第 59 卷 第 5 期
2026 年（总 249 期）

西 北 地 质
NORTHWESTERN GEOLOGY

Vol. 59 No. 5
2026(Sum249)



引文格式：李雪，马得青，时超，等. 中祁连西段冬草沟岩体的形成时代、地球化学特征及其对弧花岗质岩浆作用的启示[J]. 西北地质，2026，59(5)：343−357. DOI：10.12401/j.nwg.2025067

Citation：LI Xue，MA Deqing，SHI Chao，et al. Formation Age and Geochemical Characteristics of Dongcaogou Pluton in the Western Central Qilian Belt and Its Implications for Arc-Granitic Magmatism[J]. Northwestern Geology，2026，59(5)：343−357. DOI：10.12401/j.nwg.2025067

中祁连西段冬草沟岩体的形成时代、地球化学特征及其对弧花岗质岩浆作用的启示

李雪[1]，马得青[1]，时超[1,2]，王超[1]

（1. 大陆演化与早期生命全国重点实验室，西北大学地质学系，陕西 西安 710069；2. 中国地质调查局西安地质调查中心，中国地质调查局造山带研究中心，陕西 西安 710119）

摘 要：活动大陆边缘是花岗质岩浆形成的主要场所，对于研究俯冲带壳幔相互作用具有重要意义。笔者对中祁连西段冬草沟花岗质岩体中的闪长岩和黑云母二长花岗岩进行了岩石学、地球化学和锆石 U-Pb 年代学研究。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果表明，细粒闪长岩和黑云母二长花岗岩的$^{206}Pb/^{238}U$加权平均年龄分别为（461±1）Ma 和（445±1）Ma，代表了中祁连构造带早古生代的两期岩浆活动。地球化学特征表明，冬草沟岩体为钾玄岩–钙碱性、准铝质–弱过铝质岩石系列。闪长岩具低 Si、富碱、富集稀土元素的碱性岩浆特征，可能为俯冲沉积物和地幔楔橄榄岩物理混合后脱水、熔融而成；黑云母二长花岗岩则具富 Si、高 Sr、高 Sr/Y 和 La/Yb 值，可能是俯冲洋壳在榴辉岩相条件下部分熔融的产物。结合区域岩浆作用研究表明，冬草沟岩体存在两期岩浆事件，形成于强烈的壳–幔相互作用的陆缘岛弧环境。

关键词：中祁连；弧花岗岩；早古生代作用；埃达克岩

中图分类号：P588.12 **文献标志码**：A **文章编号**：1009-6248(2026)05-0343-15

Formation Age and Geochemical Characteristics of Dongcaogou Pluton in the Western Central Qilian Belt and Its Implications for Arc-Granitic Magmatism

LI Xue[1], MA Deqing[1], SHI Chao[1,2], WANG Chao[1]

（1. State Key Laboratory of Continental Evolution and Early Life, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China；2. Xi'an Center of China Geological Survey, Center for Orogenic Belt Geology, China Geological Survey, Xi'an 710119, Shaanxi, China）

Abstract：Active continental margin is the main place for the formation of granitic magma, which is of great significance for our understanding of crust-mantle interaction of subduction zone. In this study, detailed petrological, geochemical and zircon U-Pb geochronological analyses have been carried out on diorite and biotite monzogranite in the Dongcaogou granitic pluton in the western Central Qilian Belt (CQB). LA-ICP-MS zircon

收稿日期：2023-06-18；**修回日期**：2025-02-21；**责任编辑**：吕鹏瑞

基金项目：国家自然科学基金项目（42272054）资助。

作者简介：李雪 (1997–)，女，硕士研究生，从事花岗岩研究。E–mail：1016450797@qq.com。

© Editorial Office of *Northwestern Geology*. OA under CC BY-NC-ND

dating shows that fine-grained diorite and biotite monzogranite of the Dongcaogou pluton formed about 461±1 Ma and 445±1 Ma, respectively, representing two stages of magmatic activity in the Early Paleozoic of the CQB. Geochemical characteristics show that the Dongcaogou pluton is a series of shoshonite-calc-alkaline, metaluminous-weakly peraluminous rocks. Fine-grained diorites are characterized by low silicon, alkali-rich and rare earth element-rich, which may be the products of physical mixing of dehydration melting of subducted sediments and mantle wedge peridotite. Biotite monzogranites has the charaterisits of high Si and Sr, accompanied by high Sr/Y and La/Yb values, which may be the production formed by partial melting of subducted oceanic crust under eclogite facies. Combined with regional magmatism studies indicate there are two magmatic events in the Dongcaogou pluton, which were formed in a continental margin island arc environment with significance crust-mantle interaction.

Keywords：central Qilian；arc granite；early Paleozoic action；adakite

由于俯冲板片脱水熔融及交代地幔楔作用在活动大陆边缘可以形成埃达克岩(Defant et al., 1993)、高镁安山岩(Kelemen, 1995)以及部分碱性岩石(Lange et al., 1991)等。通常认为碱性岩浆一般具有富 Na、富 K 的特征，其成因与俯冲板片流体交代地幔楔橄榄岩形成的金云母或者角闪石脉发生部分熔融有关(Peccerillo, 1999; Schmidt et al., 2004)，或者由俯冲板片和地幔橄榄岩之间的俯冲物质物理混合形成“混杂岩”的部分熔融产生(Cruz-Uribe et al., 2018)，记录着俯冲板片或俯冲沉积物与地幔橄榄岩之间复杂的相互作用过程。与碱性岩石相比，埃达克岩通常显示高 Si(SiO_2>56%)、富 Al(Al_2O_3>15%)、富 Na(3.5%≤Na_2O≤7.5%)、高 Sr(>400×10^{-6})、Sr/Y(>40)和 La/Yb(>20)值、低 Y(≤18×10^{-6})和 Yb(≤1.9×10^{-6}；吕鹏瑞等, 2020)等地球化学特征(Defant et al., 1990; Martin, 2005)，其最早特指由俯冲洋壳在榴辉岩相条件下部分熔融形成的中酸性岩石。但近来部分研究表明，埃达克质岩浆的形成具有复杂的构造岩浆机制，如加厚下地壳部分熔融(Kay et al., 1993; Qian et al., 2013)，高压条件下石榴子石的分馏(0.8～1.2 GPa; Macpherson et al., 2006)，上地壳内部晶粥的分离结晶作用(Laurent et al., 2020; Brackman et al., 2022)，以及俯冲板片熔融与交代地幔楔相互作用(Martin et al., 2005; Qian et al., 2013)等。因此，陆缘弧环境中的碱性岩石和埃达克质花岗岩的岩石成因研究，对揭示陆缘弧花岗质岩浆成因及壳幔相互作用具有重要意义。

中祁连构造带西段的野马南山地区发育大规模的弧火山岩和侵入岩(Wang et al., 2017; Zhao et al., 2020; 武美云等, 2022)，记录了古生代弧岩浆演化的重要信息(图 1a)。笔者通过对中祁连西段冬草沟岩体的岩相学、年代学和全岩地球化学进行系统的工作，来揭示冬草沟岩体中碱性岩和埃达克岩的成因及源区，进而为讨论陆缘弧花岗质岩浆的成因及其相关的壳幔相互作用机制提供地质依据。

1 区域地质与岩石学特征

祁连造山带整体呈 NW–SE 向展布，北接阿拉善地块，南接全吉、柴达木地块，自北向南可分为北祁连带、中祁连带和南祁连带等 3 个构造单元(图 1b; 杨柳等, 2025)。北祁连构造带主要包含新元古代至早古生代蛇绿岩、变质岩、岛弧火山岩和侵入岩、志留纪复理石建造和泥盆纪磨拉石建造沉积岩系等(Xiao et al., 2009; Song et al., 2013; Fu et al., 2020)。中祁连构造带主要由前寒武纪基底、古生代岩浆岩和晚古生代—中生代沉积岩组成(Tung et al., 2013; Song et al., 2017; Wang et al., 2017; Zhao et al., 2020; Li et al., 2022)。南祁连构造带主要发育新元古代—古生代沉积岩系、化隆杂岩和早古生代花岗岩体(Li et al., 2019)。

中祁连西段早古生代岩浆岩广泛发育，以花岗质侵入岩为主，分布于野马南山一带。前人研究表明，其形成时代主要为 525～410 Ma，记录了洋壳俯冲、弧后裂谷或碰撞后板块断离、地壳加厚和后造山伸展等不同的构造演化阶段(冯益民等, 1996; 赵吉昌等, 2016; Wang et al., 2017; Zhao et al., 2020; Li et al., 2022; 武美云等, 2022)。研究区位于中祁连西段冬草沟一带，呈椭圆状侵入体侵入野马南山群老变质岩系。其内部中、酸性侵入岩较为发育，并以闪长岩和黑云母二长花岗岩为主(图 1c)。

