

东准噶尔巴斯克花岗岩闪长岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其构造意义



Pre-pub. on line: www.
geojournals.cn/georev

陶威^{1,2)}, 郭岭¹⁾, 周宁超^{1,3)}, 李阳¹⁾, 王星²⁾, 陈涛²⁾, 白建科⁴⁾

1) 大陆动力学国家重点实验室, 西北大学地质学系, 西安, 710069;

2) 陕西省矿产地质调查中心, 西安, 710068;

3) 中国地质调查局西安地质调查中心, 西安, 710054;

4) 中国地质调查局西宁自然资源综合调查中心, 西宁, 810021

内容提要: 巴斯克花岗岩闪长岩位于野马泉岛弧内, 本文综合野外地质、岩相学、地球化学以及锆石 U-Pb 年代学等多学科手段, 进而为该地区晚石炭世时期构造背景提供岩浆岩约束。岩石地球化学研究表明, 岩株主量元素具有高硅、准铝—弱过铝质、钙碱性的 I 型花岗岩特征; 岩石样品稀土元素总量在 83.79×10^{-6} 至 125.67×10^{-6} 之间, 且轻/重稀土之间的比值介于 5.32 至 8.63 之间 (平均值为 7.1), 指示轻稀土较重稀土富集。Eu 元素轻度负异常 ($\delta\text{Eu} = 0.69 \sim 0.89$)。样品富集大离子亲石元素 (如 K、Rb、Ba), 且亏损高场强元素 (HFSE, 如 Nb、Ta 和 Ti) 及 P, Nb、Ta 负异常明显。岩株锆石 $^{206}\text{U}/^{238}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $301.3 \pm 2.5 \text{ Ma}$ ($MSWD=0.33$) 和 $310.7 \pm 3.6 \text{ Ma}$ ($MSWD=0.75$), 表明岩株形成时代为晚石炭世。综合区域地质特征、岩石地球化学和岩浆源区特征, 表明东准噶尔地区晚石炭世 (310 ~ 301 Ma) 处于造山带碰撞后的陆壳伸展构造体制, 且岩浆具有壳幔混合和分批熔融、增量生长的特征。

关键词: 东准噶尔; 花岗闪长岩; 地球化学; 锆石 U-Pb 年代学; 后碰撞; 晚石炭世

中亚造山带是全球重要的显生宙增生造山带之一, 是研究显生宙以来地球动力学和大陆增生生长的理想实验室 (Sengör et al., 1993; Yakubchuk et al., 2004; Kovalenko et al., 2005; Windley et al., 2009; Kröner et al., 2007; Xiao Wenjiao et al., 2008, 2009)。东准噶尔围限于阿尔泰南部、准噶尔盆地东部、蒙古西南部和东天山北部, 是中亚造山带的重要组成部分, 该区自古生代来经历了大洋扩张、板块俯冲、碰撞和后碰撞等构造演化历史, 形成了一系列岛弧杂岩带和增生杂岩 (Xiao et al., 2008, 2009; 汤贺军, 2021)。东准噶尔显生宙以来演化造就了独具特色的构造—岩浆特征, 为成矿物源、动力和空间提供了良好基础 (张峰等, 2014a)。

目前, 东准噶尔石炭纪的构造环境存在不同认识。有学者通过上石炭统巴塔马依内山组火山岩研究, 对东准噶尔经历晚石炭世构造环境得出迥异的

结论。如经历大陆扩展后闭合抬升演化过程 (朱志新等, 2005)、裂谷环境 (赵霞等, 2008)、洋壳拆沉作用下后碰撞末期的构造环境 (320.2 Ma, 罗婷等, 2016)、洋内俯冲阶段 (龙晓平等, 2008; 张峰等, 2014b), 并于 320 ~ 311 Ma 之间闭合 (张峰等, 2014b)、野马泉岛弧于 330 Ma 时处于双向俯冲体制 (Long Xiaoping et al., 2012) 等。构造—沉积学研究也有准噶尔古生代洋盆闭合于早石炭世之前 (349 Ma, 白建科等, 2018; $343.0 \pm 5.0 \text{ Ma}$, 黄岗等, 2012; 348 Ma, Xu Xingwang et al., 2015) 和晚石炭世 (336 ~ 300 Ma, 李振生等, 2016) 的不同认识。而 Li Di et al (2020) 从构造角度认为东准噶尔地区于 330 ~ 320 Ma 完成碰撞, 并于晚石炭世 (320 Ma) 左右完成挤压向伸展构造体制转换。与此同时, 不同学者在东准地区报道的后碰撞花岗岩年代多集中于 265 ~ 349 Ma 范围内 (田健等, 2014; 2016;

注: 本文为国家自然科学基金资助项目“海洋古沉积环境特征序列演化的黑色页岩记录” (编号: 41302076)、“秦岭晚中生代花岗岩的构造研究及其对陆内造山过程的约束” (编号: 41802212)、“河南鹤壁地区金伯利岩中地幔包体地球化学研究及岩石圈地幔演化” (编号: 41773024); 陕西省创新人才推进计划——青年科技新星项目“岩浆热液型石墨矿成矿机理——以新疆奇台黄羊山石墨矿为例” (编号: 2019KJXX-078) 和新疆东准噶尔 1:5 万四幅区域地质矿产调查项目 (编号: DD20160006) 的成果。

收稿日期: 2021-09-21; 改回日期: 2012-12-02; 网络首发: 2021-12-20; 责任编辑: 章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2021.12.065

作者简介: 陶威, 男, 1987 年生, 工程师, 博士研究生, 主要从事构造地质学、区域地质调查及矿产勘查工作; Email: hputw07@163.com。通讯作者: 郭岭, 男, 1983 年生, 副教授, 博士, 主要从事矿产普查与勘探方面的教学及研究工作; Email: guoling@nwwu.edu.cn。

苏玉平等, 2006; 沈晓明等, 2013; 杨高学等, 2008, 2009; 胡万龙, 2016; 甘林等, 2010; 熊双才等, 2019a; 2019b; 张征峰等, 2021; 李宗怀等,

2004; 韩宝福等, 2006)。

上述研究结果显示, 众多学者对准噶尔洋盆的闭合时限有不同认识, 且得出在相近时代(320~300

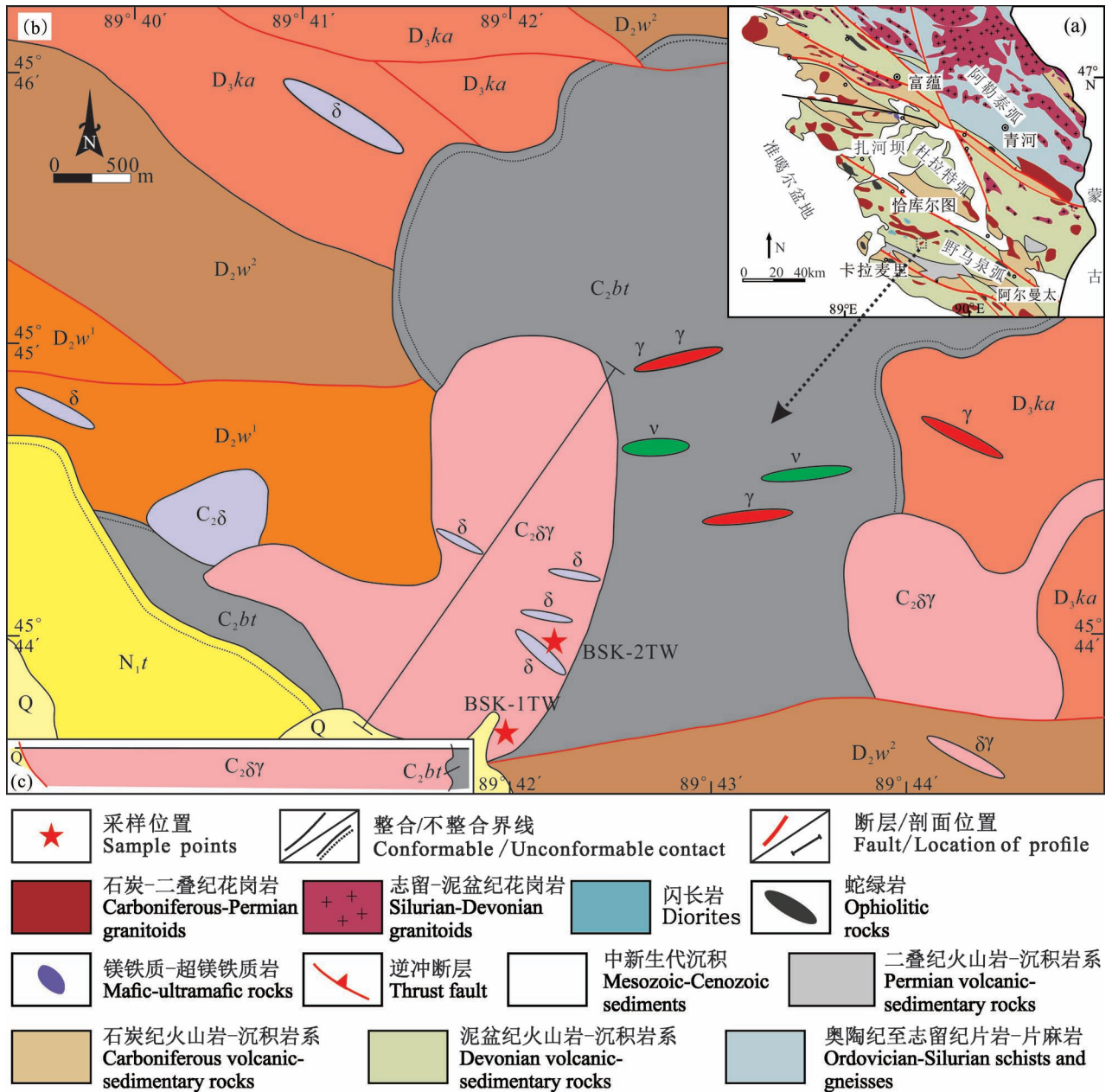


图1 新疆东准地区大地构造及花岗岩分布简图(a, 据 Shen Xiaoming et al., 2011, 修改)、东准噶尔巴斯克地区区域地质简图(b, 据①修改)及巴斯克岩体剖面图(c)

