04	43. 17	45. 74	63. 83	76. 71	95. 79
LREE	56. 93	31. 94	51. 89	39. 37	40. 41	55. 61	66. 71	85. 06
HREE	3. 98	4. 01	5. 15	3. 80	5. 33	8. 22	10. 00	10. 73
Eu/Eu *	0. 89	1. 18	1. 20	1. 32	1. 05	1. 17	0. 94	0. 85
(La/Yb) _N	20. 58	9. 87	13	14. 31	8. 34	7. 17	7. 17	9. 13
(Ho/Yb) _N	1. 18	1. 28	1. 13	1. 33	1. 34	1. 32	1. 21	1. 23
(La/Dy) _N	13. 87	6. 73	8. 75	9. 48	5. 55	4. 60	5. 08	6. 08

Eu/Eu * = Eu_N/ (Sm_N × Gd_N)^{1/2}, (La/Yb)_N、(Ho/Yb)_N、(La/Dy)_N is ratio of Chondrite [24]

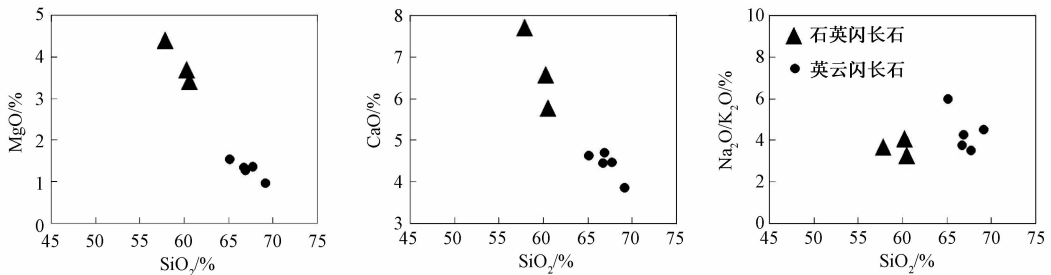


图 3 骆驼圈西岩体主量元素地球化学特征

Fig. 3 Covariation diagram of selected major oxides MgO, CaO and Na₂O/K₂O versus SiO₂ in West-Luotuojuan Rocks

3.2 微量元素

在微量元素组成上, 所有样品表现出相似的特征 (见图 4a): ①高 Sr ($589 \times 10^{-6} \sim 1170 \times 10^{-6}$), 低 Y ($4.60 \times 10^{-6} \sim 13.90 \times 10^{-6}$) 和 Yb ($0.43 \times 10^{-6} \sim 1.32 \times 10^{-6}$), $Sr/Y = 42.37 \sim 151.09$; ②富集大离子亲石元素, 强烈亏损 Nb ($< 5.38 \times 10^{-6}$)、Ta ($< 0.43 \times 10^{-6}$) 和 Ti ($< 0.51\%$) 等高场强元素; ③具有较高的 Sr/Y 和 La/Yb 比值, 分别大于 42.37 和 10。在原始地幔标准化的微量元素蛛网图上 (见图 4a), 富集强不相

容元素 Rb, Ba, Th, U, Sr, 少量样品 Th, U 相对亏损, 总体显示富集趋势; 亏损高场强元素 Nb, Ta, Ti。稀土元素总量为 $\Sigma REE = 35.95 \times 10^{-6} \sim 95.79 \times 10^{-6}$, 在稀土配分模式图上曲线近一致, 具有强分馏的稀土元素配分模式 (见图 4b), 配分曲线显示右倾。富集 LREE ($(La/Dy)_N = 4.60 \sim 13.87$), 亏损 HREE ($(La/Yb)_N = 7.17 \sim 20.58$), 轻重稀土元素分异明显, Yb 含量较低 ($0.43 \times 10^{-6} \sim 1.32 \times 10^{-6}$)。 $Eu/Eu^* = 0.85 \sim 1.32$, Eu 异常不明显。

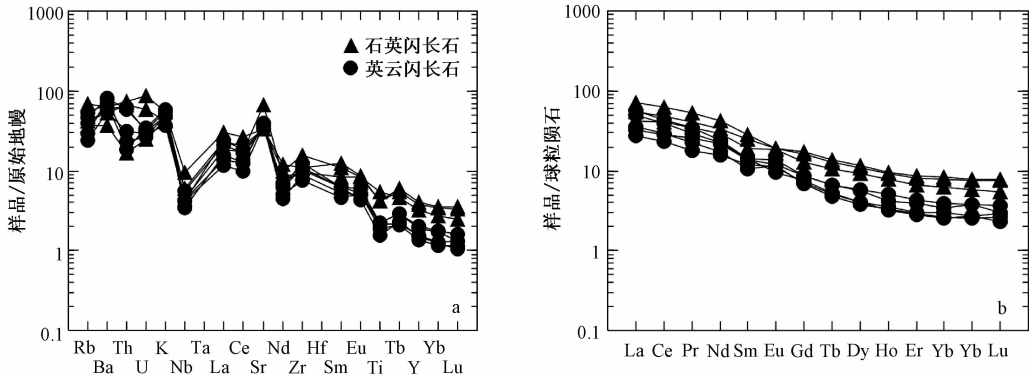


图 4 骆驼圈西岩体位微量元素蛛网图和稀土元素配分曲线^[24]