冬草沟岩体东部主要发育闪长岩(18NQL-1)，呈

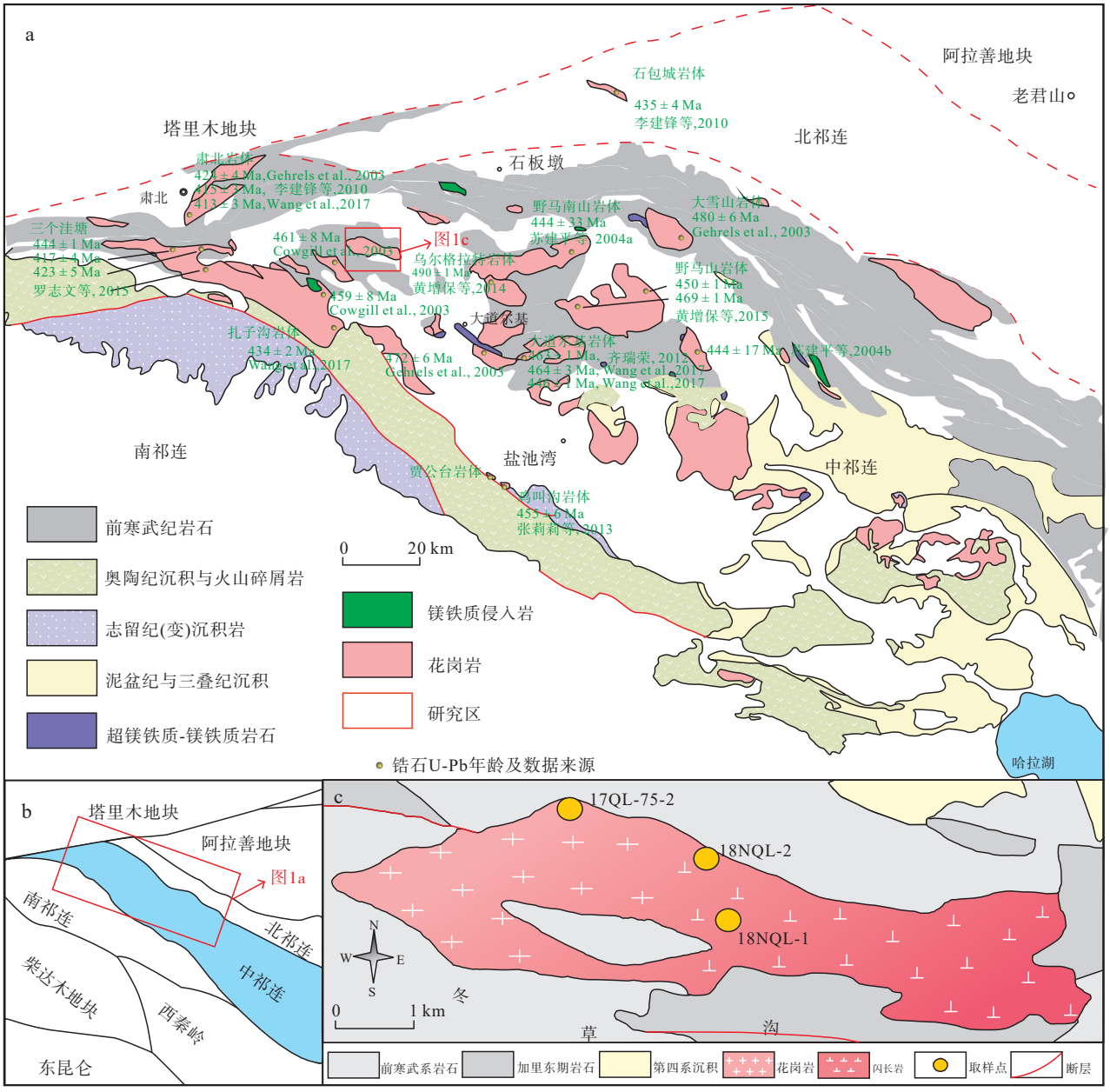


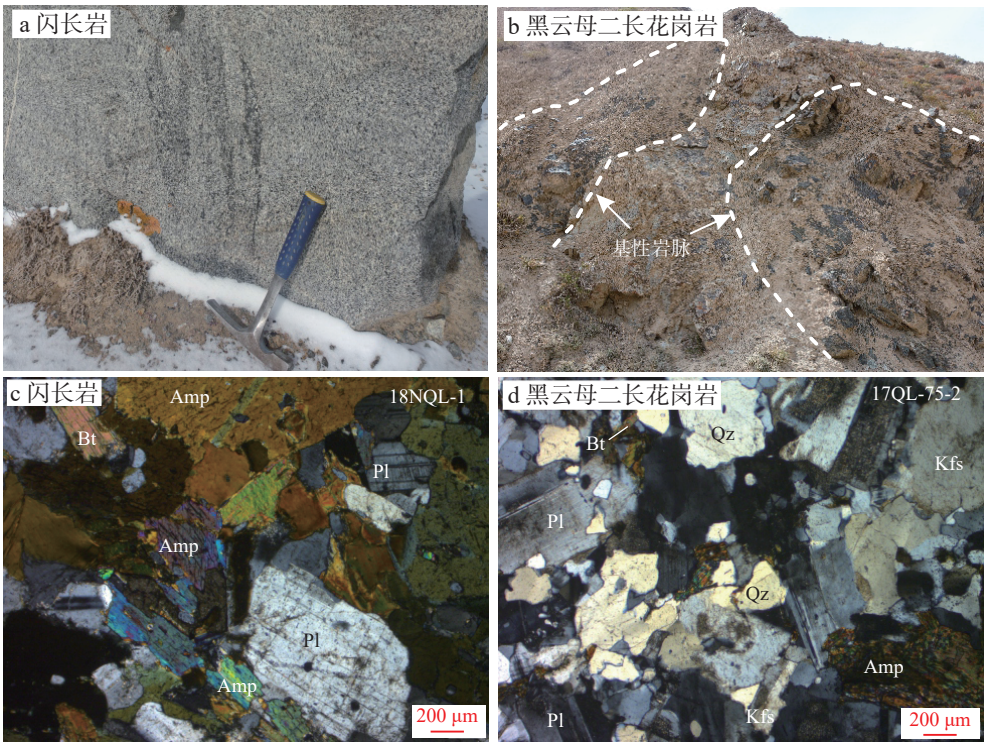
图1　中祁连西段地质简图(a; 据 Wang et al., 2017 修改)、中祁连西段构造单元划分图(b)和冬草沟岩体地质简图(c)(据别盖幅 1∶20 万地质图修改)

Fig. 1　(a) Simplified geological map and (b) tectonic framework of the western part of the central Qilian belt, and (c) Dongcaogou pluton

浅灰色、中细粒结构, 其中可见定向拉长的暗色包体(图 2a), 主要矿物组合为斜长石(～50%)、角闪石(30%)、黑云母(10%)、少量石英(＜5%)和锆石等副矿物。斜长石呈自形–半自形板柱状, 部分可见聚片双晶或环带结构; 角闪石部分呈绿泥石化。冬草沟岩体西部主要发育黑云母二长花岗岩(17QL-75-2), 被基性岩脉侵入(图 2b)。黑云母二长花岗岩呈细粒结构(图 2d), 主要矿物组合为石英(～55%)、斜长石(20%)、钾长石(15)、黑云母(10%)和少量榍石和锆石等副矿物。石英呈他形粒状, 多以集合体形式充填在长石间隙中; 部分为次生颗粒, 以齿形嵌入长石的边界。斜长石呈半自形柱状, 聚片双晶。

2　分析方法

锆石的分选在廊坊市宇能岩矿技术服务有限公司采用重磁分离法完成, 锆石的制靶、阴极发光(CL)显微照相和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年均在西北大学



a. 闪长岩地质特征；b. 黑云母二长花岗岩与基性岩脉接触关系；c. 闪长岩正交偏光照片；d. 黑云母二长花岗岩正交偏光照片；Qz. 石英；Pl. 斜长石；Kfs. 钾长石；Amp. 角闪石；Bt. 黑云母

图2 冬草沟岩体野外及镜下显微照片

Fig. 2 Field and microscopic photos of Dongcaogou pluton

大陆动力学国家重点实验室完成。在双目镜下选择结晶较好、无裂隙的锆石，将锆石固定在环氧树脂上，待环氧树脂固化后，抛光至露出锆石颗粒核部。锆石的阴极发光(CL)显微照相利用 Gatan 公司 MonoCL3+型扫描电镜获得，锆石 U-Pb 年龄测试和微量元素分析采用连接 Geolas 2005 激光剥蚀系统的 Agilient 7500a 型 ICP-MS，以 91500 标准锆石作为外标，GJ-1 为锆石测年标样，所测 Th、U 含量以 NIST610 作为外标。所得数据使用 Glitter4.0 进行处理，利用 Isoplot R 进行年龄计算和绘制协和图。

主量元素分析采用 XRF 法，并在 RIX2100-X 射线荧光光谱仪上测试。微量元素分析采用溶液等离子体质谱法，实验测试中以 AGV-1 和 BHVO-1 国际标样为监控。主量元素的分析精密度和准确度普遍优于 2%；微量元素测试经 AVG-1 和 BHVO-1 国际标样监控，显示大多数微量元素的分析精度优于 5%。

3 锆石 U-Pb 定年结果

本次对冬草沟岩体中的闪长岩和黑云二长花岗岩样品进行了锆石 U-Pb 定年。冬草沟中锆石的 CL 图像显示清晰的振荡环带，从半自形到自形，长宽比约为 1∶1～3∶1，Th/U 值大于 0.1(表 1)，与岩浆成因锆石特征一致(Hoskin et al., 2003)。

闪长岩的锆石颗粒为淡黄色–透明晶体，呈短柱状，长约为 100 μm，长宽比为 1∶1～2∶1，阴极发光图像可见清晰的震荡环带(图 3a)。共测定了 19 个有效数据点，锆石的 U 含量为 109×10^{-6}～448×10^{-6}，Th 含量为 80×10^{-6}～450×10^{-6}，Th/U 值为 0.54～1.13，平均值为 0.84(表 1)。锆石 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄为 446～484 Ma，加权平均年龄为(461±1)Ma(MSWD= 0.58, n=19)(图 4a)，代表闪长岩的结晶年龄。

黑云母二长花岗岩的锆石颗粒均为半自形-自形长柱状，长约为 100 μm，长宽比为 3∶1，阴极发光图像可见明显的振荡环带结构(图 3d)。共测试了 17 颗锆石，所得锆石 U 含量为 384×10^{-6}～$7\,331\times10^{-6}$，Th 含量为 149×10^{-6}～$5\,121\times10^{-6}$，Th/U 值为 0.38～1.04，平均值为 0.65。$^{206}Pb/^{238}U$ 锆石年龄为 437～477 Ma，加权平均年龄为(445±1)Ma(MSWD= 6.1, n=17)(图 4b)，代表黑云母二长花岗岩的岩浆结晶年龄。