Fig. 1 The tectonic map of east Junggar area and granites distribution map(a) (modified from Shen Xiaoming et al., 2011), the Geological sketch map of the Basike area in east Junggar with sampling sites (b) (modified from ①) and profile of the Basike pluton (c) Q—第四系; N_1t —塔西河组; C_2bt —巴塔马依内山组; D_3ka —克安库都克组; D_2w^2 —乌鲁苏巴斯套组二段; D_2w^1 —乌鲁苏巴斯套组一段; $C_2\delta$ —晚石炭世闪长岩; $C_2\delta\gamma$ —晚石炭世花岗闪长岩; v —辉长岩脉; δ —闪长岩脉; $\delta\gamma$ —花岗闪长岩岩脉; γ —花岗岩脉

Q—Quaternary; N_1t —Taxihe Formation; C_2bt —Batamayineishan Formation; D_3ka —Ke'ankuduke Formation; D_2w^2 —the Second Member of Wulusubasitao Formation; D_2w^1 —the First Member of Wulusubasitao Formation; $C_2\delta$ —Late Carboniferous diorite; $C_2\delta\gamma$ —Late Carboniferous granodiorite; v —gabbro dyke; δ —diorite dyke; $\delta\gamma$ —granodiorite dyke; γ —granite dyke

Ma) 俯冲、后碰撞、挤压向伸展的构造转换等不同的构造背景。野马泉岛弧位于在卡拉麦里蛇绿岩带和阿尔曼太蛇绿岩带之间,上述不同结论对认识野马泉岛弧晚石炭世的构造背景产生分歧,限制了对该区基础地质深入认识,并给找矿工作增加难度。近年来,地质填图工作^{①②}在东准噶尔野马泉岛弧内识别出大量石晚石炭世花岗岩质岩石(图 1),而花岗岩形成演化对造山带构造演化、造山带地壳的形成发育和壳幔相互作用等方面具有指示意义(Pitcher et al., 1997; 王涛, 2000; 吴福元等, 2007; 肖庆辉等, 2007; 张旗等, 2012)。因此,本文选择位于野

马泉岛弧内巴斯克花岗闪长岩为研究对象,综合野外地质、岩相学、锆石 U-Pb 定年、地球化学和锆石特征等方面研究,探讨其岩石成因和产出构造环境。结合区域地质特征,进而约束准噶尔野马泉构造带晚石炭世构造背景。

1 区域地质及岩相学

本次所研究的巴斯克花岗闪长岩位于野马泉岛弧带内(图 1)。区域露出地层主要为泥盆系卓木巴斯套组(D₁z)浅海相的碎屑岩、乌鲁苏巴斯套组(D₂w²)浅海相粗碎屑岩、蕴都喀拉组(D₂yd)细碎屑

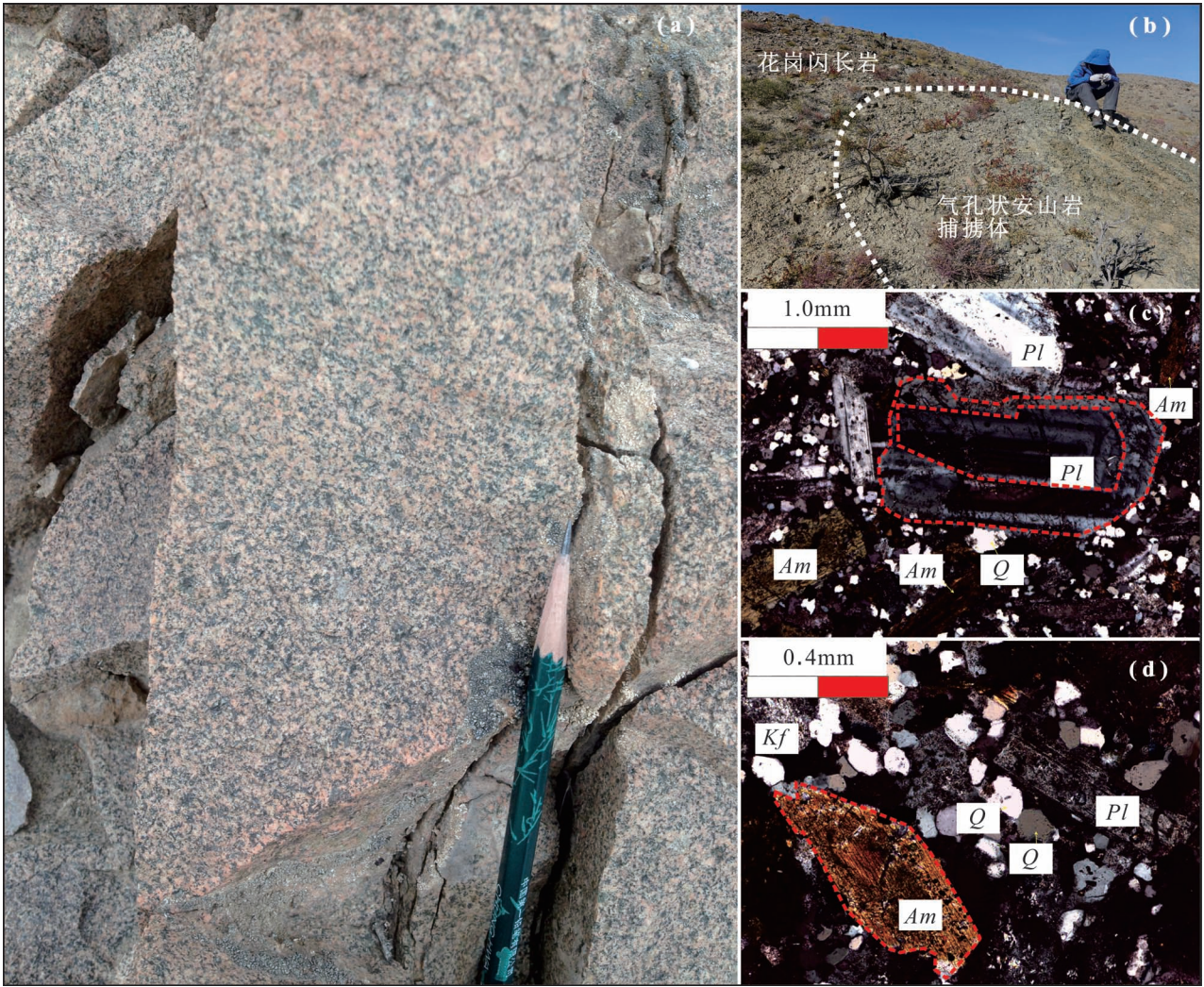


图 2 东准噶尔巴斯克花岗闪长岩宏观和显微结构特征:(a)花岗闪长岩野外照片;(b)气孔状安山岩捕掳体;
(c)长条状斜长石环带结构;(d)角闪石显微特征

Fig. 2 The petrological photos, micro-structure characteristics of the Basike granodiorite in east Junggar: (a) field photo of granodiorite, (b) the xenolith of vesiculate andesite, (c) ring structure of plagioclase, (d) microscope characteristics of hornblende

Pl—斜长石、Kf—钾长石、Am—角闪石、Q—石英
Pl—plagioclase, Kf—k-feldspar; Am—hornblende, Q—quartz

岩、克安库都克组(D_3ka)细碎屑岩;石炭系黑山头组(C_1h)陆源碎屑岩和火山碎屑岩、姜巴斯套组(C_1j)浅海相碎屑岩—火山碎屑岩、南部被第四系冲洪积砂、砾石覆盖。花岗闪长岩呈浅肉红色(图2a),似斑状结构,斑晶为斜长石或钾长石,基质为

细粒显晶质斜长石、钾长石、石英、角闪石等,岩石为块状构造。野外见花岗闪长岩内携带有巴塔玛依内山组(C_2bt)安山岩捕虏体(图2b),表明其侵位时代不早于晚石炭世。岩石矿物主要包括斜长石(45%~50%)、钾长石(20%~25%)、石英(20%~25%)、