Fig. 4 Primitive mantle normalized trace elements spider diagrams and chondrite normalized REE distribution patterns of West-Luotuojuan Rocks

3.3 锆石 U-Pb 年龄

本文对牛圈子地区骆驼圈西岩体英云闪长岩样品 (132053) 的锆石进行了 U-Pb 同位素年龄测试, 样品锆石颗粒在 $50 \sim 150 \mu m$, 阴极发光图像 (CL) 显示大部分锆石具有良好的晶形, 呈岩浆结晶的环带或条带结构, 具有岩浆锆石的特征 (见图 5), 12 个锆石点 Th/U 比值在 $0.26 \sim 0.91$ 之间, 除一个点小于 0.4 以外, 其余均大于 0.4 (见表 2), 位于岩浆锆石的比值范围内, 表面年龄在

$425.5 \sim 435.8$ Ma 范围内, 加权平均年龄为 428.9 ± 3.5 Ma ($n = 12$, $MSWD = 0.30$) 代表了锆石结晶年龄 (见图 6), 即骆驼圈西岩体形成年龄。而另 5 个锆石, 其颗粒相对较小, 没有环带或条带结构 (见图 5), 给出了较年轻的分析结果, 加权平均年龄为 363 ± 15 Ma ($n = 5$, $MSWD = 0.19$), Th/U 比值在小于 0.10 (见表 2), 可能代表了变质作用时代。这与该期岩体十分发育的糜棱岩化相符, 变质锆石可能是北山早古生代洋盆闭合的信息。

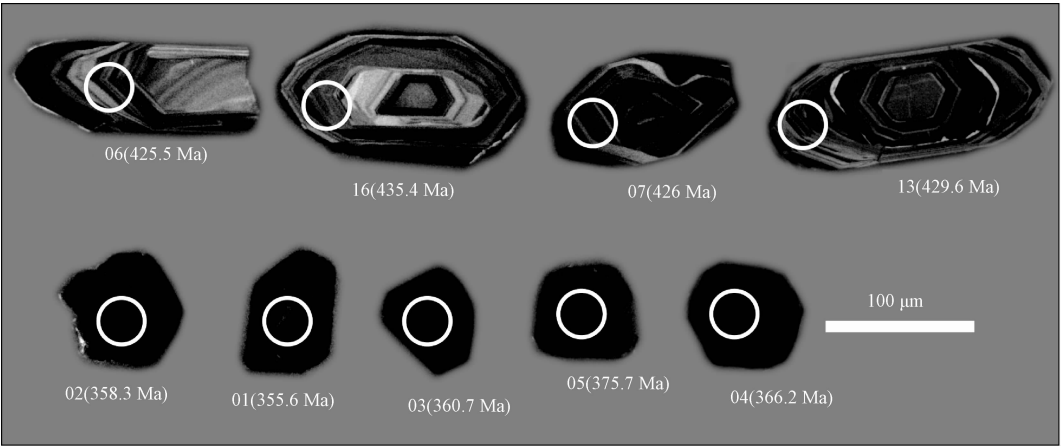


图 5 代表性锆石 CL 图像

Fig. 5 CL images of representative zircons

表 2 北山造山带骆驼圈西英云闪长岩锆石 U-Pb 同位素分析结果

Table 2 LA-ICP-MS U-Pb zircons dating results of sample (132053) from West-Luotuojuan in Beishan orogen																	
Analysis_#	Th	U	Th/U	Pb207/Pb206		Pb207/U235		Pb206/U238		Pb208/Th232		Pb207/U235		Pb206/U238		Pb208/Th232	
				ratio	1sigma	ratio	1sigma	ratio	1sigma	ratio	1sigma	ratio	1sigma	ratio	1sigma	ratio	1sigma
132053-01	81.69	3550.82	0.02	0.05571	0.00092	0.43564	0.00730	0.05672	0.00079	0.04629	0.00186	367.2	5.16	355.6	4.8	914.5	35.84
132053-02	28.94	1223.24	0.02	0.05675	0.00089	0.44718	0.00720	0.05715	0.00077	0.02215	0.00060	375.3	5.05	358.3	4.69	442.9	11.95
132053-03	157.31	4170.61	0.04	0.05856	0.00099	0.46470	0.00796	0.05755	0.00081	0.03784	0.00155	387.5	5.52	360.7	4.92	750.6	30.28
132053-04	50.28	2494.59	0.02	0.05756	0.00095	0.46393	0.00781	0.05845	0.00080	0.02060	0.00064	387	5.41	366.2	4.89	412.1	12.6
132053-05	223.89	2183.09	0.10	0.10248	0.00165	0.84796	0.01387	0.06001	0.00083	0.06666	0.00205	623.5	7.62	375.7	5.07	1304.4	38.86
132053-06	503.50	554.08	0.91	0.05582	0.00092	0.52517	0.00878	0.06823	0.00093	0.02101	0.00057	428.6	5.84	425.5	5.62	420.3	11.22
132053-07	197.21	450.71	0.44	0.05550	0.00103	0.52273	0.00967	0.06831	0.00097	0.02156	0.00070	427	6.45	426	5.88	431.2	13.79
132053-08	366.42	421.73	0.87	0.05524	0.00117	0.52042	0.01076	0.06833	0.00102	0.02038	0.00063	425.4	7.18	426.1	6.16	407.9	12.45
132053-09	205.79	313.27	0.66	0.05508	0.00099	0.51935	0.00935	0.06838	0.00097	0.02067	0.00062	424.7	6.25	426.4	5.83	413.5	12.19
132053-10	184.73	419.12	0.44	0.05537	0.00097	0.52254	0.00920	0.06844	0.00096	0.02217	0.00067	426.8	6.14	426.8	5.76	443.3	13.25
132053-11	425.11	672.40	0.63	0.05454	0.00089	0.51680	0.00858	0.06872	0.00093	0.02161	0.00059	423	5.74	428.5	5.64	432.1	11.71
132053-12	166.55	281.16	0.59	0.05709	0.00120	0.54205	0.01111	0.06885	0.00103	0.02243	0.00074	439.8	7.32	429.2	6.2	448.3	14.65
132053-13	257.49	655.48	0.39	0.05789	0.00147	0.55007	0.01334	0.06891	0.00114	0.01945	0.00132	445	8.74	429.6	6.85	389.4	26.22
132053-14	431.94	865.59	0.50	0.05818	0.00118	0.55336	0.01103	0.06899	0.00103	0.02131	0.00217	447.2	7.21	430.1	6.23	426.1	42.92
132053-15	206.52	355.68	0.58	0.06019	0.00129	0.57471	0.01196	0.06925	0.00106	0.02185	0.00076	461.1	7.71	431.6	6.37	436.9	15.01
132053-16	65.00	248.92	0.26	0.06119	0.00120	0.58951	0.01143	0.06987	0.00102	0.02470	0.00101	470.6	7.3	435.4	6.15	493.2	19.97
132053-17	54.30	125.52	0.43	0.06421	0.00193	0.61913	0.01749	0.06994	0.00128	0.02492	0.00119	489.3	10.97	435.8	7.72	497.6	23.43