表 1　中祁连西段冬草沟岩体样品 U-Pb 锆石年龄分析结果

Tab. 1　U-Pb data for zircons of samples in Dongcaogou pluton, western Qilian

点号	Th	U	Th/U	同位素比值						同位素年龄					
	(10^{-6})			$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ
18NQL-1 冬草沟岩体闪长岩															
18NQL-1-1	154	226	0.68	0.056 34	0.001 38	0.573 72	0.013 56	0.073 96	0.000 90	465	54	460	9	460	5
18NQL-1-2	89	126	0.71	0.056 01	0.002 23	0.572 66	0.021 96	0.074 23	0.001 17	452	86	460	14	462	7
18NQL-1-3	194	179	1.08	0.055 85	0.002 41	0.573 11	0.023 84	0.074 47	0.001 23	446	93	460	15	463	7
18NQL-1-4	164	163	1.01	0.056 78	0.001 65	0.579 32	0.016 23	0.074 01	0.000 95	482	63	464	10	460	6
18NQL-1-5	91	128	0.71	0.056 23	0.002 24	0.573 60	0.021 99	0.073 96	0.001 16	461	87	460	14	460	7
18NQL-1-6	198	175	1.13	0.056 19	0.001 56	0.574 36	0.015 33	0.074 05	0.000 94	459	61	461	10	461	6
18NQL-1-7	156	162	0.97	0.056 44	0.002 08	0.577 94	0.020 48	0.074 15	0.001 09	469	80	463	13	461	7
18NQL-1-8	148	230	0.64	0.056 08	0.002 07	0.574 03	0.020 33	0.074 09	0.001 11	455	80	461	13	461	7
18NQL-1-9	80	127	0.63	0.057 19	0.002 77	0.586 08	0.027 29	0.074 12	0.001 34	498	104	468	17	461	8
18NQL-1-10	133	138	0.96	0.054 83	0.002 45	0.552 98	0.023 82	0.072 92	0.001 19	405	96	447	16	454	7
18NQL-1-11	88	123	0.72	0.054 87	0.003 34	0.551 45	0.032 47	0.072 55	0.001 43	407	130	446	21	452	9
18NQL-1-12	450	448	1.01	0.055 51	0.001 94	0.573 98	0.019 28	0.074 62	0.001 07	432	76	461	12	464	6
18NQL-1-13	150	152	0.98	0.055 51	0.003 31	0.567 75	0.032 67	0.073 78	0.001 50	432	128	457	21	459	9
18NQL-1-14	127	192	0.66	0.056 14	0.002 38	0.575 16	0.023 48	0.073 88	0.001 18	457	92	461	15	460	7
18NQL-1-15	87	109	0.80	0.055 64	0.003 01	0.572 93	0.029 90	0.074 23	0.001 41	438	117	460	19	462	8
18NQL-1-16	162	200	0.81	0.059 31	0.002 12	0.610 81	0.020 90	0.074 21	0.001 08	578	76	484	13	462	6
18NQL-1-17	122	140	0.87	0.056 61	0.003 80	0.581 39	0.037 59	0.073 94	0.001 68	476	143	465	24	460	10
18NQL-1-18	134	248	0.54	0.056 51	0.002 10	0.579 52	0.020 64	0.073 73	0.001 09	472	81	464	13	459	7
18NQL-1-19	138	142	0.98	0.056 92	0.002 94	0.585 08	0.029 04	0.073 89	0.001 38	488	111	468	19	460	8
17QL-75-2 冬草沟岩体黑云母二长花岗岩															
17QL-75-2-1	602	943	0.64	0.056 44	0.002 37	0.556 17	0.022 78	0.071 49	0.000 95	469	91	449	15	445	6
17QL-75-2-2	5 121	7 331	0.70	0.060 33	0.001 30	0.599 41	0.012 53	0.072 07	0.000 76	616	46	477	8	449	5
17QL-75-2-3	591	702	0.84	0.055 90	0.002 37	0.548 18	0.022 67	0.071 15	0.000 95	448	91	444	15	443	6
17QL-75-2-4	274	393	0.70	0.057 13	0.004 55	0.567 14	0.044 18	0.072 02	0.001 47	496	167	456	29	448	9
17QL-75-2-5	149	384	0.39	0.055 53	0.005 16	0.553 12	0.050 31	0.072 26	0.001 60	433	195	447	33	450	10
17QL-75-2-6	697	1 101	0.63	0.057 23	0.003 66	0.561 13	0.035 08	0.071 13	0.001 22	500	136	452	23	443	7
17QL-75-2-7	429	679	0.63	0.055 51	0.003 26	0.548 30	0.031 42	0.071 65	0.001 16	433	126	444	21	446	7
17QL-75-2-8	583	961	0.61	0.056 25	0.002 66	0.555 17	0.025 62	0.071 60	0.001 02	462	102	448	17	446	6
17QL-75-2-9	687	1 633	0.42	0.056 12	0.001 72	0.551 62	0.016 47	0.071 31	0.000 82	457	67	446	11	444	5
17QL-75-2-10	1 909	1 845	1.03	0.054 84	0.002 41	0.537 80	0.023 11	0.071 15	0.000 96	406	95	437	15	443	6
17QL-75-2-11	331	463	0.72	0.056 01	0.003 03	0.552 15	0.029 23	0.071 52	0.001 09	452	116	446	19	445	7
17QL-75-2-12	2 207	2 116	1.04	0.055 85	0.001 68	0.548 73	0.016 10	0.071 28	0.000 82	446	66	444	11	444	5
17QL-75-2-13	1 397	2 173	0.64	0.055 86	0.002 67	0.546 76	0.025 55	0.071 01	0.001 01	446	103	443	17	442	6
17QL-75-2-14	306	517	0.59	0.055 79	0.005 40	0.554 64	0.052 47	0.072 13	0.001 70	444	202	448	34	449	10
17QL-75-2-15	711	1 399	0.51	0.054 81	0.002 73	0.538 55	0.026 23	0.071 28	0.001 04	405	108	438	17	444	6
17QL-75-2-16	380	665	0.57	0.057 89	0.004 33	0.573 96	0.041 94	0.071 93	0.001 42	525	157	461	27	448	9
17QL-75-2-17	229	598	0.38	0.058 00	0.004 77	0.570 68	0.045 90	0.071 38	0.001 48	530	171	459	30	444	9

4 岩石地球化学特征

4.1 主量元素

冬草沟闪长岩 SiO_2 含量为 51.41%～56.40%, 相对略低; K_2O 含量为 2.37%～3.53%, Na_2O 含量为 3.30%～3.78%, Al_2O_3 含量为 16.53%～18.45%, Fe_2O_3T 含量为 7.38%～8.40%, CaO 含量为 5.89%～7.35%, 相对较高; MgO 含量(3.12%～3.94%)和 Mg#值(49～52)中等(表 2)。在 TAS 图解中, 所测样品落于二长闪长岩–二长岩范围内(图 5a), 属于碱性系列; 样品的 A/CNK 值为 0.77～0.86; 在 SiO_2-K_2O 图解中, 样品落入钾玄

表 2 中祁连西段冬草沟岩体岩石的主量元素(%)和微量元素(10^{-6})组成

Tab. 2 Composition of major(%) and trace elements (10^{-6})of samples in Dongcaogou pluton, western Central Qilian

样品号	17QL-75-2-1	17QL-75-2-2	18NQL-1	18NQL-2-1	18NQL-2-2	18NQL-2-3	18NQL-2-4	18NQL-2-5	18NQL-2-6	18NQL-2-7	18NQL-2-8
岩石类型	黑云母二长花岗岩		闪长岩								
SiO_2	72.94	72.32	51.41	53.96	51.57	53.45	56.40	55.83	53.93	53.89	54.97
TiO_2	0.19	0.16	1.23	1.22	1.26	1.24	1.12	1.13	1.05	1.24	1.16
Al_2O_3	14.44	14.72	18.45	17.21	18.39	17.05	16.82	16.53	16.85	17.53	16.83
Fe_2O_3T	1.48	1.40	8.33	8.25	8.40	8.39	7.38	7.43	8.33	7.85	7.64
FeOT	1.33	1.26	7.50	7.42	7.56	7.55	6.64	6.69	7.50	7.06	6.87
FeO	1.13	1.07	6.37	6.31	6.42	6.42	5.64	5.68	6.37	6.00	5.84
Fe_2O_3	0.20	0.19	1.12	1.11	1.13	1.13	1.00	1.00	1.12	1.06	1.03
MnO	0.01	0.01	0.14	0.14	0.14	0.15	0.12	0.12	0.14	0.14	0.12
MgO	0.67	0.61	3.94	3.41	3.91	3.78	3.12	3.35	3.46	3.43	3.43
CaO	1.79	2.14	7.28	6.01	7.24	7.18	6.10	5.89	7.35	7.02	6.34
Na_2O	4.60	4.78	3.76	3.44	3.78	3.47	3.33	3.33	3.30	3.60	3.49
K_2O	2.59	2.24	2.89	3.15	2.49	2.83	3.53	3.41	2.99	2.37	3.52
P_2O_5	0.05	0.05	0.45	0.39	0.43	0.40	0.35	0.38	0.45	0.42	0.39
LOI	1.01	1.12	1.94	2.57	1.99	1.80	1.55	2.33	2.02	2.27	2.08
TOTAL	99.77	99.55	99.82	99.75	99.60	99.74	99.82	99.73	99.87	99.76	99.97
Li	7.30	5.21	14.7	19.2	16.8	33.8	25.7	32.3	21.7	28.4	27.5
Be	2.38	2.63	2.59	2.82	2.69	2.50	3.04	2.87	2.49	2.41	2.61
Sc	3.03	2.63	13.4	14.8	13.5	16.8	14.7	14.2	15.7	13.8	14.6
V	15.8	15.0	112	147	113	156	132	125	179	153	140
Cr	6.25	6.95	62.4	19.4	61.1	24.2	25.4	35.0	18.3	17.0	36.7
Co	129	255	26.5	30.0	25.6	25.6	27.5	25.6	23.7	21.8	22.4
Ni	3.99	4.34	19.8	8.30	20.6	10.7	7.47	11.3	10.5	8.64	12.5
Cu	10.4	3.72	9.50	5.65	15.4	12.3	9.76	11.5	16.2	34.6	15.9
Zn	35.2	28.1	100	86.0	103	93.1	114	91.6	126	76.7	79.6
Ga	13.8	14.8	23.9	21.1	24.2	21.1	21.3	21.2	21.7	21.7	21.7
Ge	1.10	1.17	1.35	1.38	1.38	1.41	1.45	1.42	1.47	1.29	1.44
Rb	56.3	47.9	82.7	108	72.6	106	143	132	63.7	69.8	108
Sr	814	560	827	718	847	681	610	689	789	781	758
Y	12.2	8.54	25.4	28.4	26.2	28.7	30.3	29.1	31.8	24.8	29.0
Zr	91.1	87.0	292	202	307	191	272	262	200	192	226