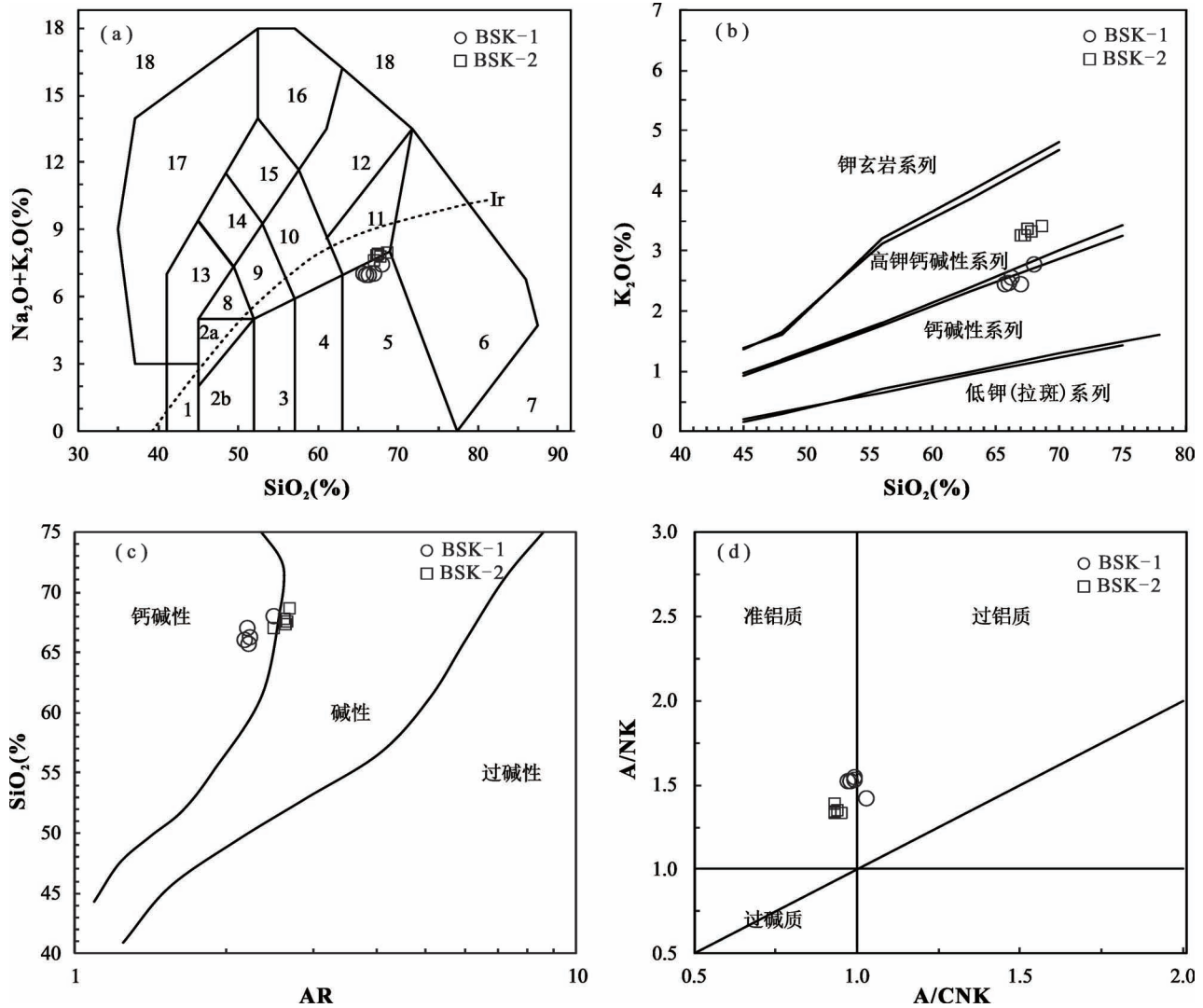


图 3 东准噶尔巴斯克花岗闪长岩 TAS 分类图解(a)(底图据 Middelmost et al., 1994); SiO_2 — K_2O 图解(b)(底图据 Ewart et al., 1982); SiO_2 —AR 岩石序列判别图解(c)(底图据 Wright et al., 1969); A/NK — A/CNK 图解(d)(底图据 Maniar et al., 1989)

Fig. 3 The TAS diagram (a) (after Middelmost et al., 1994), diagram of SiO_2 vs K_2O (b) (after Ewart et al., 1982), SiO_2 vs AR diagram (c) (after Wright et al., 1969), A/CNK vs A/NK diagrams (d) (after Maniar et al., 1989) of the Basike granodiorite in east Junggar

1—橄榄辉长岩;2a—碱性辉长岩;2b—亚碱性辉长岩;3—辉长闪长岩;4—闪长岩;5—花岗闪长岩;6—花岗岩;7—石英岩;8—二长辉长岩;9—二长闪长岩;10—二长岩;11—石英二长岩;12—正长岩;13—副长石辉长岩;14—副长石二长闪长岩;15—副长石二长正长岩;16—副长正长岩;17—副长深成岩;18—霓方钠岩/磷霞岩/粗白榴岩
1—Peridotgaooro; 2a—alkali gabbro; 2b—subalkaline gabbro; 3—gabbroic diorite; 4—diorite; 5— granodiorite; 6—granite; 7—quartzolite; 8—monzogabbro; 9—monzodiorite; 10—monzonite; 11—quartz monzonite; 12—syenite; 13—foidgarro; 14—foidmonzodiorite; 15—foidmonzosyenite; 16—foidsyenite; 17—foidolite; 18—tawile / urtite / italite

表 1 东准噶尔巴斯克花岗闪长岩主量(%)、微量元素及稀土($\times 10^{-6}$) 分析结果

Table 1 Analytical results of major(%) , trace elements($\times 10^{-6}$) and REE($\times 10^{-6}$) of the Basike granodiorite, east Junggar

样号	BSK01	BSK02	BSK03	BSK04	BSK05	BSK06	BSK07	BSK08	BSK09	BSK10
SiO ₂	66. 01	66. 26	65. 7	66. 99	68. 02	68. 6	67. 52	67. 31	67. 76	66. 95
TiO ₂	0. 6	0. 58	0. 58	0. 57	0. 54	0. 59	0. 62	0. 62	0. 62	0. 64
Al ₂ O ₃	15. 5	15. 28	15. 45	15. 49	15. 18	14. 93	14. 85	14. 79	14. 78	14. 86
Fe ₂ O ₃	1. 17	0. 99	1. 25	1. 15	1. 01	1. 4	1. 59	1. 54	1. 54	1. 62
FeO	2. 41	2. 58	2. 44	2. 29	2. 12	2	1. 91	1. 99	2. 01	2. 01
MnO	0. 08	0. 1	0. 08	0. 08	0. 07	0. 05	0. 06	0. 06	0. 06	0. 07
MgO	1. 92	1. 98	1. 92	1. 53	1. 58	1. 38	1. 38	1. 41	1. 43	1. 47
CaO	3. 13	2. 95	3. 12	3. 14	2. 23	2. 5	2. 68	2. 66	2. 65	2. 89
Na ₂ O	4. 48	4. 41	4. 58	4. 59	4. 7	4. 58	4. 57	4. 57	4. 49	4. 36
K ₂ O	2. 46	2. 55	2. 44	2. 45	2. 76	3. 4	3. 35	3. 26	3. 31	3. 26
P ₂ O ₅	0. 16	0. 15	0. 15	0. 16	0. 14	0. 14	0. 15	0. 14	0. 14	0. 15
烧失	1. 96	2. 04	2. 13	1. 41	1. 54	0. 33	1. 2	1. 53	1. 07	1. 61
总量	99. 88	99. 87	99. 84	99. 85	99. 89	99. 9	99. 88	99. 88	99. 86	99. 89
Na ₂ O+K ₂ O	6. 94	6. 96	7. 02	7. 04	7. 46	7. 98	7. 92	7. 83	7. 8	7. 62
Na ₂ O/K ₂ O	1. 82	1. 73	1. 88	1. 87	1. 7	1. 35	1. 36	1. 4	1. 36	1. 34
A/CNK	0. 99	0. 99	0. 98	0. 97	1. 03	0. 95	0. 93	0. 93	0. 94	0. 93
AR	2. 19	2. 24	2. 22	2. 21	2. 5	2. 69	2. 65	2. 63	2. 62	2. 5
σ	2. 06	2. 05	2. 13	2. 04	2. 2	2. 48	2. 53	2. 49	2. 44	2. 39
Li	17	10. 6	14. 3	13. 2	12	11. 7	8. 9	9. 66	11. 5	10. 8
Sc	13. 6	10. 7	15. 5	14. 5	12. 9	12. 9	12. 3	10. 7	14. 1	13. 5
V	74. 5	69. 5	74. 1	64. 5	59	58. 4	62. 4	60. 8	62	64
Cr	27. 2	27. 2	28. 5	17. 6	15. 2	11. 6	13. 4	13. 2	13. 6	12. 9
Co	7. 72	6. 47	10. 6	6. 69	5. 44	7. 69	7. 7	8. 65	8. 88	9. 28
Ni	13. 3	13. 3	16	13. 1	10. 8	11. 8	12. 1	12. 1	11. 5	12. 2
Cu	30. 7	38	36. 2	20	35. 8	18. 6	28. 4	24. 6	31. 4	24. 5
Zn	80. 6	69. 5	116	133	71. 7	34. 9	42. 6	46. 8	46. 7	49. 2
Ga	17. 9	17. 6	17. 9	18. 8	17. 5	17. 7	17. 9	17. 6	17. 9	17. 9
Rb	33. 6	50. 6	58. 4	67. 1	64. 6	70. 2	86. 2	79. 2	80	83. 1
Sr	467	494	580	534	536	196	276	264	264	288
Y	14. 8	14. 5	15. 8	15. 9	15. 6	18. 6	22. 5	20. 9	22	22
Zr	191	163	161	168	187	230	259	258	250	256
Nb	8. 24	7. 79	7. 97	8. 5	7. 9	9. 04	9	9. 19	9. 38	9. 21
Cs	1. 64	2. 38	2. 25	1. 08	3. 32	1. 75	1. 76	2. 26	2. 05	2. 15
Ba	587	664	645	618	735	517	616	558	578	589
Hf	4. 86	4. 22	4. 06	4. 42	4. 68	5. 92	6. 38	6. 45	6. 21	6. 3
Ta	0. 69	0. 65	0. 66	0. 7	0. 66	0. 8	0. 71	0. 78	0. 8	0. 75
Pb	16. 4	9. 88	19. 6	21. 5	15. 9	7. 33	7. 59	8. 14	8. 48	8. 02
Th	5. 2	5. 91	6. 34	6. 82	7. 24	7. 22	8. 7	7. 68	7. 83	8. 11
U	1. 43	1. 41	1. 71	1. 62	1. 68	1. 48	1. 69	1. 49	1. 52	1. 48
La	17. 4	19	22. 2	22. 9	22. 8	18. 3	26	21. 3	23. 3	23. 7
Ce	29. 6	35. 7	41. 5	42. 6	43. 8	26	47. 3	34. 2	34. 1	39. 2
Pr	4. 39	4. 63	5. 19	5. 35	5. 26	4. 95	6. 36	5. 52	5. 92	5. 92
Nd	17. 4	17. 6	20. 3	20. 6	19. 3	19. 4	24. 6	21. 9	23. 1	23. 3
Sm	3. 4	3. 63	3. 91	4. 02	3. 76	4. 16	4. 91	4. 53	4. 73	4. 71
Eu	0. 93	0. 88	1. 02	1. 02	0. 92	0. 89	1. 04	0. 99	1. 01	1. 02
Gd	3. 02	3. 02	3. 34	3. 37	3. 26	3. 66	4. 35	4. 05	4. 2	4. 22
Tb	0. 47	0. 48	0. 52	0. 54	0. 52	0. 62	0. 7	0. 68	0. 68	0. 68
Dy	2. 92	2. 84	3. 06	3. 03	2. 99	3. 74	4. 16	4. 12	4. 19	4. 16
Ho	0. 58	0. 57	0. 6	0. 61	0. 6	0. 76	0. 85	0. 83	0. 84	0. 83
Er	1. 6	1. 52	1. 63	1. 6	1. 6	2. 16	2. 29	2. 28	2. 31	2. 3
Tm	0. 24	0. 22	0. 24	0. 24	0. 24	0. 33	0. 35	0. 35	0. 34	0. 35
Yb	1. 61	1. 54	1. 63	1. 62	1. 66	2. 27	2. 42	2. 4	2. 37	2. 43
Lu	0. 23	0. 22	0. 24	0. 24	0. 23	0. 32	0. 34	0. 34	0. 34	0. 34