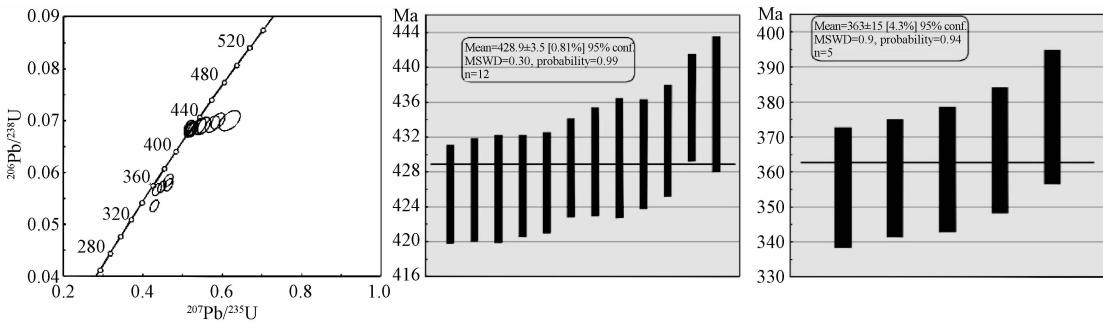


图 6 单颗粒锆石的谐和图及 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄直方图

Fig. 6 Concordia diagram and weighted average $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age for single-grain zircon from West-Luotuojuan rocks

4 讨论

4.1 岩石成因

埃达克岩的初始定义^[2]是具有典型的地球化学特征: $\text{SiO}_2 \geq 56\%$, 高铝 ($\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 15\%$) 低 Y ($\leq 18 \times 10^{-6}$) 和 Yb ($< 1.9 \times 10^{-6}$), 而 Sr 含量较高 ($> 400 \times 10^{-6}$), LREE 富集, 无或轻微 Eu 异常。同时, Garrison and Davidson^[25] 认为产生埃达克岩最基本条件是地壳厚度应满足石榴角闪岩相或榴辉岩相稳定的最低深度。埃达克岩代表了一种高压构造体制的物质, 对研究岩石形成的地球动力学背景具有重要意义。

地球化学特征表明, 骆驼圈西岩体具有典型的埃达克岩特征: 高 SiO_2 (57.94% ~ 69.17%),

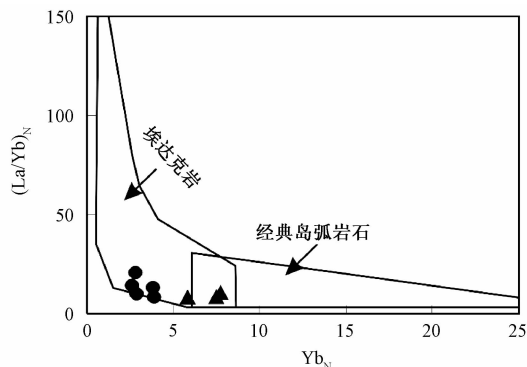
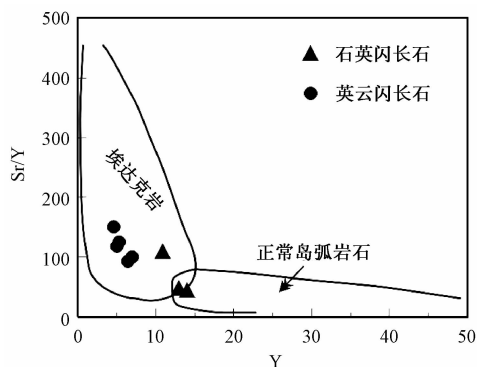