续表 2

样品号	17QL-75-2-1	17QL-75-2-2	18NQL-1	18NQL-2-1	18NQL-2-2	18NQL-2-3	18NQL-2-4	18NQL-2-5	18NQL-2-6	18NQL-2-7	18NQL-2-8
岩石类型	黑云母二长花岗岩		闪长岩								
Nb	13.6	11.9	23.6	25.2	24.7	22.3	24.1	22.8	16.0	21.8	21.1
Cs	1.60	1.45	2.28	1.85	1.90	4.55	8.28	5.46	1.28	2.91	4.52
Ba	1 007	793	1 539	1 017	1 388	883	850	926	1 346	832	1 048
La	13.4	8.66	48.3	54.9	48.4	50.6	61.7	63.0	58.1	51.2	64.1
Ce	26.1	18.4	103	112	103	104	126	129	122	104	129
Pr	2.82	1.97	13.1	13.6	13.1	12.9	15.0	15.5	15.4	12.7	15.3
Nd	10.4	7.37	51.0	50.8	50.9	49.1	55.0	57.0	58.8	46.4	57.4
Sm	2.15	1.60	8.56	8.44	8.58	8.38	9.00	9.17	10.1	7.75	9.21
Eu	0.54	0.50	2.71	2.12	2.76	2.18	2.03	2.18	2.47	2.17	2.35
Gd	2.07	1.58	7.30	7.26	7.28	7.31	7.68	7.73	8.55	6.63	7.83
Tb	0.33	0.25	0.93	0.96	0.94	0.98	1.03	1.01	1.13	0.86	1.02
Dy	1.94	1.47	5.06	5.40	5.18	5.56	5.82	5.63	6.33	4.82	5.64
Ho	0.39	0.28	0.92	1.01	0.94	1.04	1.09	1.04	1.16	0.88	1.04
Er	1.12	0.83	2.47	2.80	2.56	2.88	3.07	2.89	3.20	2.45	2.88
Tm	0.17	0.13	0.34	0.40	0.35	0.42	0.45	0.42	0.45	0.35	0.41
Yb	1.13	0.85	2.12	2.63	2.20	2.67	2.90	2.69	2.84	2.24	2.66
Lu	0.17	0.13	0.31	0.39	0.32	0.39	0.43	0.40	0.41	0.33	0.39
Hf	3.09	2.98	6.42	4.86	6.74	4.62	6.60	6.34	4.84	4.56	5.50
Ta	1.83	1.79	0.86	1.61	0.91	1.38	1.59	1.43	0.98	1.42	1.41
Pb	33.1	27.0	16.1	19.8	18.1	20.9	28.0	27.2	31.0	19.7	26.2
Th	9.02	9.70	4.37	9.35	4.41	7.74	23.2	21.0	9.45	6.15	16.2
U	2.69	1.78	1.75	2.39	1.80	1.54	2.8	3.2	2.17	1.40	3.6
K	415.1	415.1	3 735.7	3 237.6	3 569.6	3 320.6	2 905.5	3 154.6	3 735.7	3 486.6	3 237.6
Ti	86 553.2	88 231.5	110 589.1	103 156.6	110 229.5	102 197.5	100 818.9	99 080.7	100 998.7	105 074.6	100 878.9
P	4 407.5	4 887.5	8 465.8	11 215.0	8 684.0	7 854.9	6 763.9	10 167.7	8 814.9	9 905.9	9 076.7
Mg#	51.3	50.4	52.4	49.1	52.0	51.2	49.6	51.2	49.2	50.5	51.1
ΣREE	62.7	44.0	246.3	263.0	246.8	248.9	290.8	297.4	291.3	242.4	298.8
LREE	55.4	38.5	226.8	242.1	227.0	227.7	268.4	275.6	267.2	223.9	276.9
LREE/HREE	7.6	7.0	11.7	11.6	11.5	10.7	12.0	12.6	11.1	12.1	12.7
La_N/Yb_N	8.4	7.3	16.3	15.0	15.7	13.6	15.3	16.8	14.7	16.4	17.3
δEu	0.8	1.0	1.0	0.8	1.1	0.9	0.7	0.8	0.8	0.9	0.8
La_N/Sm_N	6.22	5.42	5.64	6.50	5.64	6.04	6.86	6.87	5.76	6.61	6.96
K_2O/Na_2O	0.56	0.47	0.77	0.92	0.66	0.82	1.06	1.02	0.91	0.66	1.01
Sr/Y	66.8	65.6	32.6	25.3	32.4	23.7	20.1	23.7	24.8	31.5	26.1
Nb/La	1.02	1.37	0.49	0.46	0.51	0.44	0.39	0.36	0.27	0.43	0.33
Gd/Yb_N	0.31	0.32	0.58	0.47	0.56	0.47	0.45	0.49	0.51	0.50	0.50
A/CNK	1.06	1.04	0.82	0.86	0.83	0.78	0.82	0.83	0.76	0.82	0.80

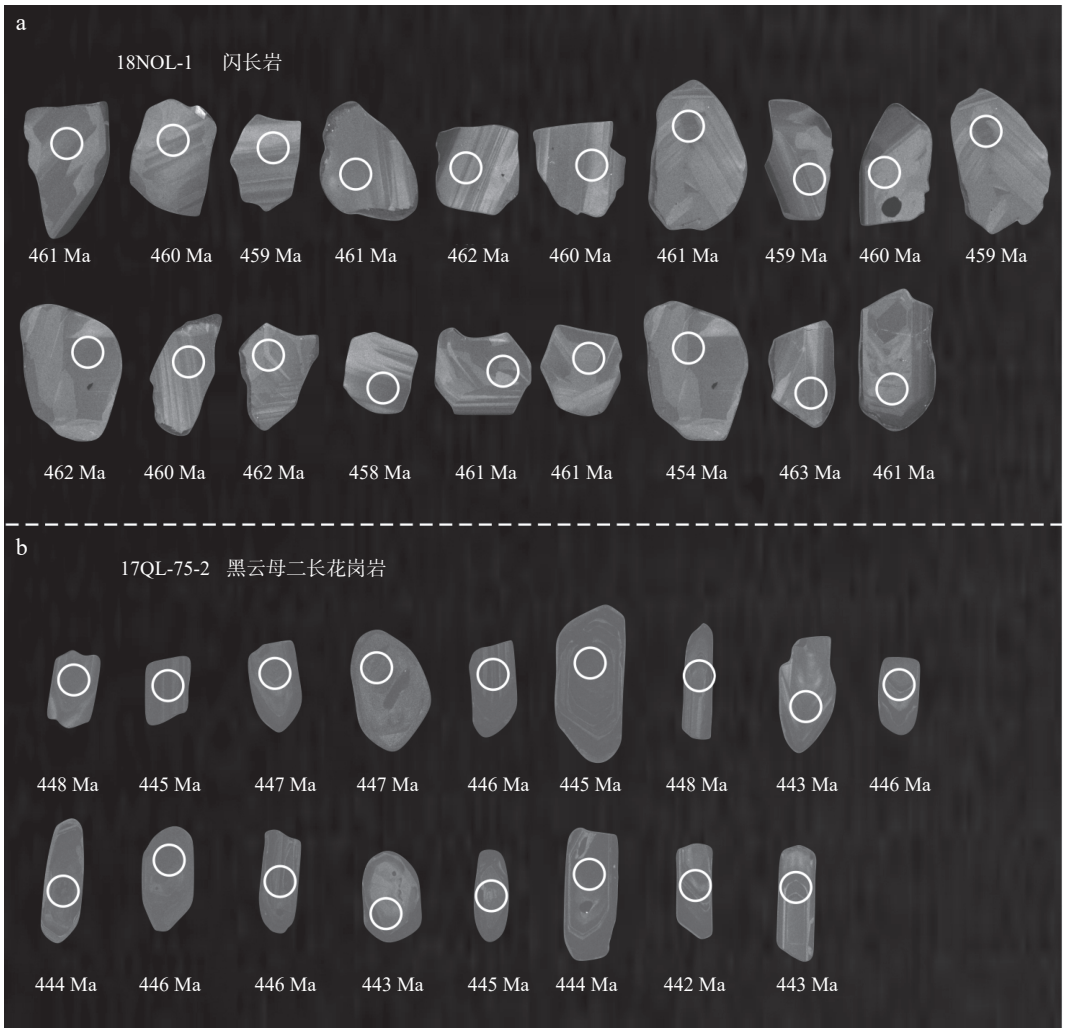


图3 冬草沟岩体锆石 CL 图

Fig. 3 CL images of Dongcaogou pluton

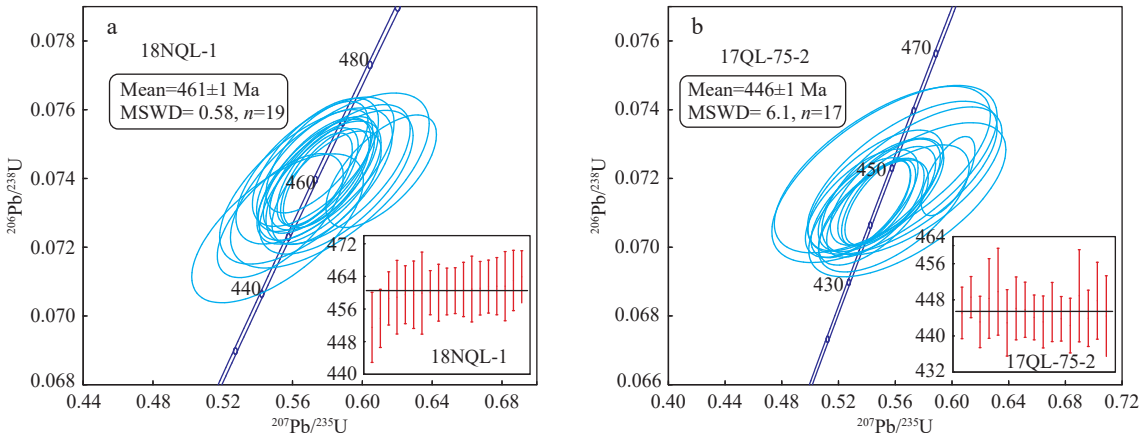
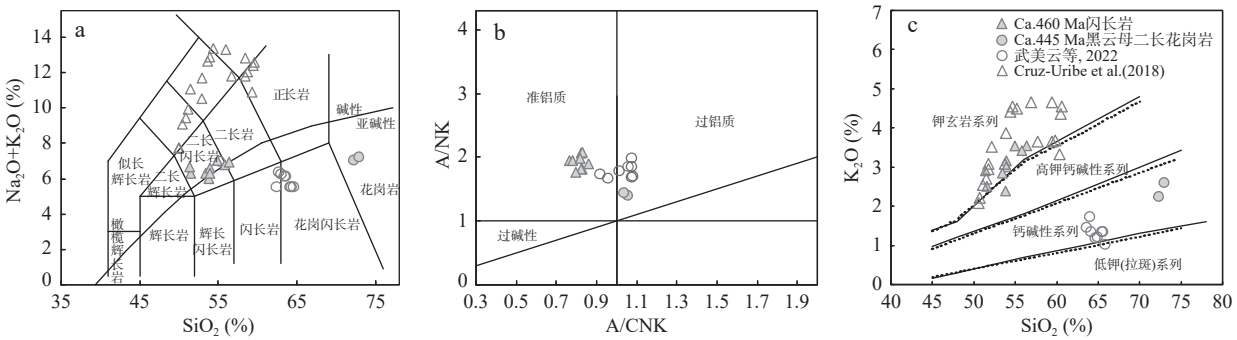