样号	BSK01	BSK02	BSK03	BSK04	BSK05	BSK06	BSK07	BSK08	BSK09	BSK10
ΣREE	83.79	91.85	105.38	107.74	106.94	87.56	125.67	103.49	107.43	113.16
LREE	73.12	81.44	94.12	96.49	95.84	73.7	110.21	88.44	92.16	97.85
HREE	10.67	10.41	11.26	11.25	11.1	13.86	15.46	15.05	15.27	15.31
$\frac{\text{LREE}}{\text{HREE}}$	6.85	7.82	8.36	8.58	8.63	5.32	7.13	5.88	6.04	6.39
(La/Yb) _N	7.75	8.85	9.77	10.14	9.85	5.78	7.71	6.37	7.05	7
δEu	0.87	0.79	0.84	0.82	0.78	0.68	0.67	0.69	0.68	0.69
Rb/Sr	0.07	0.1	0.1	0.13	0.12	0.36	0.31	0.3	0.3	0.29
Rb/Ba	0.06	0.08	0.09	0.11	0.09	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14
t(℃)	860.2	846.0	843.1	848.2	863.5	879.7	889.4	889.2	886.6	887.6

角闪石(7%)和少量辉石,此外还含少量副矿物(锆石、磷灰石等)和不透明矿物。其中,斜长石呈半自形长柱状—他形粒状、板状,发育环带结构(图 2c);钾长石呈半自形—他形粒状、板状,发育卡氏双晶;石英呈他形粒状;角闪石(图 2d)呈半自形—他形,发育简单双晶,后期发生绿泥石化。岩石后期经历蚀变,具体表现为发育绢云母化、高岭土化、绿泥石化等,镜下可观察到长石边部发生蚀变(图 2c、d)。受后期构造作用影响,岩株野外多呈碎裂状。

2 测试分析方法

锆石的挑选、制靶在西安瑞石地质科技有限公司实验室进行。样品粉碎后,用浮选和电磁选方法进行锆石单矿物分选,并将锆石样品置于环氧树脂中,之后用无色透明的环氧树脂固定,待环氧树脂固化后抛光使锆石曝露一半晶面。之后通过透射光、反射光和 CL 图像详细研究锆石的晶体形貌和内部结构特征,选择无明显裂痕及包裹体的锆石进行测试。

锆石阴极发光、微量元素含量和 U-Pb 同位素定年在自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室完成(中国地质调查局西安地质调查中心)。阴极发光选用 JEOL JSM-6510A 型扫描电镜上配置的 Chromal CL 2 阴极发光探头,分析条件为:加速电压 10 kV,束流 SS65,工作距离 14 mm。锆石微量元素含量和 U-Pb 同位素定年激光剥蚀系统为 GeoLas Pro,ICP-MS 为 Agilent 7700x。激光剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度,二者在进入 ICP 之前通过一个 T 型接头混合。每个时间分辨分析数据包括大约 10 s 的空白信号和 40 s 的样品信号。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U—Th—Pb 同位素比值和年龄计算)采用软件 Glitter 4.4 (Van Achterbergh et al., 2001)完成,详

细仪器参数和测试过程可参考李艳广等(2015)。U-Pb 同位素定年中采用锆石标准 91500 作外标进行同位素分馏校正。对于与分析时间有关的 U—Th—Pb 同位素比值漂移,利用 91500 的变化采用线性内插的方式进行了校正。锆石样品的 U-Pb 年龄谐和图绘制和年龄权重平均计算均采用 Isoplot/Exver3(Ludwig, 2003)完成。锆石微量元素含量利用参考标样 NIST610 玻璃作为多外标、Si 作内标的方法进行定量计算。NIST610 玻璃中元素含量的推荐值据 GeoReM 数据库 ([http://georem. mpch - mainz. gwdg. de/](http://georem.mpch-mainz.gwdg.de/))。

主量、微量和稀土元素分析测试均在自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室完成(中国地质调查局西安地质调查中心)。主量元素采用 SX45 型荧光光谱分析(XRF)进行分析,其中 FeO 含量通过湿化学方法测定,使用的仪器是荷兰帕纳科公司 AxiosmAX 波长色散 X 射线荧光光谱仪,相对标准偏差值(RSD)≤0.134,均方根稳定性(RMS Rel)(%)≤0.050。稀土和微量元素分析采用美国 Thermo Fisher 公司生产的 X-SeriesII 型电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)测定,检测限优于 5×10⁻⁹,相对标准偏差优于 5%。

3 岩石地球化学

3.1 主量元素

巴斯克花岗闪长岩 10 件样品主量元素和微量元素分析结果见表 1(样品 BSK01~BSK05 采样位置 N45°43′35.12″、E89°41′52.01″,样品 BSK06~BSK10 采样位置 N45°43′51.53″、E89°42′7.60″,图 1)。花岗闪长岩样品 SiO₂ 变化范围 65.7%~68.6%,平均为 67.112%。全碱(K₂O+Na₂O)变化范围 6.94%~7.98%,平均为 7.457%。Na₂O/K₂O 变化范围 1.34~1.88,平均为 1.58。Al₂O₃ 变化范围为 14.78%~15.50%,平均为 15.11%。铝饱和指

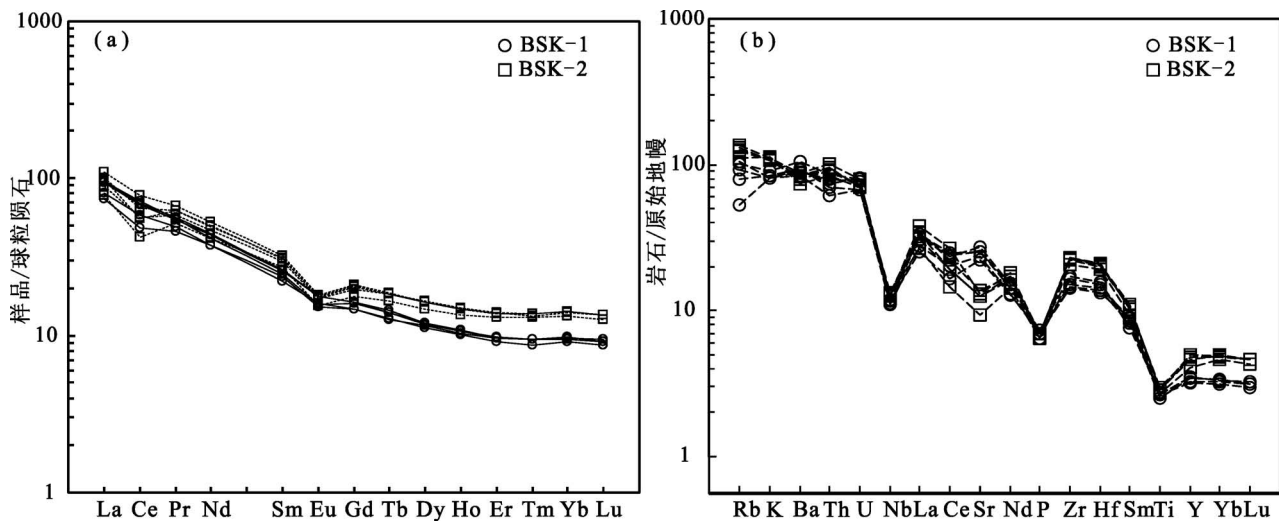


图 4 东准噶尔巴斯克花岗闪长岩稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(a) (据 Sun et al. , 1989) 和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b) (据 Sun et al. , 1989)

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns (a) (after Sun et al. , 1989) and primitive mantle-normalized trace element spider diagrams (b) (after Sun et al. , 1989) for Basike granodiorite in east Junggar

数(A/CNK)变化范围为 0.93~1.03, 平均为 0.96。 A/NK 变化范围为 1.33~1.54, 平均为 1.43。样品里特曼指数 σ 变化范围 2.04~2.53, 平均为 2.28, 属钙碱性系列。在侵入岩 TAS 图解中, 样品点均落

入花岗闪长岩范围内(图 3a), 在 K_2O-SiO_2 (图 3b) 和 SiO_2-AR 图解(图 3c) 中, 样品投点均落入钙碱性花岗岩的范围内, $A/NK-A/CNK$ 图解显示花岗闪长岩为准铝质至弱过铝质(图 3d)。

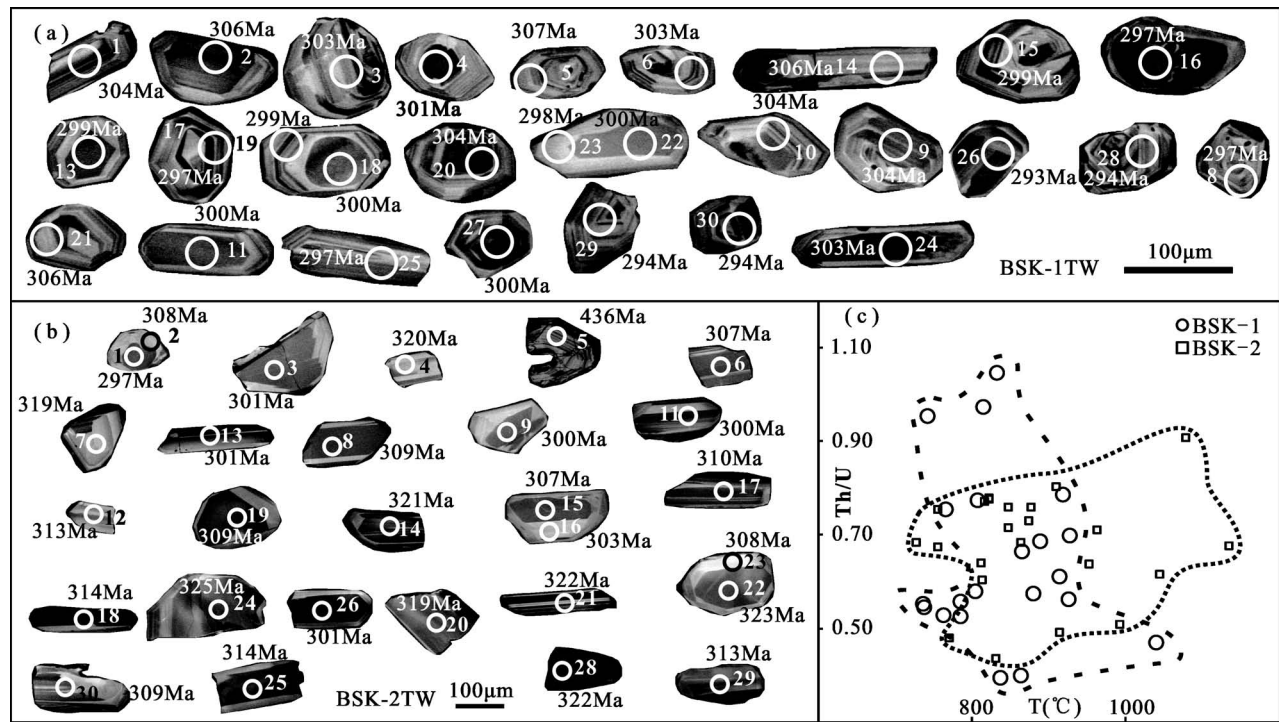


图 5 东准噶尔巴斯克花岗闪长岩锆石阴极发光图像(a)、(b), 锆石(Ti) 温度—Th/U 图解(c)