图7 骆驼圈西岩体 Sr/Y -Y 和 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ - Yb_N 判别图^[2]

Fig. 7 Discrimination diagram of Sr/Y -Y and $(\text{La}/\text{Yb})_N$ - Yb_N for West-Luotuojuan rocks

埃达克岩的成因有多种认识: ①小于 25 Ma 的年轻洋壳俯冲所发生部分熔融产物^[2,28]; ②老的洋壳在特定俯冲作用也能形成埃达克岩^[29]; ③增厚下地壳发生拆沉或底侵作用导致的部分熔融也可形成^[30-33];

北山骆驼圈西岩体的岩石学、地球化学研究表明其岩石类型为富 Al 富 Na_2O 的钙碱性岩浆, 与俯冲洋壳熔融形成埃达克岩一致^[2], 而与富 K、富碱、低 Al 的、形成于增厚下地壳部分熔融的埃达克岩有明显区别^[30,31,33]。而且其强烈亏损高场强元素 Nb、Ta 和 HREE ($\text{Yb}_N = 2.53 \sim 7.76$), $\text{Y}/\text{Yb} = 10.02 \sim 11.11$, 均大于 10; $(\text{Ho}/\text{Yb})_N = 1.13 \sim 1.34$, Eu 异常不明显, 而 Sr 正异常十分明显, 表明其源区中斜长石已经消失, 石榴石以残留相保留, 这可能与源岩在榴辉岩相条件下部分熔融有关^[34-35]。同时, 其较高的 Mg、Cr 和 Ni、V、Sc、Co 等过度元素含量与角闪岩或榴辉岩实验形

成的高 Al_2O_3 (16.66% ~ 18.49%), 相对较低的 MgO (0.97% ~ 4.32%), $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 3.12 \sim 5.99$, 均大于 2, 与俯冲有关的埃达克岩主量元素特征相近^[26]; 高 Sr ($589 \times 10^{-6} \sim 1170 \times 10^{-6}$, 平均为 698.88×10^{-6}), 低 Y ($4.60 \times 10^{-6} \sim 13.90 \times 10^{-6}$, 平均为 8.25×10^{-6}) 和 Yb ($0.43 \times 10^{-6} \sim 1.32 \times 10^{-6}$, 平均为 0.78×10^{-6}), Sr/Y 比值 > 42.37 。低 HREE ($3.80 \times 10^{-6} \sim 10.73 \times 10^{-6}$, 平均为 6.40×10^{-6}), 轻稀土分异明显 ($7.17 < (\text{La}/\text{Yb})_N < 20.58$, 平均值为 11.20), 也与典型埃达克岩微量元素特征相似。在 Sr/Y -Y 和 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ - Yb_N 判别图上 (见图 7), 样品都落入埃达克岩区域, 同样可以说明骆驼圈西岩体符合典型埃达克岩的特征^[27]。

成的埃达克质岩浆中的元素含量不一致, 这是由于板片熔融形成的埃达克岩浆上升过程中受到地幔橄榄岩混染导致的^[36]。而这种 MgO 和过渡元素含量增高, SiO_2 含量降低也是俯冲洋壳板片熔融形成的埃达克岩的典型特征^[29]。

$\text{Mg}^\#$ ($\text{Mg}^\# = 0.44 \sim 0.63$, 平均 0.50) 大于典型的 MORB 部分熔融的产物 ($\text{Mg}^\# < 0.45$ ^[36]), 相对富 Na 贫 K ($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 0.17 \sim 0.32$), 指示源岩可能为高度亏损 K_2O 的大洋拉斑玄武岩, 且部分熔融相对较高, 熔体形成后很可能与玄武质岩浆发生一定程度的交代作用。在 SiO_2 - MgO 图解中, 所有样品均落入洋壳板片熔融形成的埃达克岩区域 (见图 8), 而骆驼圈西岩体作为红柳河—牛圈子—洗肠井早古生代缝合带牛圈子段的一部分, 并与牛圈子蛇绿岩带相伴产出, 也支持其俯冲板片部分熔融成因^[37,38]。

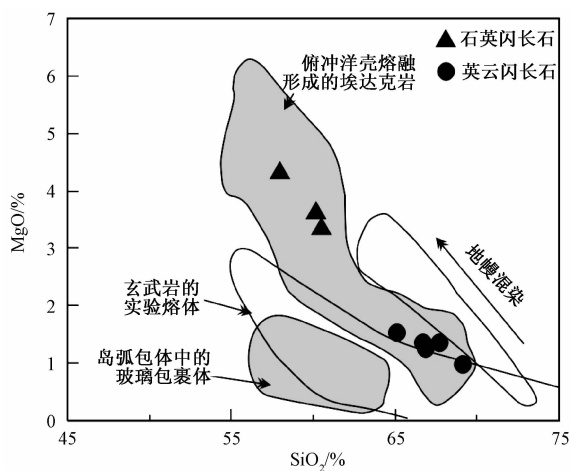


图 8 埃达克岩与玄武岩的实验熔体的 SiO₂-MgO 图解^[29]