图4 冬草沟岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄谐和图和直方图

Fig. 4 LA-ICP-MS U-Pb zircon concordia diagrams and histogram of Dongcaogou pluton

岩–高钾钙碱性系列(图 5c)。黑云母二长花岗岩显示高 SiO_2(72.32%～72.94%)和 NaO_2(4.60%～4.78%)含量，中等的 Mg#值(50～51)，略低的 K_2O(2.24%～2.59%)和 MgO(0.61%～0.67%)含量。在 TAS 图解



a. TAS 图解(Middlemost, 1994)；b. A/CNK-A/NK 图解(Maniar et al., 1989)；c. SiO_2-K_2O 图解(实线据 Peccerillo et al., 1976；虚线据 Middlemost, 1985)；花岗闪长岩数据引自武美云等，2022；弧下地幔楔沉积物为主的混杂岩熔体数据引自 Cruz-Uribe et al.，2018)

图5　冬草沟岩体岩石类型判别图

Fig. 5　Discriminant graph of rock type for Dongcaogou pluton

中落于亚碱性区域(图 5a)。样品的 A/CNK 值为 1.04～1.06, 在 A/CNK-A/NK 图解中落在弱过铝质区域(图 5b), 在 SiO_2-K_2O 图解中样品落入钙碱性系列(图 5c)。

冬草沟岩体样品整体显示明显的线性演化趋势(表 2, 图 6), 冬草沟闪长岩、黑云母二长花岗的 TiO_2、Al_2O_3、Fe_2O_3T 等随着 SiO_2 含量的增加而下降。

4.2　微量元素

冬草沟岩体中闪长岩的稀土总量为 242×10^{-6}～299×10^{-6}, 相对较高; La_N/Yb_N 值为 19.00～24.10, 轻、重稀土分馏较明显; δEu 值为 0.75～1.05, 弱负铕异常到无异常(表 2, 图 7a)。黑云母二长花岗岩的稀土总量较低(44×10^{-6}～63×10^{-6}), 轻稀土较富集(La_N/Yb_N 值为 7.32～8.44), 无铕异常(δEu 值为 0.78～0.95)。

冬草沟岩体富集 Rb、Ba 等大离子亲石元素(LILE), 亏损 Nb、Ta、Ti 和 P 等高场强元素(HFSE)(图 7b)。闪长岩的 Cr(17.00×10^{-6}～62.40×10^{-6})、Ni(7.47×10^{-6}～20.60×10^{-6})含量更高(表 2); 黑云母二长花岗 Sr 含量(560×10^{-6}～814×10^{-6})、Sr/Y 值(65.63～66.80)更高, Y(8.54×10^{-6}～12.20×10^{-6})和 Yb(0.85×10^{-6}～1.13×10^{-6})含量更低, 与贾公台花岗闪长岩类似(武美云等, 2022)。

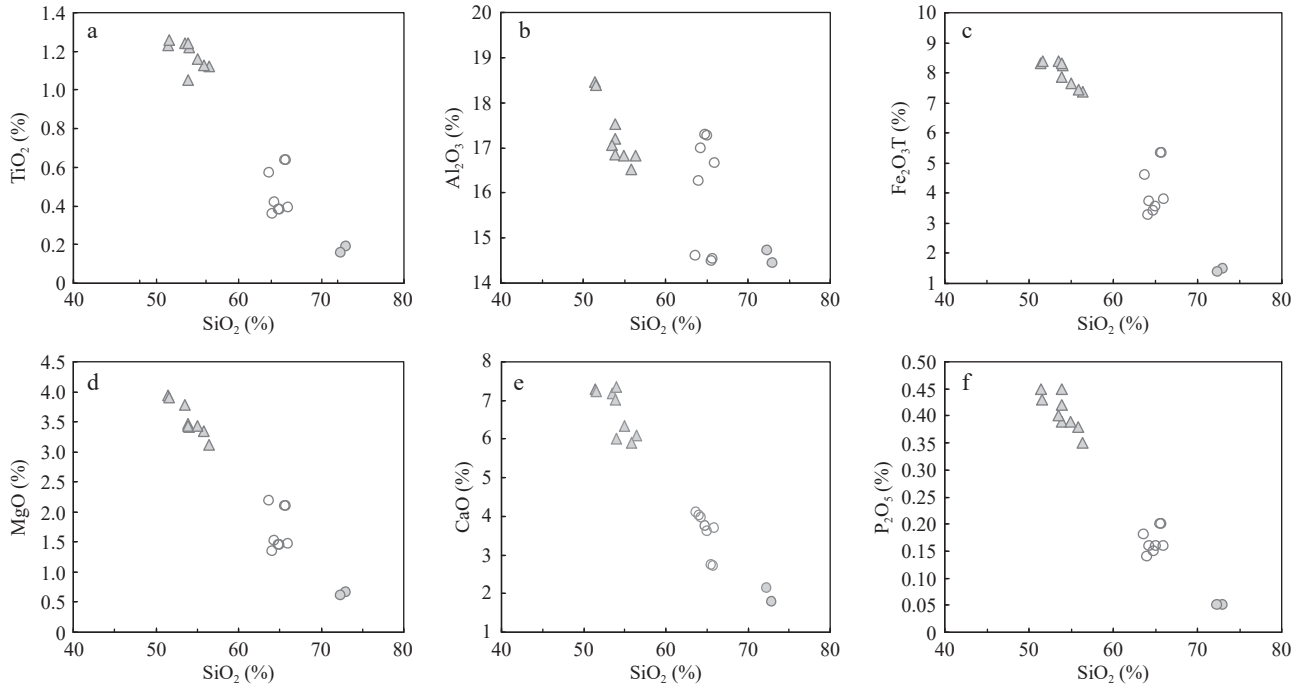


图6　冬草沟岩体哈克图解

Fig. 6　Harker diagram for Dongcaogou pluton

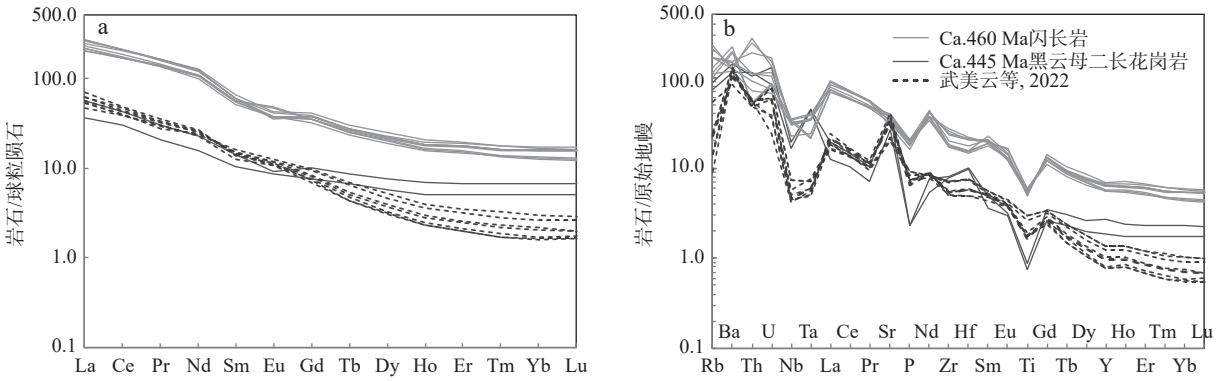


图7 冬草沟岩体球粒陨石标准化稀土配分模式图(a)及微量元素原始地幔标准化图解(b.标准化值据 Sun et al., 1989)

Fig. 7 (a) Chondrite-normalized REE distribution patterns, and (b) primitive mantle normalized diagrams for Dongcaogou pluton