Fig. 5 CL images (a), (b) , zircon(Ti) temperature —Th/U diagram (c) of the zircons from the Basike granodiorite in east Junggar

表 2 东准噶尔巴斯克花岗岩闪长岩锆石 LA-ICPMS U-Pb 分析结果
Table 2 LA-ICP-MS U-Pb dating data of the zircons from Basike granodiorite in eastern Jungar

测点号	元素含量 ($\times 10^{-6}$)		$t(x, \text{Ti})$	同位素比值						同位素年龄 (Ma)						谐和度 (%)		
	Th	U		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$						
				测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ			
花岗岩闪长岩, BSK-1TW 年龄样品采自岩株南部边缘, 采样位置 N45°43'35.12", E89°41'52.01"																		
1	96	99	0.97	815.92	0.0503	0.00449	0.3347	0.02931	0.04835	0.00104	208.6	194.68	293.1	22.3	304.4	6.41	96	
2	90	129	0.7	927.60	0.05185	0.00347	0.34645	0.02279	0.04855	0.00087	278.8	146.32	302.0	17.19	305.6	5.36	99	
3	149	142	1.04	834.19	0.05282	0.00346	0.34965	0.02243	0.0481	0.00088	320.9	141.5	304.5	16.87	302.8	5.38	101	
4	111	123	0.9	—	0.05355	0.0071	0.35289	0.04574	0.04788	0.00152	352.2	274.83	306.9	34.33	301.5	9.33	102	
5	54	94	0.58	804.99	0.05224	0.00406	0.35077	0.02674	0.04879	0.00098	295.9	167.55	305.3	20.1	307.1	6.01	99	
6	51	97	0.52	785.87	0.05313	0.00519	0.35156	0.03358	0.04808	0.00116	334.4	206.64	305.9	25.23	302.7	7.14	101	
8	54	94	0.57	881.27	0.05297	0.00461	0.34372	0.02941	0.04715	0.00098	327.3	186.16	300.0	22.23	297.0	6.03	101	
9	85	111	0.77	808.61	0.05308	0.00425	0.35258	0.02766	0.04826	0.00098	332.3	171.46	306.7	20.77	303.8	6.0	101	
10	48	91	0.53	764.10	0.05294	0.00437	0.35222	0.02852	0.04834	0.00101	326.3	176.91	306.4	21.42	304.3	6.19	101	
11	236	248	0.95	742.73	0.05289	0.00325	0.34647	0.02085	0.0476	0.00083	324.1	133.39	302.1	15.72	299.8	5.12	101	
13	95	121	0.78	918.88	0.05113	0.00458	0.33435	0.02933	0.04752	0.00105	246.6	193.66	292.9	22.32	299.3	6.43	98	
14	36	67	0.54	—	0.05142	0.01029	0.34367	0.06735	0.04856	0.00214	259.9	404.4	299.9	50.9	305.7	13.13	98	
15	39	72	0.54	738.97	0.05161	0.00627	0.34694	0.0414	0.04884	0.00128	268.4	256.67	302.4	31.21	307.4	7.89	98	
16	163	268	0.61	915.25	0.05225	0.00464	0.33883	0.02942	0.04712	0.00107	296.3	190.24	296.3	22.32	296.8	6.56	100	
17	72	135	0.53	—	0.05211	0.00642	0.33841	0.04075	0.04718	0.00139	290.3	259.39	296.0	30.91	297.2	8.58	100	
18	51	91	0.56	926.12	0.05265	0.00636	0.34517	0.04089	0.04763	0.00129	313.7	253.68	301.1	30.86	300.0	7.97	100	
19	22	45	0.48	—	0.0518	0.0135	0.33877	0.08661	0.04751	0.00256	276.7	507.37	296.2	65.69	299.2	15.74	99	
20	70	178	0.39	838.55	0.05209	0.0035	0.34601	0.02281	0.04826	0.00086	289.5	146.29	301.7	17.21	303.8	5.26	99	
21	25	59	0.42	—	0.05172	0.00874	0.34598	0.0575	0.0486	0.00168	273.0	347.22	301.7	43.38	305.9	10.31	99	
22	35	53	0.66	866.64	0.05237	0.00724	0.34284	0.04647	0.04756	0.00147	301.4	287.99	299.3	35.14	299.6	9.06	100	
23	16	29	0.55	736.62	0.05271	0.01212	0.34296	0.07791	0.04727	0.00183	316.2	452.48	299.4	58.9	297.7	11.25	101	
24	353	314	1.12	—	0.05231	0.003	0.34623	0.01942	0.04808	0.0008	299.1	125.4	301.9	14.65	302.7	4.93	100	
25	59	86	0.68	889.86	0.05184	0.00588	0.33655	0.03755	0.04716	0.00112	278.5	240.41	294.6	28.53	297.0	6.92	99	
26	69	125	0.56	786.09	0.05229	0.00542	0.3347	0.03399	0.0465	0.00115	298.0	220.5	293.1	25.86	293.0	7.07	100	
27	200	266	0.75	766.49	0.05178	0.00324	0.33953	0.0208	0.04763	0.00083	275.6	137.19	296.8	15.77	300	5.08	99	
28	67	133	0.5	—	0.05284	0.00869	0.33928	0.05466	0.04664	0.00172	321.7	336.12	296.6	41.44	293.9	10.57	101	
29	39	98	0.4	864.26	0.05214	0.00865	0.33558	0.05445	0.04674	0.00174	291.7	340.06	293.8	41.4	294.5	10.72	100	
30	61	130	0.47	1041.38	0.05241	0.00634	0.3371	0.03991	0.04672	0.00132	303.4	254.54	295.0	30.31	294.3	8.16	100	

测点号	元素含量 ($\times 10^{-6}$)		$\frac{w(^{232}\text{Th})}{w(^{238}\text{U})}$	$t(\text{zr, Ti})$	同位素比值						同位素年龄 (Ma)						谐和度 (%)	
	$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$				$n(^{206}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$			$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$			$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$			$n(^{207}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$				
	测值	1 σ			测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ		
花岗岩闪长岩,样品 BSK-2TW, 样品采自岩株中部偏东位置, N45°43'51.53", E89°42'7.60"																		
1	40	52	0.78	821.49	0.05185	0.00612	0.33681	0.03907	0.04712	0.00119	278.9	249.43	294.8	29.67	296.8	7.34	99	
2	54	59	0.91	-	0.05129	0.01555	0.3461	0.10295	0.04895	0.00304	253.7	578.83	301.8	77.66	308.1	18.65	98	
3	41	51	0.8	909.10	0.05312	0.00818	0.35021	0.05298	0.04783	0.00153	333.7	315.85	304.9	39.84	301.2	9.39	101	
4	35	52	0.67	754.34	0.05225	0.00928	0.36649	0.06392	0.05088	0.00187	296.3	361.36	317.0	47.49	319.9	11.45	99	
6	54	70	0.77	816.01	0.05303	0.00609	0.35646	0.04014	0.04875	0.00126	330.2	241.36	309.6	30.05	306.8	7.77	101	
7	20	37	0.54	-	0.05275	0.01512	0.36937	0.10384	0.05078	0.00302	318.2	546.49	319.2	76.99	319.3	18.55	100	
8	49	65	0.75	754.34	0.05187	0.00541	0.35133	0.03599	0.04912	0.00117	279.6	222.22	305.7	27.04	309.1	7.19	99	
9	52	60	0.86	-	0.05172	0.01252	0.33918	0.0803	0.04756	0.00259	272.9	476.66	296.6	60.88	299.5	15.94	99	
11	41	60	0.68	862.87	0.05166	0.01186	0.33953	0.07683	0.04766	0.00202	270.2	455.4	296.8	58.24	300.2	12.42	99	
12	25	41	0.6	812.22	0.05265	0.00857	0.36073	0.05756	0.04968	0.00176	313.8	333.15	312.8	42.95	312.6	10.79	100	
13	54	84	0.64	811.03	0.05169	0.00548	0.34041	0.03538	0.04775	0.00119	271.8	225.8	297.5	26.8	300.7	7.32	99	
14	56	73	0.76	846.39	0.05195	0.00801	0.36634	0.05545	0.05113	0.00171	283.3	319.02	316.9	41.2	321.5	10.47	99	
15	53	73	0.73	873.01	0.05381	0.00746	0.36148	0.04924	0.04872	0.00147	362.8	285.95	313.3	36.72	306.7	9.01	102	
16	16	33	0.48	769.47	0.05298	0.01062	0.35211	0.06969	0.04819	0.0017	328.0	400.46	306.3	52.33	303.4	10.48	101	
17	49	71	0.68	727.07	0.05331	0.00677	0.36225	0.04524	0.04928	0.00135	341.8	264.64	313.9	33.72	310.1	8.31	101	
18	93	119	0.78	821.15	0.05346	0.00401	0.36827	0.02715	0.04995	0.00097	348.5	161.08	318.4	20.15	314.2	5.96	101	
19	42	59	0.72	847.38	0.05232	0.00704	0.35455	0.04708	0.04915	0.00127	299.3	280.88	308.1	35.29	309.3	7.82	100	
20	65	85	0.76	876.99	0.05323	0.01262	0.37281	0.08637	0.0508	0.00277	338.4	463.19	321.7	63.88	319.5	17	101	
21	171	188	0.91	1077.33	0.0522	0.00393	0.36864	0.02725	0.05123	0.00103	294.1	163.11	318.6	20.21	322.1	6.3	99	
22	44	56	0.79	-	0.05163	0.00793	0.3657	0.05508	0.05138	0.00176	269.1	318.65	316.5	40.95	323.0	10.77	98	
23	20	42	0.49	914.02	0.05186	0.01172	0.3494	0.0773	0.04888	0.00245	279.1	448.53	304.3	58.16	307.6	15.03	99	
24	37	57	0.64	951.70	0.05142	0.0083	0.36628	0.05792	0.05167	0.00188	259.9	333.88	316.9	43.04	324.8	11.52	98	
25	57	93	0.61	1043.71	0.05254	0.00649	0.36087	0.04368	0.04984	0.00143	308.8	259.17	312.9	32.59	313.5	8.79	100	
26	62	142	0.44	830.88	0.0531	0.01665	0.34949	0.10756	0.04776	0.00306	333.1	588.06	304.3	80.93	300.7	18.83	101	
28	111	164	0.68	1134.37	0.05152	0.00798	0.36312	0.05501	0.05115	0.00185	264.0	321.28	314.5	40.98	321.6	11.36	98	
29	31	62	0.51	991.62	0.05302	0.00942	0.36395	0.06349	0.04982	0.00187	329.6	359.56	315.2	47.26	313.4	11.46	101	
30	40	56	0.71	962.26	0.05255	0.01208	0.35533	0.07993	0.04908	0.00251	309.4	452.9	308.7	59.88	308.9	15.42	100	
5	28	75	0.37	-	0.05554	0.00472	0.53526	0.04457	0.0699	0.00152	433.9	179.32	435.3	29.48	435.5	9.17	100	