Fig 8 SiO₂-MgO diagrams of the experimental melt of adakite and the basalts

因此，骆驼圈西埃达克岩是俯冲板片在榴辉岩相条件下部分熔融形成的，在岩浆上升过程中受到地幔橄榄岩的强烈混染。

4.2 动力学过程及对洋陆转换的指示意义

北山地区早寒武世薄层状大理岩、灰岩，标志其为浅海或者滨海相环境的产物；中晚寒武世

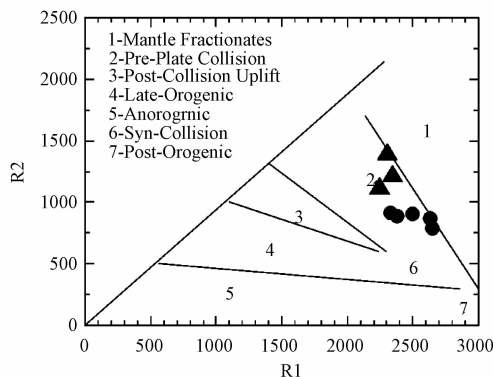
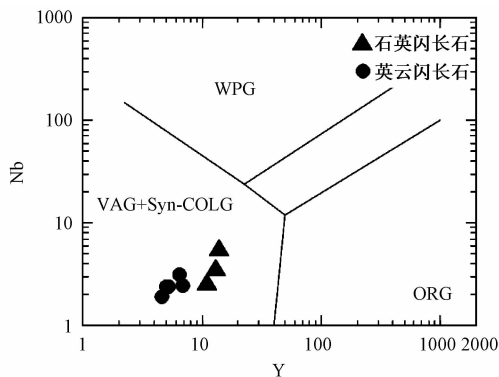


图 9 骆驼圈西岩体 Y-Nb 图和 R1-R2 图

Fig. 9 Y-Rb relation of the granites and R1-R2 diagram of West-Luotuojuan rocks

本次获得骆驼圈西岩体锆石 U-Pb 年龄为 428.9 ± 3.5 Ma。北山柳园地区发育有时代为 424 ± 4 Ma 的埃达克岩，其形成与洋壳俯冲消减作用有关^[10]。其在区域上与骆驼圈西岩体可能共同组成了一条近东西向的埃达克质岩浆带。同时，在北山造山带内，志留纪发育大规模的混合岩化、片麻岩化以及达到角闪岩相的变质作用^[16]。这说明公婆泉—东山七一山早古生代活动陆缘带存在强烈的构造地质作用，具有较高的地热梯度，可

青灰色硅质岩夹薄层状灰岩，标志其为深海相化学沉积的产物；而奥陶纪出露大量灰黑色—黑色的硅质岩，代表北山处于最大拉张期；而中一晚泥盆世三个井组与寒武纪、奥陶纪地层之间均为不整合接触关系，可能代表了北山地区早古生代洋盆演化的结束。因此，早泥盆世是北山古生代洋盆闭合时限的上限^[39]。同时，前人在柳园地区发现志留纪埃达克岩，表明马鬃山地块南缘在早古生代存在向北的俯冲作用^[10]。

以上资料表明，北山地区在志留纪—泥盆纪发生了一次明显的俯冲—碰撞构造事件，形成了北山造山带，两大板块的强烈碰撞带在红柳河—牛圈子—洗肠井一线，骆驼圈西岩体位于该线以北。为了说明该岩体的属性，作者对获得的相关数据计算后分别投入到 Y-Nb 图解（见图 9a）和 R1-R2 图解（见图 9b），在 Y-Nb 图解中，参数点均落入碰撞带花岗岩区域内；在 R1-R2 图解中，所有样品点均在 2 区附近，为破坏性板块边缘（碰撞前）花岗岩，说明骆驼圈西岩体是北山早古生代洋盆在志留纪发生俯冲过程中形成的埃达克岩，这与 Sajona 等^[4]认为埃达克岩可能代表了俯冲作用开始的记录相一致。

能与热的洋壳俯冲有关。因此，根据区域地质特征及埃达克岩的研究结果，认为牛圈子地区早古生代的埃达克岩可能与热的洋壳向北俯冲消减作用有关。

北山地区经历了长期而强烈的地质演化，研究认为古生代是北山构造—岩浆演化的重要阶段。由于该时期地质现象保存较差，早古生代和晚古生代构造岩浆事件是一次还是两次？不同的研究者有不同的认识，这是北山地区构造—岩浆演化

认识存在长期争议的重要原因^[13~20]。牛圈子地区志留纪埃达克岩的发现,表明马鬃山地块南缘在早古生代期间存在向北俯冲作用。热的俯冲板片发生部分熔融,在上升过程中与地幔橄榄岩发生强烈熔体—岩石反应,同时伴随有地壳物质的混染,最终形成牛圈子早古生代埃达克岩。骆驼圈西埃达克岩的地球化学特征及构造属性的研究,为北山早古生代和晚古生代存在不同的构造背景的观点提供了佐证。

5 结论

1) 北山牛圈子地区埃达克岩为过铝质的高钾钙碱性系列岩石,具有高 Si、Al、K、Sr、Sr/Y 和低 Mg、Y、Yb 等特点,与世界典型埃达克岩特征一致。

2) 北山牛圈子地区埃达克岩锆石 U-Pb 年龄为 428.9 ± 3.5 Ma,是早一中志留世岩浆活动的产物。

3) 北山牛圈子地区埃达克质花岗岩的地球化学特征及构造属性的研究,认为埃达克岩形成于北山早古生代洋盆俯冲阶段,可以作为北山地区由板块伸展体制转向板块挤压体制的标志。