5 讨论

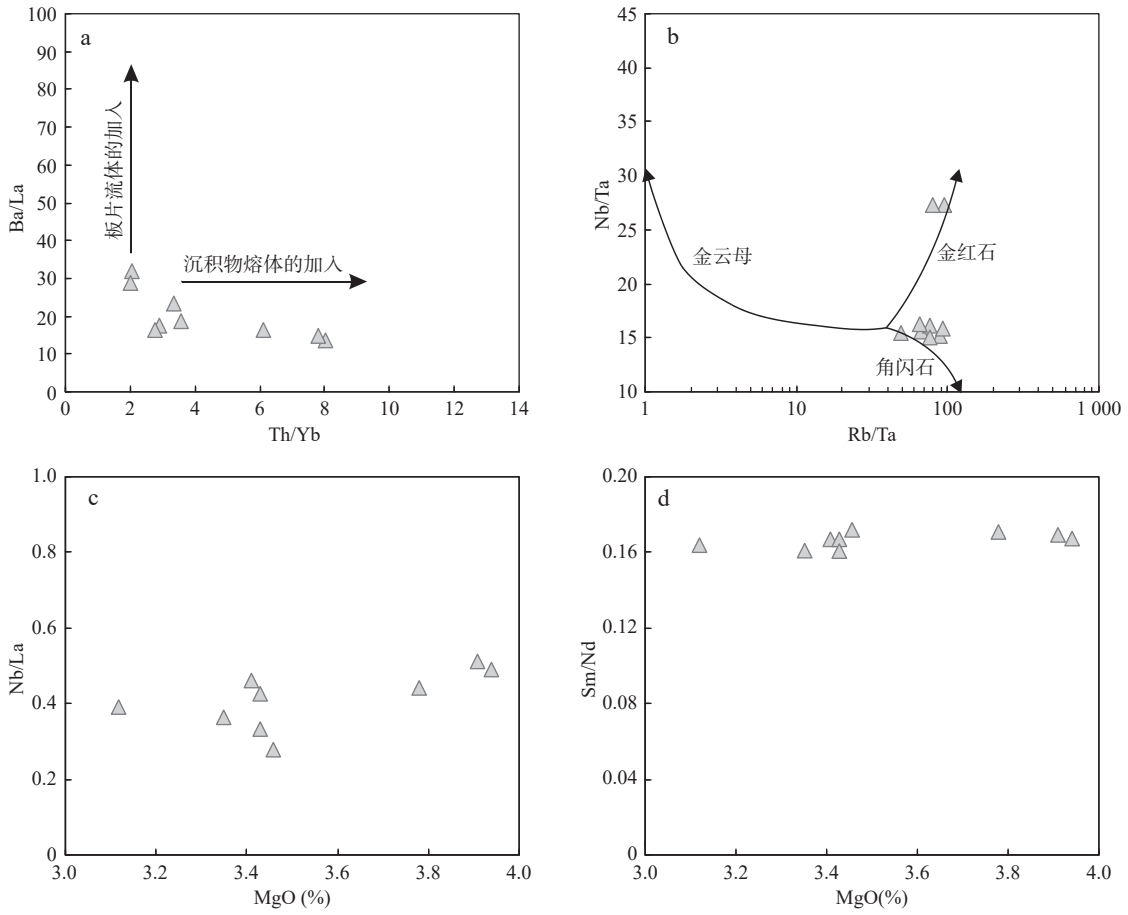
5.1 岩石成因

陆缘弧花岗质岩浆具有多个成因机制。①俯冲板片在榴辉岩相条件下发生部分熔融会形成埃达克质岩浆(Castro, 2014; Zheng, 2019);②幔源岩浆底侵引起下地壳熔融或不同源区岩浆的混合,熔体经历岩浆房晶粥的活化、结晶分异、岩浆混合等过程,最后形成闪长质–花岗质岩浆(Glazner et al., 2004; Coleman et al., 2004; Annen et al., 2006; Bachmann et al., 2016);③幔源玄武质岩浆的结晶分异过程形成闪长质–花岗质岩浆(Jagoutz et al., 2018);④俯冲带内俯冲物质与地幔橄榄岩机械混合形成“混杂岩”,该“混杂岩”部分熔融形成不同组分安山质原始弧岩浆,在该模式下可以形成俯冲带碱性岩浆(Codillo et al., 2018)。

冬草沟闪长岩具有略低的 SiO_2 含量(51.41%～56.40%),较高的全碱含量(K_2O+Na_2O=5.97%～7.01%)和稀土含量(ΣREE=242×10^{-6}～299×10^{-6}),显示典型钾玄质–碱性岩特征(图 5、图 7)。冬草沟闪长岩富集 LILE,亏损 HFSE 的地球化学特征,属于典型弧岩浆岩。当岩浆源区有俯冲沉积物熔体参与时,岩浆的 Th 和稀土元素含量会富集。冬草沟闪长岩的 Th 含量略高(4.37×10^{-6}～23.20×10^{-6},平均为 11.32×10^{-6}),说明源区受到了俯冲沉积物的影响(Woodhead et al. 2001)。受沉积物熔体交代富集的地幔源区部分熔融产生的岩浆 Th/Yb 值通常大于 2,流体交代富集的地幔源区部分熔融产生的岩浆其 Th/Yb 值通常小于 1(Woodhead et al., 2001)。冬草沟闪长岩具有较高的 Th/Yb 值(2.00～8.01),显示了沉积物熔体交代的特征。相比于 Ba/La,闪长岩具有更高的 Th/Yb 值,也支持地幔源区有沉积物熔体的加入(图 8a)。Nb/Ta 值(15.00～27.40)较高,说明源区存在金红石,反映俯冲物质的深部熔融(Xiong et al., 2005; Koenig et al., 2011)。

实验岩石学表明,由地幔橄榄岩交代熔融而成的碱性岩浆源区多受金云母或角闪石部分熔融的影响(Schmidt et al., 2004)。当源区中金云母或角闪石发生熔融时,岩浆 Rb/Ta 值将降低,Nb/Ta 值分异(Gómez-Tuena et al., 2018),而金红石的熔融则会导致 Nb/Ta 值升高。冬草沟闪长岩的 Nb/Ta 值较高,样品沿着金红石熔融的趋势分布(图 8b),说明源区可能主要受金红石的影响。Nb/La 和 Sm/Nd 值随 MgO 含量的变化而保持基本不变(图 8c、图 8d),说明岩浆受地壳同化混染作用不明显。由幔源基性岩浆结晶分异形成的闪长质熔体通常具有较高的 Mg#值(＞60, Grove et al., 2003),但冬草沟闪长岩具有低的 MgO 含量(3.12%～3.94%)和略高的 Mg#值(49～52)。因此,冬草沟闪长岩可能与地壳混染和基性岩浆结晶分异无关。

在俯冲带中以俯冲沉积物为主和少量俯冲洋壳流体及地幔楔橄榄岩可以发生机械混合,混合后的“混杂岩”经历脱水、熔融后形成碱性岩浆(Cruz-Uribe et al., 2018)。$(La/Sm)_N$ 与 Ba/Th图解通常用来说明俯冲洋壳脱水+俯冲沉积物+地幔橄榄岩 3 个组分的混合物中地壳物质的贡献。低 Ba/Th、高 $(La/Sm)_N$ 值的趋势是由于岩浆源中添加了沉积物,而低 $(La/Sm)_N$、高 Ba/Th 值的趋势是由于蚀变洋壳脱水所致。冬草沟闪长岩微量元素特征显示相对高的 $(La/Sm)_N$(3.64～4.49)和略富集的 Ba/Th 值,表明这些岩石主要是由俯冲沉积物和地幔橄榄岩的混合形成,可能含少量俯冲洋壳流体(Marschall et al., 2012)。冬草沟闪长岩的地



a.据 Hanyu et al., 2006；c 和 d.据 Kepezhinskas et al., 1997

图8　冬草沟闪长岩 Ba/La-Th/Yb（a）、Nb/Ta-Rb/Ta（b）、Nb/La-MgO（c）和 Sm/Nd-MgO（d）图解

Fig. 8　(a) Ba/La-Th/Yb, (b) Nb/Ta-Rb/Ta, (c) Nb/La-MgO and (d) Sm/Nd-MgO for the diorites of the Dongcaogou pluton

球化学特征也与以沉积物为主的混杂岩高压熔融形成的熔体组分一致(图 4a、图 4c)。综上所述, 冬草沟闪长岩具低硅、富碱、富集稀土元素的钾玄质–碱性岩浆特征, 可能是由俯冲沉积物和地幔楔橄榄岩混合后脱水、熔融而成, 其成因指示了俯冲沉积物和地幔楔橄榄岩的熔融, 记录了俯冲物质与弧下地幔相互作用的重要信息。

黑云母二长花岗岩 SiO_2(72.32%～72.94%)、Na_2O(4.60%～4.78%)、Sr(560×10^{-6}～814×10^{-6})、K_2O/Na_2O(0.47%～0.56%)、Sr/Y(65.63～66.80)值较高, Y(8.54×10^{-6}～12.20×10^{-6})、Yb(0.85×10^{-6}～1.13×10^{-6})含量较低, 与洋壳熔融而成的高 Sr、低 Y 型花岗岩的部分地球化学特征类似(图 9; Defant et al., 1990; Martin et al., 2005)。在 Sr/Y-Y 和 $(La/Yb)_N$-Yb_N 图解中, 样品全部落在埃达克岩区域(图 9)。样品富 Na、高 Si、低 Mg、低 O、低 Cr 和低 Ni 的特征也与贾公台埃达克质花岗闪长岩类似(武美云等, 2022)。然而, 样品更加富 Si、富集的不相容元素(如 K、Rb 等), 表明黑云母二长花岗岩可能由俯冲洋壳在榴辉岩相条件下部分熔融形成的熔体进一步分异而成。Kelemen et al.(2014)认为, 富 Na、高 Si 埃达克质花岗闪长岩母岩浆可能是俯冲洋壳在榴辉岩相条件下部分熔融形成的熔体, 而不是下地壳熔体。冬草沟黑云母二长花岗岩较高的 Na_2O 含量, 较低的 K_2O/Na_2O 值要求岩浆源区富 Na, 而样品比贾公台花岗闪长岩更高的 K_2O 含量则要求冬草沟黑云母二长花岗岩源区更富 K 或经历了结晶分异过程。由于下地壳富斜长石麻粒岩在部分熔融过程中 Sr 比 Nd 更具相容性, 这一过程就会产生低 Sr/Nd 岩浆(Kelemen et al, 2007)。冬草沟黑云母二长花岗岩 Sr/Nd 值较高(76.10～78.20), 表明冬草沟黑云母二长花岗岩来源于贫斜长石源区(Wang et al., 2020)。样品重稀土元素含量较低, 呈明显的右倾模式(图 7a), 且 Y/Yb 值较高(11.90～13.60), 说明源区可能存在石榴子石。贾公台花岗闪长岩和冬草沟黑云母二长花岗

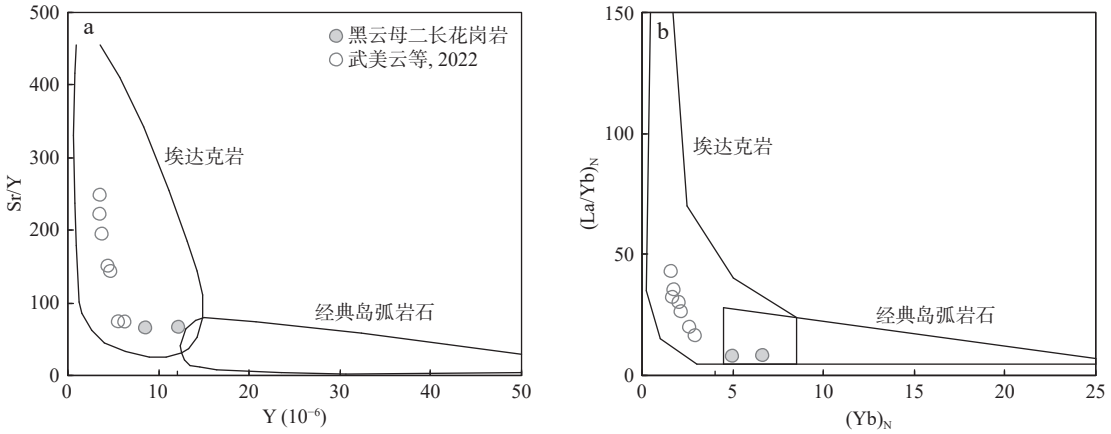


图9 冬草沟黑云母二长花岗岩 Sr/Y-Y(a)和$(La/Yb)_N$-$(Yb)_N$(b)(底图据 Defant and Drummond, 1990)