3.2 稀土及微量元素

花岗闪长岩样品的稀土元素总量 (ΣREE) 变化于 $(83.79 \times 10^{-6} \sim 125.67 \times 10^{-6})$ 之间, LREE/HREE 变化范围为 $5.32 \sim 8.63$, 平均为 7.1 。 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 变化范围为 $5.78 \sim 10.14$, 平均为 8.027 。在球粒陨石标准化稀土配分图(图 4a)中,样品稀土配分曲线近乎一致,均显示右倾特征,说明轻稀土较重稀土相对富集。岩石样品均具有轻微 Eu 负异常 ($\delta\text{Eu} = 0.69 \sim 0.89$), 平均值为 0.75 , 指示有少量斜长石的结晶分异析出 (Henderson, 1982)。

在原始地幔标准化的微量元素蛛网图上 (图 4b), 样品均具有相似的配分曲线模式, 富集大离子亲石元素 (LILE, 如 K、Rb、Ba) 和轻稀土元素 (LREE), 而亏损高场强元素 (HFSE, 如 Nb、Ta 和 Ti) 及 P, Nb、Ta 负异常明显。

4 锆石 U-Pb 年代学

本次研究在岩株内采集两个年龄样品岩性均为似斑状花岗闪长岩, 锆石 U-Pb 测试结果见表 2。BSK-1TW 年龄样品采自岩株南部边缘, 样品经纬度 $\text{N}45^{\circ}43'35.12''$ 、 $\text{E}89^{\circ}41'52.01''$ (图 1a)。样品锆石形态上多呈以长柱状和短板状, 大部分锆石具有典型的岩浆结晶的振荡环带结构 (图 5a)。锆石粒径大多介于 $60 \sim 110\mu\text{m}$, 长宽比 $1:1 \sim 5:1$ 。Th、U 质量分数分别为 $16 \times 10^{-6} \sim 353 \times 10^{-6}$ 和 $29 \times 10^{-6} \sim 314 \times 10^{-6}$, Th/U 比值变化于 $0.39 \sim 1.12$, 平均为 0.65 。除了一个测点外, 剩余 27 个测点 Th/U 均大于 0.4 , 属于岩浆结晶锆石 (Rubatto et al., 2000)。在锆石 U-Pb 年龄谐和曲线图中, 28 个分析点均位于 U-Pb 谐和线上或其附近的一个很小的区域内 (图 6a), 表

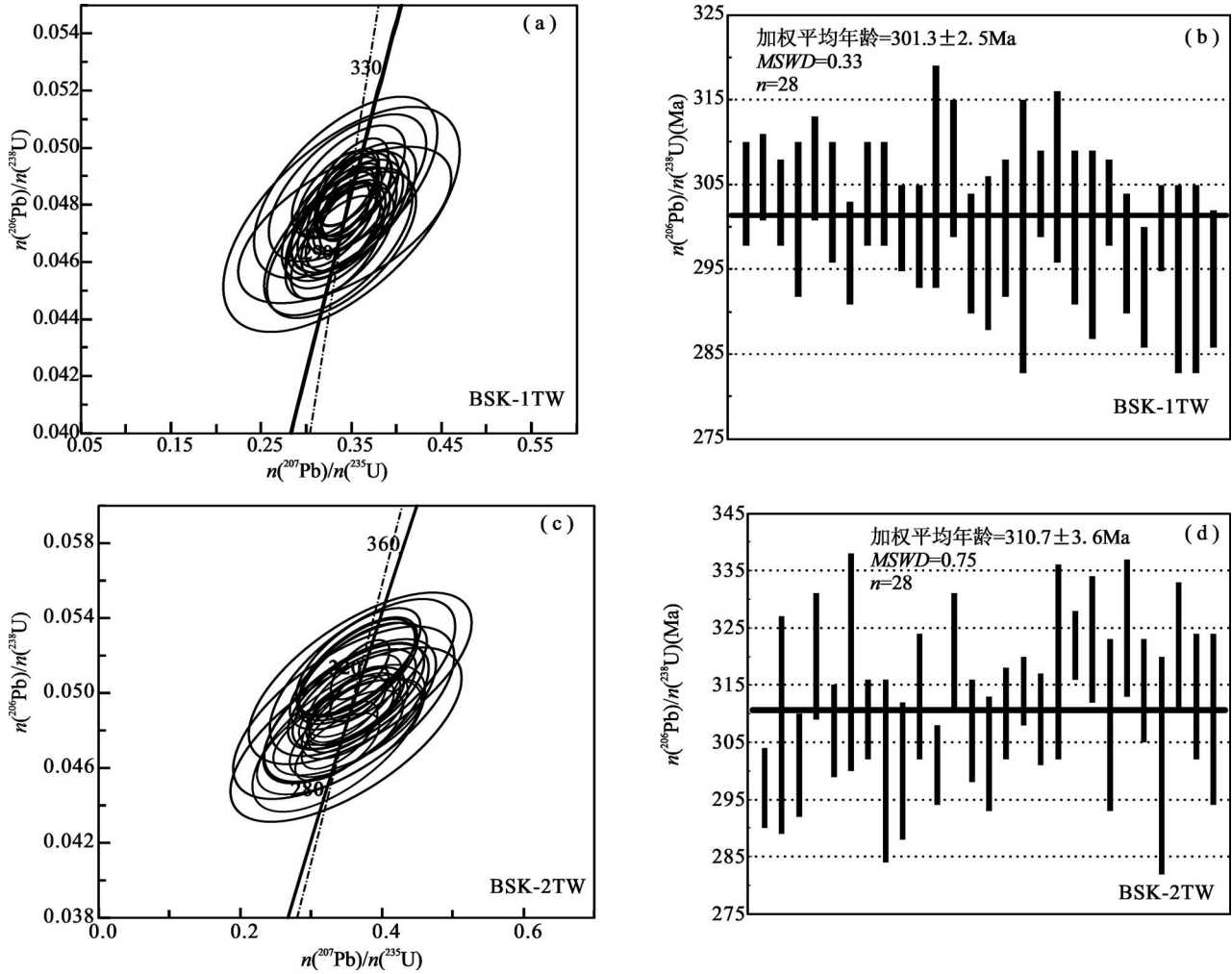


图 6 东准噶尔巴斯克花岗闪长岩锆石 U-Pb 年龄谐和图和加权平均年龄:BSK-1TW(a)、(b),BSK-2TW(c)、(d)

Fig. 6 U-Pb concordia diagrams and weighted mean $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age diagrams of the zircons from Basike granodiorite in east Junggar: the BSK-1TW(a), (b); the BSK-2TW(c), (d)

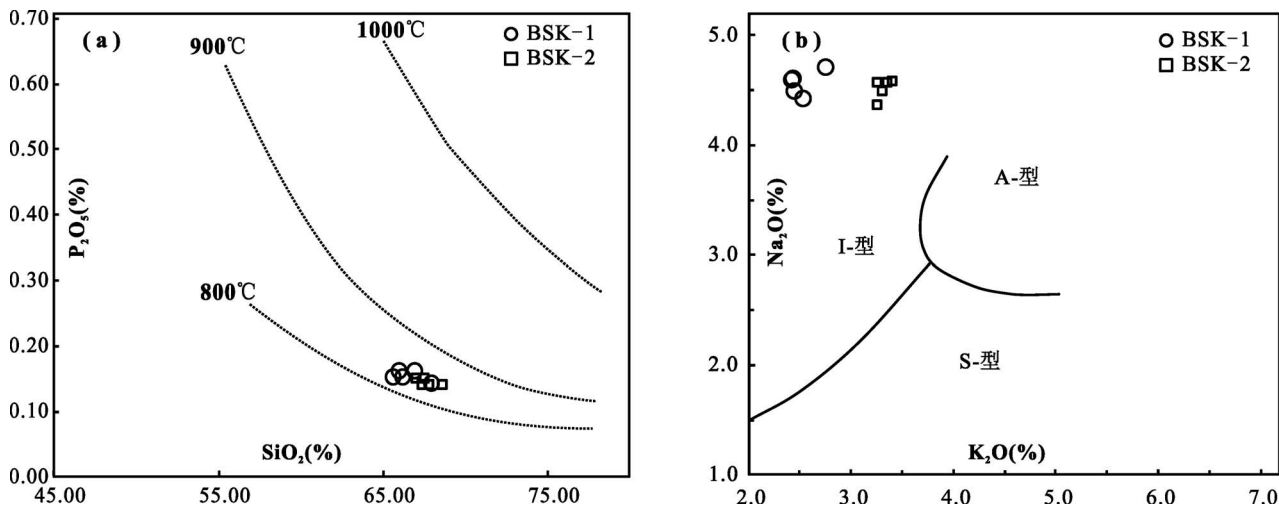


图 7 东准噶尔巴斯克花岗闪长岩株 $\text{SiO}_2\text{—P}_2\text{O}_5$ (a) (底图据 Green. ,1995)、 $\text{SiO}_2\text{—Na}_2\text{O}$ (b) (底图据 Collins et al. ,1982)图解