参 考 文 献

- [1] Kay RW. Aleutian magnesianandesites; melts from subducted Pacific ocean crust [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1978, 4 (1/2): 117 ~ 132.
- [2] Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere [J]. *Nature*, 1990, 347 (6294): 662 ~ 665.
- [3] 王焰,张旗,钱青. 埃达克岩 (adakite) 的地球化学特征及其构造意义 [J]. *地质科学*, 2000, 35 (2): 251 ~ 256. WANG Yan, ZHANG Qi, QIAN Qing. Adakite: geochemical characteristics and tectonic significances [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 2000, 35 (2): 251 ~ 256.
- [4] Sajona F G, Maury R C, Bellon H, et al. Initiation of subduction and the generation of slab melts in western and eastern Mindanao, Philippines [J]. *Geology*, 1993, 21 (11): 1007 ~ 1010.
- [5] 罗照华,柯珊,谌宏伟. 埃达克岩的特征、成因及构造意义 [J]. *地质通报*, 2002, 21 (7): 436 ~ 440. LUO Zhao-hua, KE Shan, CHEN Hong-wei. Characteristics, petrogenesis and tectonic implications of adakite [J]. *Geological Bulletin of China*, 2002, 21 (7): 436 ~ 440.
- [6] 殷勇,张旗,殷先明,等. 甘肃北山埃达克岩特征及其找矿意义—几个与埃达克质岩石有关的 Cu、Mo、Au 矿实例 [J]. *甘肃地质*, 2009, 18 (1): 6 ~ 11. YIN Yong, ZHANG Qi, YIN Xian-ming, et al. Features of Adakite in Beishan of Gansu province and significance for prospecting: several examples of Cu, Mo and Au deposit related to Adakites [J]. *Gansu Geology*, 2009, 18 (1): 6 ~ 11.
- [7] 谢春林,杨建国,王立社,等. 甘肃北山地区古亚洲南缘古生代岛弧带位置的讨论 [J]. *地质学报*, 2009, 83 (11): 1584 ~ 1600. XIE Chun-lin, Yang Jian-guo, WANG Li-she, et al. Discussion on the location of Paleozoic island arc zone on the south margin of Paleo-Asian Ocean in the Beishan Area of Gansu Province [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83 (11): 1584 ~ 1600.
- [8] 黄增保,金霞,李葆华,等. 甘肃红石山地区印支期花岗岩地球化学特征及成因讨论 [J]. *西北地质*, 2011, 44 (1): 10 ~ 19. HUANG Zeng-bao, JIN Xia, LI Bao-hua, et al. Petrological and geochemical characteristics of Indosinian granites in Hongshishan area, Gansu province and discussion on its genesis [J]. *Northwestern Geology*, 2011, 44 (1): 10 ~ 19.
- [9] 刘明强. 甘肃北山造山带红石山地区埃达克质花岗岩类的发现及其地质意义 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2007, 26 (3): 232 ~ 238. LIU Ming-qiang. Geochemical characteristics and geological significance of adakitic granitoids in Hongshishan area of the Beishan orogenic belt, Gansu Province [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2007, 26 (3): 232 ~ 238.
- [10] 毛启贵,肖文交,韩春明,等. 北山柳园地区中志留世埃达克质花岗岩类及其地质意义 [J]. *岩石学报*, 2010, 26 (2): 584 ~ 596. MAO Qi-gui, XIAO Wen-jiao, HAN Chun-ming, et al. Discovery of Middle Silurian adakite granite and its tectonic significance in Liuyuan area, Beishan Mountains, NW China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26 (2): 584 ~ 596.
- [11] 王启航,王晓伟,杨春霞,等. 甘肃金塔县老虎山晚古生代华北型富镁埃达克岩的发现及构造动力学意义 [J]. *甘肃地质*, 2014, 23 (1): 28 ~ 34. WANG Qi-hang, WANG Xiao-wei, YANG Chun-xia, et al. Late Paleozoic Adakitic rocks in Laohushan of Gansu and their tectonodynamics significance [J]. *Gansu Geology*, 2014, 23 (1): 28 ~ 34.
- [12] 张伟,王金荣,陈万峰,等. 阿拉善右旗地区晚石炭世埃达克岩的发现及其大地构造意义 [J]. *高校地质学报*, 2014, 20 (3): 378 ~ 387. ZHANG Wei, WANG Jin-rong, CHEN Wan-feng, et al. The discovery of the Carboniferous Adakite and its Tectonic Implications in Alxa Youqi [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2014, 20 (3): 378 ~ 387.
- [13] 杨合群,李英,李文明,等. 北山成矿构造背景概论 [J]. *西北地质*, 2008, 41 (1): 22 ~ 28. YANG He-qun, LI Ying, LI Wen-ming, et al. General discussion on Metallogenic tectonic setting of Beishan mountain, northwestern China [J]. *Northwestern Geology*,