Fig. 9 (a) Sr/Y-Y and (b) $(La/Yb)_N$-$(Yb)_N$ diagrams show the biotite monzogranite of the Dongcaogou pluton

岩的 K_2O/Na_2O 值和 K_2O 含量符合 MORB 类玄武岩源熔体的实验值(分别为＜0.8% 和＜3%; Martin et al., 2005),更高的 K_2O/Na_2O 值指示母岩浆经历一定的结晶分异过程。哈克图解中显示样品具明显的分离结晶趋势(图 6a～图 6f),如随着 SiO_2 含量的增加,Al_2O_3、MgO、CaO 含量降低,表明可能发生了角闪石和辉石的分离结晶作用。TiO_2、$Fe_2O_3^T$ 与 SiO_2 呈明显的负相关关系,表明存在铁钛氧化物的分离结晶。因此,冬草沟中高 SiO_2、Na_2O 含量、低 MgO、Cr、Ni 含量的高 Sr、低 Y 型二长花岗岩,可能是由俯冲洋壳在榴辉岩相条件下部分熔融形成的熔体再分异而成。

5.2 冬草沟陆缘弧花岗质岩浆成因指示

前人研究显示,冬草沟岩体主要存在(471±2)Ma、(461±1)Ma 和 450～448 Ma 等 3 期岩浆活动,为同源岩浆不同期次的产物,属于加里东中期侵入岩(赵吉昌等, 2016)。笔者对冬草沟岩体中闪长岩和黑云母二长花岗岩展开了系统的年代学研究,获得两组年龄分别为(461±1)Ma 和(445±1)Ma,这两期岩浆事件时间与前人研究基本一致,揭示了冬草沟岩体主体形成于约 460～445 Ma。

区域上,中南祁连早古生代岩浆作用广泛发育,在约 517～452 Ma 间产生了一系列与俯冲作用相关的埃达克岩(吴才来等, 2016; Wang et al., 2017)、花岗岩(朱小辉等, 2016, Li et al., 2019)和碱性岩类(张莉莉等, 2013; 武美云等, 2022)与区域内弧/弧后性质火山岩和 SSZ 型蛇绿岩(Fu et al., 2018; Zhao et al., 2020)共同组成了弧–盆体系的火山–侵入岩建造组合。

中祁连在早古生代时期经历了洋壳的俯冲(Huang et al., 2015; Song et al., 2017; Wang et al., 2017; Zhao et al., 2020),在中祁连形成了一条巨大的早古生代弧岩浆岩带(Wang et al., 2017; Fu et al., 2018; Zhao et al., 2020),如盐池湾、木里和党河南山地区的具有弧后性质的火山岩–侵入岩或沉积岩组合(Zhao et al., 2020; 武美云等, 2022; 张帅等, 2022; Ma et al., 2023)。目前,对中祁连造山带中酸性侵入岩形成环境的报道包括 490～410 Ma 洋壳俯冲、490～465 Ma地壳加厚、465～440 Ma 弧后裂谷或碰撞后板片断离和约 415 Ma 后造山伸展等(彭岩等, 2014; 郑英等, 2017; Wang et al., 2017)。Wang et al.(2017)提出中祁连的弧壳增厚发生在 525～465 Ma, 中祁连西段基底在约 480～470 Ma 时期经历中–高级变质作用,表明中祁连的弧壳增厚发生在 525～465 Ma(Li et al, 2022)。在中祁连西段盐池湾地区发现了约 475 Ma 的 MORB-OIB-玻安岩等火山岩组合(Zhao et al., 2020),在党河南山地区发育 450～445 Ma 弧后/弧背盆地背景的埃达克岩(武美云等, 2022)。在党河南山和木里地区的火山–沉积岩系中发现了一套具弧后–弧后前陆盆地沉积特征的岩石组合(472～440 Ma; 张帅等, 2022)等。中祁连西段基性–中性岩脉指示中祁连地壳伸展发生在 450～445 Ma(Ma et al., 2023)。夏林圻等(2016)认为 中南祁连地区在 452～444 Ma 广泛发育强过铝质 S 型花岗岩组合,与祁连山地区最晚的弧火山岩形成时代(～446 Ma,)一致,认为此时祁连山可能已经进入到了碰撞造山阶段(李平等, 2023)。综上所述,冬草沟闪长岩可能(460 Ma)形成于弧地壳由增厚向伸展的转换阶段。在 445～442 Ma 期间,由于弧后伸展作用,板片熔体、大洋沉积物和弧下地幔混合形成贾公台埃达克质花岗闪长岩(武美云等, 2022),这些花岗闪长

岩随后经历结晶分异作用形成了约 445 Ma 冬草沟高 Sr、低 Y 型花岗岩。冬草沟碱性岩和高 Sr、低 Y 型花岗岩与盐池湾、木里和党河南山地区的弧后岩浆共同记录着俯冲带内不同阶段的演化历程, 也为探讨弧花岗质岩浆和壳幔相互作用提供了新的信息。

6　结论

(1)中南祁连冬草沟岩体中闪长岩和二长花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测年结果分别为 461 Ma 和 446 Ma, 为奥陶纪岩浆活动的产物。

(2)冬草沟碱性闪长岩可能为俯冲沉积物和地幔楔橄榄岩物理混合后脱水、熔融而成。高 Sr、低 Y 型二长花岗岩可能是埃达克质岩浆结晶分异的产物。

(3)冬草沟岩体形成于中南祁连地区古生代洋壳持续俯冲产生作用之下, 与俯冲板片流体、俯冲沉积物和弧下地幔楔壳幔相互作用密切相关。

利益冲突声明(Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References):

冯益民, 何世平. 祁连山大地构造与造山作用 [M]. 北京: 地质出版社, 1996.

李平, 高晓峰, 吕鹏瑞, 等. 祁连山–柴北缘地区岩浆活动的时空分布、成因演变及构造岩浆演化[J]. 西北地质, 2023, 56(4): 283−317.

LI Ping, GAO Xiaofeng, LV Pengrui, et al. Spatial–Temporal Distribution, Petrogenetic Evolution and Tectono–Magmatic Evolution in Qilian Mountains and Northern Margin of Qaidam[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(4): 283−317.

吕鹏瑞, 姚文光, 张辉善, 等. 特提斯成矿域中新世斑岩铜矿岩石成因、源区、构造演化及其成矿作用过程[J]. 地质学报, 2020, 94(8): 2291−2310.

LÜ Pengrui, YAO Wenguang, ZHANG Huishan, et al. Petrogenesis, source, tectonic evolution and mineralization process of the Miocene porphyry Cu deposits in the Tethyan metallogenic domain[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(8): 2291−2310.

彭岩, 李荣社, 计文化, 等. 中祁连西段北大河岩群中早古生代火山碎屑岩的识别——来自锆石 U-Pb 年代学的证据[J]. 西北地质, 2014, 47(4): 178−186.

PENG Yan, LI Rongshe, JI Wenhua, et al. SHRMP U-Pb Geochronoloaical Verification on the Identification of Early Paleozoic Volcanic Clasolite Zircons from the Beidahe Complex Group in the Western Segment of the Middle Oilian Mountains, China[J]. Northwestern Geology, 2014, 47(4): 178−186.

吴才来, 雷敏, 吴迪, 等. 柴北缘乌兰地区花岗岩锆石 SHRIMP 定年及其成因[J]. 地球学报, 2016, 37(4): 493−516.

WU Cailai, LEI Min, WU Di, et al. Zircon shrimp dating and genesis of granites in Wulan area of Northern Qaidam[J]. Acta Geoscience Sinica, 2016, 37(4): 493−516.

武美云, 王超, 李航, 等. 中祁连党河南山碱性系列岩浆岩-埃达克岩成因及其对俯冲带壳幔相互作用的启示[J]. 西北地质, 2022, 55(1): 19−38.

WU Meiyun, WANG Chao, LI Hang, et al. Petrogenesis of Magmatic Rocks and Adakite of Alkaline Series from Danghenanshan Area in Central Qilian Belt. lmplications for Crust- Mantle Interaction in Subduction Zone[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(1): 19−38.

夏林圻, 李向民, 余吉远, 等. 祁连山新元古代中-晚期至早古生代火山作用与构造演化[J]. 中国地质, 2016, 43(4): 1087−1138.

XIA Linqi, LI Xiangmin, YU Jiyuan, et al. Mid-Late Neoproterozoic to Early Paleozoic volcanism and tectonic evolution of the Qilian Mountain[J]. Geology in China, 2016, 43(4): 1087−1138.

张帅, 王超, 郝江波, 等. 中祁连党河南山-木里地区早古生代火山-沉积岩系锆石 U-Pb 年代学、物源示踪及其地质意义[J]. 岩石学报, 2022, 38(3): 813−842.

ZHANG Shuai, WANG Chao, HAO Jiangbo, et al. U-Pb geochronology, provenance and geological implications of Early Paleozoic volcano-sedimentary rocks in the Danghenanshan-Muli area, Central Qilian belt[J]. Acta Petrologica Sinica, 2022, 38(3): 813−842.

杨柳, 冯旭亮, 张健, 等. 祁连造山带东段覆盖区重磁场特征及北中祁连构造边界划分[J]. 西北地质, 2025, 58(3): 63−74.

YANG Liu, FENG Xuliang, ZHANG Jian, et al. Gravity and Magnetic Field Characteristics in the Covered Area of Eastern Segment of the Qilian Orogenic Belt and the Delineation of the Northern and Central Qilian Tectonic Boundaries[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(3): 63−74.

张莉莉, 戴霜, 张翔, 等. 南祁连党河南山地区鸡叫沟复式岩体岩石地球化学特征及构造环境[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2013, 49(6): 733−740.