Fig. 7 The diagrams of SiO_2 vs P_2O_5 (a) (after Green. , 1995) and SiO_2 vs Na_2O (b) (after Collins et al. ,1982) of the Basike granodiorite in east Junggar

面年龄变化范围为 293 ~ 307 Ma (图 6b), 其²⁰⁶U/²³⁸Pb 加权平均年龄为 301.3 ± 2.5 Ma (MSWD=0.33)。

BSK-2TW 样品采自岩株中部偏东位置,样品经纬度 N45°43'51.53"、E89°42'7.60"(图 1a)。该样品锆石形态上多呈以长柱状,大部分锆石具有典型的

岩浆结晶的振荡环带结构(图 5b)。锆石粒径大多介于 90~320μm,长宽比 1:1~3:1。Th、U 质量分数分别为 $16\times10^{-6}\sim171\times10^{-6}$ 和 $33\times10^{-6}\sim188\times10^{-6}$, Th/U 比值变化于 0.37~0.91,平均为 0.68。除了一个测点外,剩余 27 个测点 Th/U 均大于 0.4,属于岩浆结晶锆石(Rubatto et al. , 2000)。在锆石 U-Pb

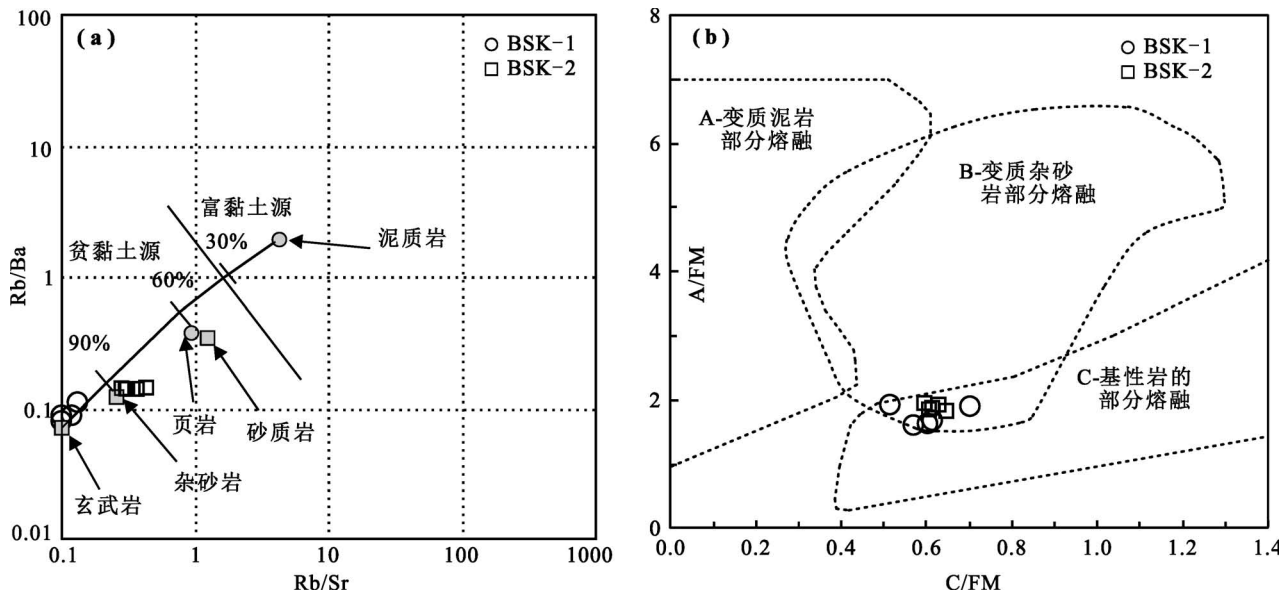


图 8 东准噶尔巴斯克花岗闪长岩 Rb/Sr—Rb/Ba(a) (底图据 Sylvester et al. ,1998)和 A/FM—C/FM 图(b) (底图据 Alther et al. ,2000)

Fig. 8 The diagram showing Rb/Sr—Rb/Ba(a) (after Sylvester et al. ,1998) and A/FM—C/FM (b) (after Alther et al. ,2000) of Basike granodiorite in east Junggar

年龄谐和曲线图中,27 个分析点均位于 U-Pb 谐和线上或其附近的一个很小的区域内(图 6c),表面年龄变化范围为 297~325 Ma(图 6d),其²⁰⁶U/²³⁸Pb 加权平均年龄为 310.7±3.6 Ma (*MSWD* = 0.75)。此外,在该样品中见有一颗²⁰⁶U/²³⁸Pb 年龄为 436 Ma 的锆石(图 5b),根据锆石 CL 图像观察锆石形态、磨圆及碎裂程度等特征,可判断其为捕获锆石。

5 讨论

5.1 岩石类型与岩浆源区

综合矿物组成和地球化学特征,花岗岩成因类型可分为 S 型、I 型、A 型和 M 型 4 种。矿物学约束而言,岩石样品中含 I 型花岗岩特征性矿物原生角闪石 (Miller, 1985; 邓晋福等, 2015b); 地球化学特征表明花岗闪长岩属钙碱性岩石,铝饱和指数 (*A/CNK*) 平均值为 0.96,轻稀土富集, (*La/Yb*)_N 平均值为 8.03,同时具有负铈异常 (*δEu* 平均值 0.75),富集 Th、U、Rb 等大离子亲石元素 (LILE),而亏损 Nb、Ta、Ti 和 P 高场强元素 (HFSE),具有 I 型花岗岩的特征 (周建厚等, 2015)。样品在 SiO₂—P₂O₅ 图解显示 P₂O₅ 与 SiO₂ 呈负相关 (图 7a),与 I 型花岗岩呈现出一致性 (Wolf et al., 1994)。并且,岩石样品的 P₂O₅ 含量在 0.14%~0.16% 之间,而典型 S 型花岗岩中常具有较高的 P₂O₅ 含量 (> 0.20%) (Chappell, 1999)。与此同时,样品的 *A/CNK* 值介于 0.93~1.03 之间,与典型的 S 型花岗岩中较高的 *A/CNK* 值 (>1.1) 不同 (Chappell et al., 1992)。因此,巴斯克花岗闪长岩属于钙碱性、准

铝—弱过铝质 I 型花岗岩。
样品 Nb/Ta 值 (11.30~12.68) 与大陆地壳 Nb/Ta 比值范围 (11~14, Taylor and MacLennan, 1985; Rudnick et al., 2000) 相近。但 Rudnick et al (2000) 认为在一定条件下,大陆地壳和亏损地幔均可能含有相近的 Nb/Ta、Nb/La 和 Ti/Zr 比值。并且,样品

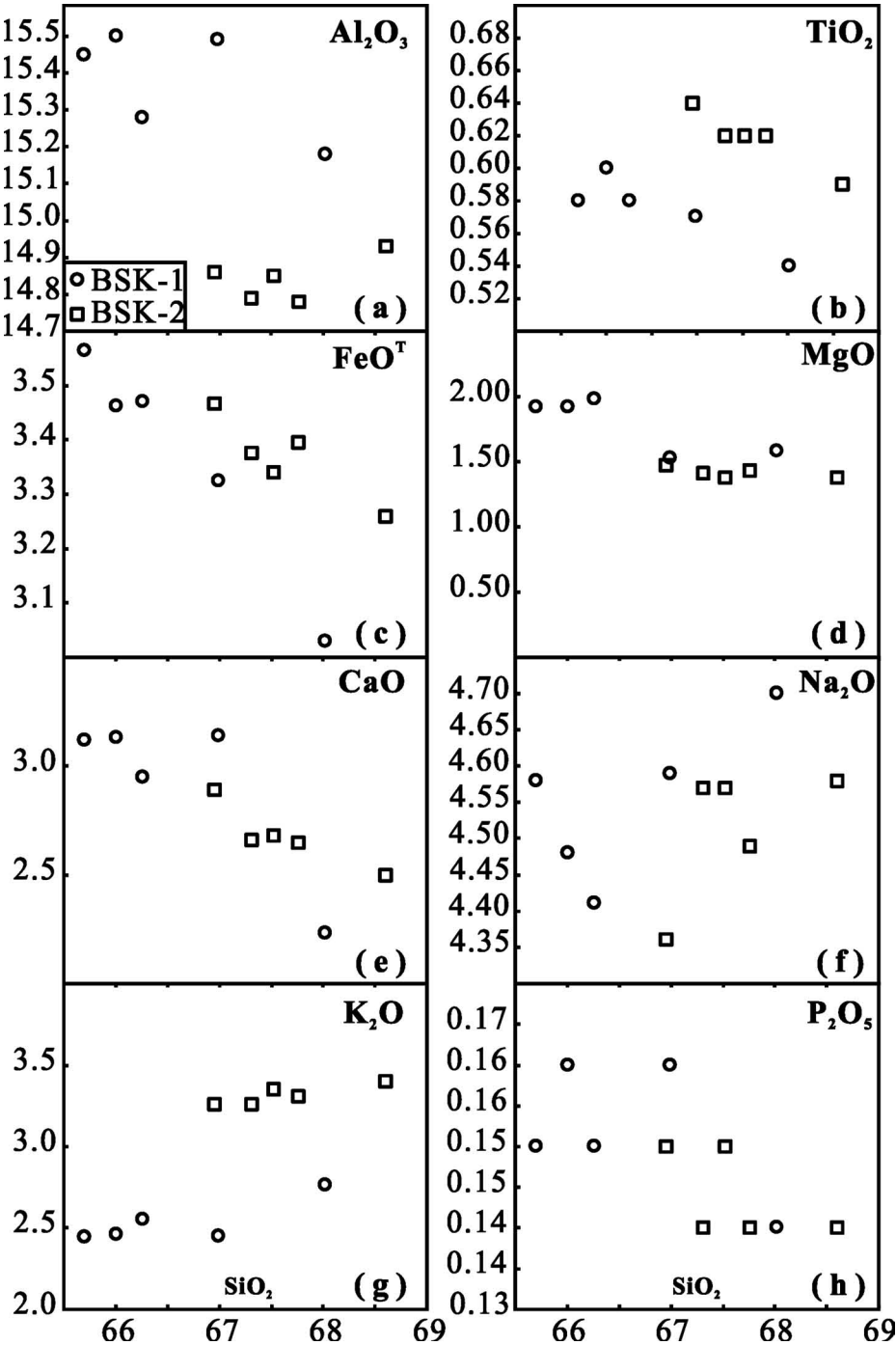


图 9 东准噶尔巴斯克花岗闪长岩 BSK-1 与 BSK-2 主量元素哈克图解

Fig. 9 Hacker plots of major elements for BSK-1 and BSK-2 from Basike granodiorite in east Junggar