- 2008, 41 (1): 22 ~ 28.
- [14] 杨合群, 李英, 赵国斌, 等. 新疆 - 甘肃 - 内蒙古衔接区地层对比及其意义 [J]. 西北地质, 2009, 42 (4): 60 ~ 75.
- YANG He-qun, LI Ying, ZHAO Guo-bin, et al. Stratigraphic correlation and its significance of Xinjiang-Gansu-Inner Mongolia join area [J]. Northwestern Geology, 2009, 42 (4): 60 ~ 75.
- [15] 何世平, 任秉琛, 姚文光, 等. 甘肃内蒙古北山地区构造单元划分 [J]. 西北地质, 2002, 35 (4): 30 ~ 40.
- HE Shi-ping, REN Bing-chen, YAO Wen-guang, et al. The division of tectonic units of Beishan area, Gansu-Inner Mongolia [J]. Northwestern Geology, 2002, 35 (4): 30 ~ 40.
- [16] 左国朝. 北山板块构造及成矿规律 [M]. 北京: 北京大学出版社, 1990.
- ZUO Guo-chao. Plate Tectonics and Metallogenic Regularities in Beishan Region [M]. Beijing: Peking University Publication, 1990.
- [17] 左国朝, 刘义科, 刘春燕. 甘新蒙北山地区构造格局及演化 [J]. 甘肃地质学报, 2003, 12 (1): 1 ~ 15.
- ZUO Guo-chao, LIU Yi-ke, LIU Chun-yan. Framework and evolution of the Tectonic Structure in Beishan area across Gansu Province, Xinjiang autonomous region and Inner Mongolia autonomous region [J]. Acta Geologica Gansu, 2003, 12 (1): 1 ~ 15.
- [18] 刘雪亚, 王荃. 中国西部北山造山带的大地构造及其演化 [J]. 地质研究, 1995, 28: 37 ~ 48.
- LIU Xue-ya, WANG Quan. Tectonics of orogenic belts in Beishan Mts., western China and their evolution [J]. Geological Research, 1995, 28: 37 ~ 48.
- [19] 聂凤军. 北山地区金属矿床成矿规律及找矿方向 [M]. 北京: 地质出版社, 2002, 1 ~ 499.
- NIE Feng-jun. Metallogenic Studies and Ore Prospecting in the Conjunction Area of Inner Mongolia Autonomous Region, Gansu Province and Xinjiang Uygur Autonomous Region (Beishan Mt.), Northwest China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002, 1 ~ 499.
- [20] 龚全胜, 刘明强, 梁明宏, 等. 北山造山带大地构造相及构造演化 [J]. 西北地质, 2003, 36 (1): 11 ~ 17.
- GONG Quan-sheng, LIU Ming-qiang, LIANG Ming-hong, et al. The tectonic facies and tectonic evolution of Beishan orogenic belt, Gansu [J]. Northwestern Geology, 2003, 36 (1): 11 ~ 17.
- [21] 张克信, 潘桂棠, 何卫红, 等. 中国构造 - 地层大区划分新方案 [J]. 地球科学 - 中国地质大学学报, 2015, 40 (2): 206 ~ 233.
- ZHANG Ke-xin, PAN Gui-tang, HE Wei-hong, et al. New division of tectonic-strata superregion in China [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2015, 40 (2): 206 ~ 233.
- [22] 龚全胜, 梁明宏, 刘明强, 等. 马鬃山幅 1:25 万区域地质图 [M]. 兰州: 甘肃省地质调查院, 2001.
- GONG Quan-sheng, LIANG Ming-hong, LIU Ming-qiang, et al. 1:250000 geology map of Mazhongshan [M]. Lanzhou: Gansu Geological Survey Institute, 2001.
- [23] Yuan H L, Gao S, Liu X M, et al. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry [J]. Geostandards and Geoanalytical Research, 2004, 28 (3): 353 ~ 370.
- [24] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [A]. Saunders AD, Norry MJ. Magmatism in Ocean Basins [C]. London: Geological Society, Special Publications, 1989, 42: 313 ~ 345.
- [25] Garrison J M, Davidson J P. Dubious case for slab melting in the Northern volcanic zone of the Andes [J]. Geology, 2003, 31 (6): 565 ~ 568.
- [26] Martin H. Adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids [J]. Lithos, 1999, 46 (3): 411 ~ 429.
- [27] 张旗. 有关埃达克岩实验应用中几个问题的探讨 [J]. 岩石矿物学杂志, 2015, 34 (2): 257 ~ 270.
- ZHANG Qi. A tentative discussion on the experimental study of adakite [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2015, 34 (2): 257 ~ 270.
- [28] Defant M J, Drummond M S. Mount St. Helens: potential example of the partial melting of the Subducted lithosphere in a volcanic arc [J]. Geology, 1993, 21 (6): 547 ~ 550.
- [29] Defant M J, Xu J F, Kepezhinskis P, et al. Adakites: some variations on a theme [J]. Acta Petrologica Sinica, 2002, 18 (2): 129 ~ 142.
- [30] Kay R W, Ramos V A, Marquez M. Evidence in Cerro Pampa volcanic rocks for slab-melting prior to ridge-trench collision in southern South America [J]. The Journal of Geology, 1993, 101 (6): 703 ~ 714.
- [31] Peacock S M, Rushmer T, Thompson A B. Partial melting of Subducting oceanic crust [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1994, 121 (1/2): 227 ~ 244.
- [32] 熊小林, 赵振华, 白正华, 等. 西天山阿吾拉勒 adakite 型钠质酸性岩及地壳垂向增生 [J]. 科学通报, 2001, 46 (4): 281 ~ 287.
- XIONG Xiao-lin, ZHAO Zhen-hua, BAI Zheng-hua, et al. Adakite-type sodium-rich rocks in Awulale Mountain of west Tianshan: significance for the vertical growth of continental crust [J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46 (1): 811 ~ 817.
- [33] 张旗, 王焰, 王元龙. 埃达克岩与构造环境 [J]. 大地构造与成矿学, 2003, 27 (2): 101 ~ 108.
- ZHANG Qi, WANG Yan, WANG Yuan-long. On the relationship between adakite and its tectonic setting [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2003, 27 (2): 101 ~ 108.
- [34] 续海金, 马昌前. 实验岩石学对埃达克岩成因的限定 - 兼论中国东部富钾高 Sr/Y 比值花岗岩类 [J]. 地学前缘, 2003, 10 (4): 417 ~ 427.
- XU Hai-jin, MA Chang-qian. Constraints of experimental petrology on the origin of adakites, and petrogenesis of Mesozoic K-rich and high Sr/Y ratio granitoids in eastern China [J].