ZHANG Lili, DAI Shuangi, ZHANG Xiang, et al. Lithogeochemistry of Jijiaogou intrusive complex in the Danghenanshan area, South Qilian Mountain and its tectonic implications[J]. Journal of Lanzhou University (Nature Sciences), 2013, 49(6): 733−740.

赵吉昌, 杨镇熙, 张立涛. 甘肃中祁连冬草沟花岗岩基岩石地球

化学特征[J]. 甘肃科技, 2016, 32(17): 42−46.

ZHAO Jichang, YANG Zhenxi, ZHANG Litao. Geochemical characteristics of Dongcaogou granite batholith in central Qilian, Gansu[J]. Gansu Science and Technology, 2016, 32(17): 42−46.

郑英, 陈光庭, 张小永, 等. 中祁连苏里地区奥陶纪石英闪长岩地球化学特征及年代学意义[J]. 西北地质, 2017, 50(4): 9−17.

ZHENG Ying, CHEN Guangting, ZHANG Xiaoyong, et al. Geochemical Characteristics and Chronology Significance of Ordovician Quatz Diorite from Suli Area in Middle Oilian Mountains[J]. Northwestern Geology, 2017, 50(4): 9−17.

朱小辉, 王洪亮, 杨猛. 祁连南缘柴达木山复式花岗岩体中部二长花岗岩锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 中国地质, 2016, 43(3): 751−767.

ZHU Xiaohui, WANG Hongliang, YANG Meng. Zircon U-Ph aoe of the monzoaranite from the middle seament of the 0aidam Mountain composite aranite on the south marcin of the Oilian Mountain[J]. Geology in China, 2016, 43(3): 751−767.

Annen C, Blundy J D, Sparks R S J. The genesis of intermediate and silicic magmas in deep crustal hot zones[J]. Journal of Petrology, 2006, 47: 505−539.

Bachmann O, Huber C. Silicic magma reservoirs in the Earth's crust[J]. American Mineralogist, 2016, 101: 2377−2404.

Brackman A J, Schwartz J J. The formation of high-Sr/Y plutons in cordilleran-arc crust by crystal accumulation and melt loss[J]. Geosphere, 2022, 18(2): 370−393.

Castro A. The off-crust origin of granite batholiths[J]. Geoscience Frontiers, 2014, 5: 63−75.

Codillo E A, Le Roux V, Marschall H R. Arc- like magmas generated by mélange- peridotite interaction in the mantle wedge[J]. Nature Communications, 2018, 9: 2864.

Coleman D S, Gray W, Glazner A F. Rethinking the emplacement and evolution of zoned plutons; geochronologic evidence for incremental assembly of the Tuolumne intrusive suite, California[J]. Geology, 2004, 32: 433−436.

Cruz-Uribe A M, Marschall H R, Gaetani G A, et al. Generation of alkaline magmas in subduction zones by partial melting of mélange diapirs—An experimental study[J]. Geology, 2018, 46(4): 343−346.

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.

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.

Fu C L, Yan Z, Aitchison J C, et al. Multiple subduction processes of the Proto-Tethyan Ocean: Implication from Cambrian intrusions along the North Qilian suture zone[J]. Gondwana Research, 2020, 87: 207−223.

Fu C L, Yan Z, Guo X Q, et al. Assembly and dispersal history of continental blocks within the Altun-Qilian-North Qaidam mountain belt, NW China[J]. International Geology Review, 2018, 61(3-4): 424−447.

Glazner A F, Bartley J M, Coleman D S, et al. Are plutons assembled over millions of years by amalgamation from small magma chambers?[J]. GSA Today, 2004, 14: 1052−5173.

Gómez-Tuena A, Mori L, Straub S M. Geochemical and petrological insights into the tectonic origin of the Trans-Mexican Volcanic Belt[J]. Earth-Science Reviews, 2018: 153-181.

Grove T L, Elkins-Tanton L T, Parman S W, et al. Fractional crystallization and mantle-melting controls on calc-alkaline differentiation trends[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2003, 145(5).

Hanyu T, Tatsumi Y, Nakai S, et al. Contribution of slab melting and slab dehydration to magmatism in the NE Japan arc for the last 25 Myr: Constraints from geochemistry[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2006, 70(18S): A229−A229.

Hoskin P W, Schaltegger U. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2003, 53(1): 27−62.

Huang H, Niu Y L, Nowell G, et al. The nature and history of the Qilian Block in the context of the development of the Greater Tibetan Plateau[J]. Gondwana Research, 2015, 28: 209−224.

Jagoutz O, Klein B. On the importance of crystallization–differentiation for the generation of SiO2-rich melts and the composition build-up of arc (and continental) crust[J]. American Journal of Science, 2018, 318: 29−63.

Kay R W, Kay S M. Delamination and delamination magmatism[J]. Tectonophysics, 1993, 219: 177−189.

Kelemen P B. Genesis of high Mg# andesites and the continental crust[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1995, 120(1): 1−19.

Kelemen P, Hanghøj K, Greene A. One view of the geochemistry of subduction-related magmatic arcs, with an emphasis on primitive andesite and lower crust[J]. Treatise on Geochemistry, 2007, 3: 1−70.

Kelemen P B, Hanghaj K, Greene A R. One View of the Geochemistry of Subduction-Related Magmatic Arcs, with an Emphasis on Primitive Andesite and Lower Crust[J]. Treatise on Geochemistry.2014, 4: 794−806.

Kepezhinskas P, McDermott F, Defant M J, et al. Trace element and Sr-Nd-Pb isotopic constraints on a three-component model of Kamchatka Arc petrogenesis[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1997, 61(3): 577−600.

Koenig S, Schuth S. Deep melting of old subducted oceanic crust re-

corded by super chondritic Nb/Ta in modern island arc lavas[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2011, 301(1−2): 265−274.

Lange R A, Carmichael I S E. A potassic volcanic front in western Mexico: The lamprophyric and related lavas of San Sebastian [J]. Geological Society of America Bulletin, 1991, 103(7): 928−940.

Laurent O, Björnsen J, Wotzlaw J F, et al. Earth's earliest granitoids are crystal-rich magma reservoirs tapped by silicic eruptions[J]. Nature Geoscience, 2020, 13: 163−169.

Li H, Wang C, Hames W, et al. Grenville-age basement and early Paleozoic reworking in the Qilian Orogen, NW China: Implications for paleotectonic reconstruction of Rodinia and Gondwana[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2022, 237: 105351.

Li M, Wang C, Li R S, et al. Identifying late Neoproterozoic-early Paleozoic sediments in the South Qilian Belt, China: A peri-Gondwana connection in the northern Tibetan Plateau[J]. Gondwana Research, 2019, 76: 174−184.

Ma D Q, Wang C, Li H, et al. Petrogenesis of mafic-intermediate dykes from the Central Qilian belt, NW China: Significance of the role of subducted compositions in subarc mantle[J]. Geological Journal, 2023, 1−15.

Macpherson C G, Dreher S T, Thirlwall M F. Adakites without slab melting: High pressure differentiation of island arc magma, Mindanao, the Philippines[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 243(3−4): 581−593.

Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. Geological Society of America Bulletin, 1989, 101(5): 635−643.

Marschall H R, Schumacher J C. Arc magmas sourced from melange diapirs in subduction zones[J]. Nature Geoscience, 2012, 5(12): 862−867.

Martin H, Smithies R H, Rapp R, et al. An overview of adakite, tonalite–trondhjemite–granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution[J]. Lithos, 2005, 79(1): 1−24.

Middlemost E A K. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. Earth Science Review, 1994, 37: 215−224.

Middlemost E. Magmas and Magmatic Rocks: An Introduction to Igneous Petrology[J]. Longman, 1985, 50: 185−186.

Peccerillo A, Taylor S R. Rare earth elements in East Carpathian volcanic rocks[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1976, 32(2): 121−126.

Peccerillo A. Multiple mantle metasomatism in central-southern Italy: Geochemical effects, timing and geodynamic implications[J]. Geology, 1999, 27(4): 315−318.

Qian Q, Hermann J. Partial melting of lower crust at 10–15 kbar: constraints on adakite and TTG formation[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2013, 165: 1195−1224.

Schmidt M W, Vielzeuf D, Auzanneau E. Melting and dissolution of subducting crust at high pressures: the key role of white mica[J]. Earth & Planetary Science Letters, 2004, 228(1−2): 65−84.

Song S G, Niu Y L, Su L, et al. Tectonics of the North Qilian orogen, NW China[J]. Gondwana Research, 2013, 23(4): 1378−1401.

Song S G, Yang L, Zhang Y, et al. Qi-Qin Accretionary Belt in Central China Orogen: accretion by trench jam of oceanic plateau and formation of intra-oceanic arc in the Early Paleozoic Qin-Qi-Kun Ocean[J]. Science Bulletin, 2017, 62(15): 1035−1038.

Sun S S and McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42(1): 313−345.

Tung K A, Yang H Y, Liu D Y, et al. The Neoproterozoic granitoids from the Qilian block, NW China: Evidence for a link between the Qilian and South China blocks[J]. Precambrian Research, 2013, 235: 163−189.

Wang C, Li R S, Smithies R H, et al. Early Paleozoic felsic magmatic evolution of the western Central Qilian belt, northwestern China, and constraints on convergent margin processes[J]. Gondwana Research, 2017, 41: 301−324.

Wang Q, Hao L, Zhang X, et al. Adakitic rocks at convergent plate boundaries: Compositions and petrogenesis[J]. Science China Earth Sciences, 2020, 63: 1992−2016.

Woodhead J D, Hergt J M, Davidson J P, et al. Hafnium isotope evidence for 'conservative' element mobility during subduction zone processes[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2001, 192: 331−346.

Xiao W J, Windley B F, Yong Y, et al. Early Paleozoic to Devonian multiple-accretionary model for the Qilian Shan, NW China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2009, 35(3−4): 323−333.

Xiong X L, Adam J, Green T H. Rutile stability and rutile/melt HFSE partitioning during partial melting of hydrous basalt: Implications for TTG genesis[J]. Chemical Geology, 2005, 218: 339−359.

Zhao G J, Wang C, Zhu X H, et al. Intraoceanic back-arc magma diversity: Insights from a relic of the Proto-Tethys oceanic lithosphere in the western Qilian Orogen, NW China[J]. Chemical Geology, 2020, 550: 119756.

Zheng Y F. Subduction zone geochemistry[J]. Geoscience Frontiers, 2019, 10: 1223−1254.