Earth Science Frontiers, 2003, 10 (4): 417 ~ 427.

[35] Prouteau G, Scaillet B, Pichavant M, et al. Evidence for mantle metasomatism by hydrous silicic melts derived from subducted oceanic crust [J]. Nature, 2001, 410 (6825): 197 ~ 200.

[36] Rapp R P, Watson E B, Miller C F. Partial melting of amphibolite/eclogite and the origin of Archean trondhjemites and tonalites [J]. Precambrian Research, 1991, 51 (1/4): 1 ~ 25.

[37] 王莉, 曾令森, 高利娥, 等. 藏南侏罗纪残留洋弧的地球化学特征及其大地构造意义 [J]. 岩石学报, 2012, 28 (6): 1741 ~ 1754.

WANG Li, ZENG Ling-sen, GAO Li-e, et al. Remnant Jurassic intra-oceanic arc system in Southern Tibet: geochemistry and tectonic implications [J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28 (6): 1741 ~ 1754.

[38] 边千韬, Pospelov I I, 李惠民, 等. 青海省布青山早古生代末期埃达克岩的发现及其构造意义 [J]. 岩石学报, 2007, 23 (5): 925 ~ 934.

BIAN Qian-tao, Pospelov I I, LI Hui-min, et al. Discovery of the end-Early Paleozoic ada-kite in the Buqingshan area, Qinghai province, and its tectonic implications [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23 (5): 925 ~ 934.

[39] 余吉远, 李向民, 梁积伟, 等. 甘新蒙北山地区古生代构造演化研究 - 北山古生代洋盆开启、闭合时限最新进展 [J]. 新疆地质, 2012, 30 (2): 205 ~ 209.

YU Ji-yuan, LI Xiang-min, LIANG Ji-wei, et al. Evolution of thegeological structure in Beishan area across Gansu province, Xinjiang autonomous region and Inner Mongolia autonomous region-Constraints on the timing of opening and closing of the Beishan Paleozoic oceanic basin [J]. Xinjiang Geology, 2012, 30 (2): 205 ~ 209.

THE PETROGENESIS AND TECTONIC SIGNIFICANCES OF SILURIAN WEST-LUOTOUJUAN ROCKS FROM BEISHAN NIUJUANZI AREA IN GANSU PROVINCE, NW CHINA

YU Ji-yuan^{1,2,3}, JI Bo^{1,2,3}, GUO Lin^{1,2}

(1. Xi' an Center of Geological Survey, CGS, Xi' an 710054, Shannxi, China;

2. Orogen Research Center of China Geological Survey, Xi' an 710054, Shannxi, China;

3. Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, Ministry of Land and Resources, Xi' an 710054, Shannxi, China)

Abstract: West-Luotuojuan Adakitesin Beishan Niujuanzi Area belongs to Peraluminous calcium alkaline magma series with a high content of SiO₂ (>57.94%), Al₂O₃ (>16.66%), a low content of MgO (<4.32%), a relatively high Na₂O/K₂O ratio, displaying Na-rich feature. In respect of trace elements, it has a high content of Sr (589 × 10⁻⁶ ~ 1170 × 10⁻⁶), a low content of Y (4.60 × 10⁻⁶ ~ 13.90 × 10⁻⁶) and Yb (0.43 × 10⁻⁶ ~ 1.32 × 10⁻⁶). The differentiation of light and heavy rare earth is obvious ((La/Dy)_N = 4.60 ~ 13.87, (La/Yb)_N = 7.17 ~ 20.58), and there is not obvious anomaly of Eu (Eu/Eu* = 0.85 ~ 1.32). Rich in light rare earth and large ionlithophile elements, and the loss of high field-strength elements Nb, Ta, Ti and heavy rare earth HREE, are similar with the typical Adakite rocks which formed by subducted oceanic crust melting. It is believed that West-Luotuojuan Adakite is a partial melting product which warm oceanic crust in Silurian (U-Pb age of 428.9 Ma) period moving to Gongpo spring-east Qiyi mountain early Paleozoic active continental margin in the process of subduction. The study of the rock mass provides evidence for the view that Beishan orogenic belt closed in the late early Paleozoic and split anew in the early late Paleozoic.

Key words: Adakite; U-Pb age; Silurian; partial melting of the subducted oceanic crust; West-Luotuojuan rock mass; Beishanin Gansu province