Zr/Hf 值 38.01~40.63 (平均 39.59) 高于幔源比值 36.30 和壳源比值 33.00 (Hofmann, 1988; Green, 1995); Rb/Sr 值 (平均 0.21) 略低于地球上地壳的平均值 0.32 (Taylor et al., 1995); Rb/Nb 值 (平均 7.75) 也低于地球上地壳的平均值 9.33 (McLennan, 2001), 且同时远高于大洋岩石圈和陆幔 (黎彤, 2011)。上述微量元素的相关比值特征, 说明花岗闪长岩的岩浆与典型的幔源岩浆和壳源岩浆均具有一定的差异性。

与此同时, 样品的 $Mg^\#$ 指数 41.41~50.42, 平均值为 45.54, 大于地壳部分熔融的熔体形成的岩石的 $Mg^\#$ 值 (40), 表明岩浆熔融过程中有地幔源物质参与 (Rapp et al., 1995。CaO/Na₂O 值 0.47~0.70, 大于 0.3 暗示源区含有砂岩 (Sylvester, 1989), Rb/Ba—Rb/Sr 和 A/MF—C/MF 图解 (图 8a, b) 也显示出源区为基性岩和变砂岩的混溶特征。Chappell (1988) 认为地壳深部中基性变火成岩是 I 型花岗岩的源岩, 但受幔源岩浆改造的沉积物重熔同样可以形成 I 型花岗岩 (Kemp et al., 2007)。与此同时,

Collins et al (2008) 认为在地壳重熔过程中沉积物成分的减少和火成岩等成分所占比重增大, 同样可以使岩浆成分由 S 型向 I 型转变, 形成 I 型或者 S—I 过渡类型岩浆。而且, 我们针对岩石中具有环带结构的斜长石进行电子探针测试, 结果显示斜长石中 CaO 的含量从核部到边部具有先降低—突然升高—再降低的特征 (另文发表), 明显不同于正常岩浆演化所显示的正环带, 也暗示不同岩浆的混融作用。因此, 巴斯克花岗闪长岩岩浆在形成过程中存在壳幔岩浆混合作用。

5.2 生长机制

已如前述, 本次所采两个年龄样品岩性虽均为似斑状花岗闪长岩, 但年龄锆石 U-Pb 定年相差约 9 Ma。为探究其年龄差别的原因, 笔者等将两采样点附近的地球化学特征进行对比发现, 样品的主量元素随着 SiO₂ 含量的增加, 演化趋势不同 (图 9)。而且, 两组样品中稀土元素球粒陨石标准化配分模式图不尽相同, 特别是重稀土含量显示高、低分组的特征 (图 4a)。同时, 两年龄样品中锆石粒径大小及长

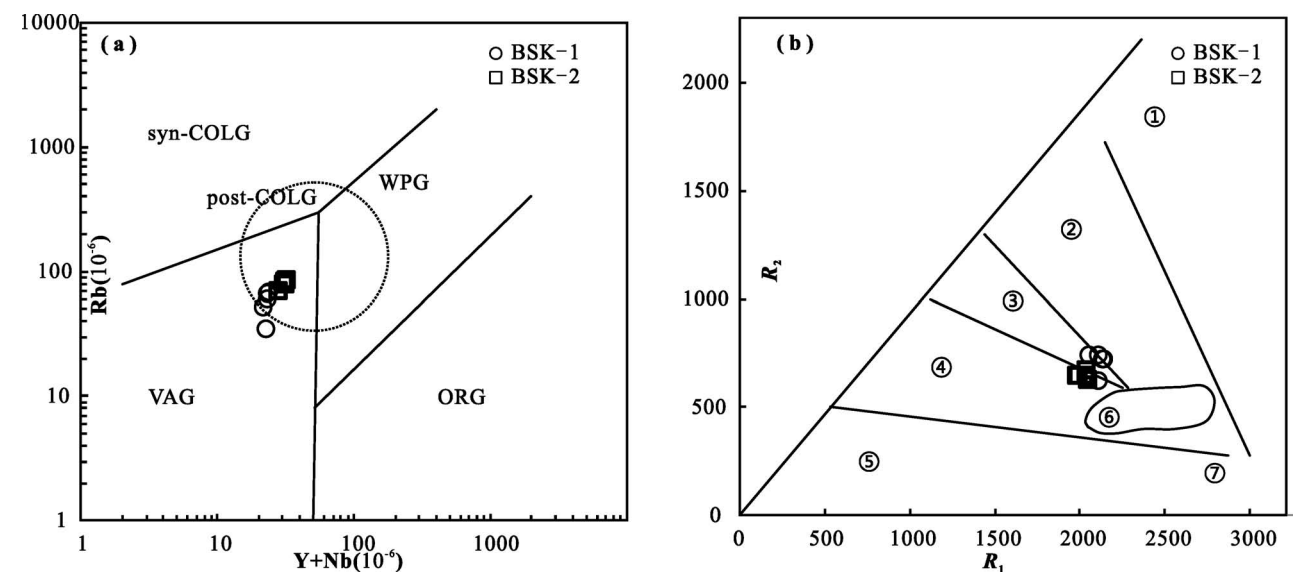


图 10 东准噶尔巴斯克花岗闪长岩构造背景图解(a) (底图据 Pearce et al., 1984) 和 R_1 — R_2 图解(b) 底图据 Batchelor et al., 1985)

Fig. 10 The tectonic environment diagrams (a) (after Pearce et al., 1984) and R_1 — R_2 diagram (b) (after Batchelor et al., 1985) of the Basike granodiorite in east Junggar

$R_1 = 4nSi - 11[n(Na) + n(K)] - 2[n(Fe) + n(Ti)]$; $R_2 = 6n(Ca) + 2n(Mg) + n(Al)$
ORG—洋脊花岗岩; VAG—火山弧花岗岩; WPG—板内花岗岩; syn-COLG—同碰撞花岗岩; post-COLG—后碰撞花岗岩; ① 地幔斜长花岗岩; ② 破坏性活动板块边缘 (板块碰撞前) 花岗岩; ③ 板块碰撞后隆起期花岗岩; ④ 晚造山期花岗岩; ⑤ 非造山区 A 型花岗岩; ⑥ 同碰撞 (S 型) 花岗岩; ⑦ 造山期后 A 型花岗岩
ORG— Ocean-ridge granite; VAG— volcanic-arc granite; WPG— intraplate granite; syn-COLG— syn-collision granite; Post-COLG— post-collision granite; ① mantle fractionates; ② pre-plate collision; ③ post-collision uplift; ④ late-orogenic; ⑤ anorogenic; ⑥ syn-collision; ⑦ post-orogenic

宽比显著不同(图 5a,b),锆石中 Th、U 元素含量也有较大差别(表 2)。此外,两组样品全岩 Zr 温度(据 Boehnke et al., 2013)和锆石(Ti)温度(据 Ferry and Watson, 2007)计算结果(表 1)显示 BSK-1 采样点的全岩(Zr)平均温度为 852.2℃,而 BSK-2 采样点获得的全岩(Zr)平均温度则为 886.5℃,两者相差约 35 度℃;样品 BSK-1 和 BSK-2 的锆石(Ti)温度分别为 840.7℃(表 2)和 878.6℃(表 2),仍相差约 38℃。而且,样品中锆石(Ti)温度和锆石中 Th/U 比值图解(图 5c)显示两者经历了不一致的温度趋势,上述特征均暗示两者经历不同的地质演化过程。因此,结合巴斯克花岗闪长岩锆石 U-Pb 年龄结果,该岩株具有岩浆分批熔融、增量生长的特征。

相关研究结果表明,多数岩体均具有分批次岩浆上升,从而引起岩体增量生长的特征。例如,贝勒库都克黑云母正长花岗岩中 10 颗锆石 U-Pb 得出年龄范围为 263~304 Ma,且年龄差最大可达 41 Ma

(杨高学, 2008)。与此同时,其他区域也有相似的岩浆分批增量生长研究实例,如内蒙古南部任家营子岩体(Li Shan et al., 2013),西秦岭美武岩体(Luo Biji et al., 2015)和南秦岭东江口岩体(Li Yang et al., 2019)、高桥岩体(Tao Wei et al., 2021)、华阳岩体(Hu Fangyang et al., 2018)等。巴斯克花岗闪长岩年龄特征也表明该区晚石炭世构造岩浆活动持续了一个时期。

5.3 构造意义

不同构造单元也分布着不同的火成岩(邓晋福等, 2015a),且花岗岩主、微量元素组成能够在一定程度上反映岩浆岩形成时的大地构造环境。本次样品地球化学特征显示其 I 型花岗岩类,而该类可以形成于板块俯冲阶段或后碰撞阶段(Pitcher et al., 1987; 韩宝福, 2007; 周建厚等, 2015)。而岩石样品见有暗色矿物角闪石,且地球化学结果显示 SiO₂ 含量小于 70%,Na₂O/K₂O 大于 1,弱的负锆异常

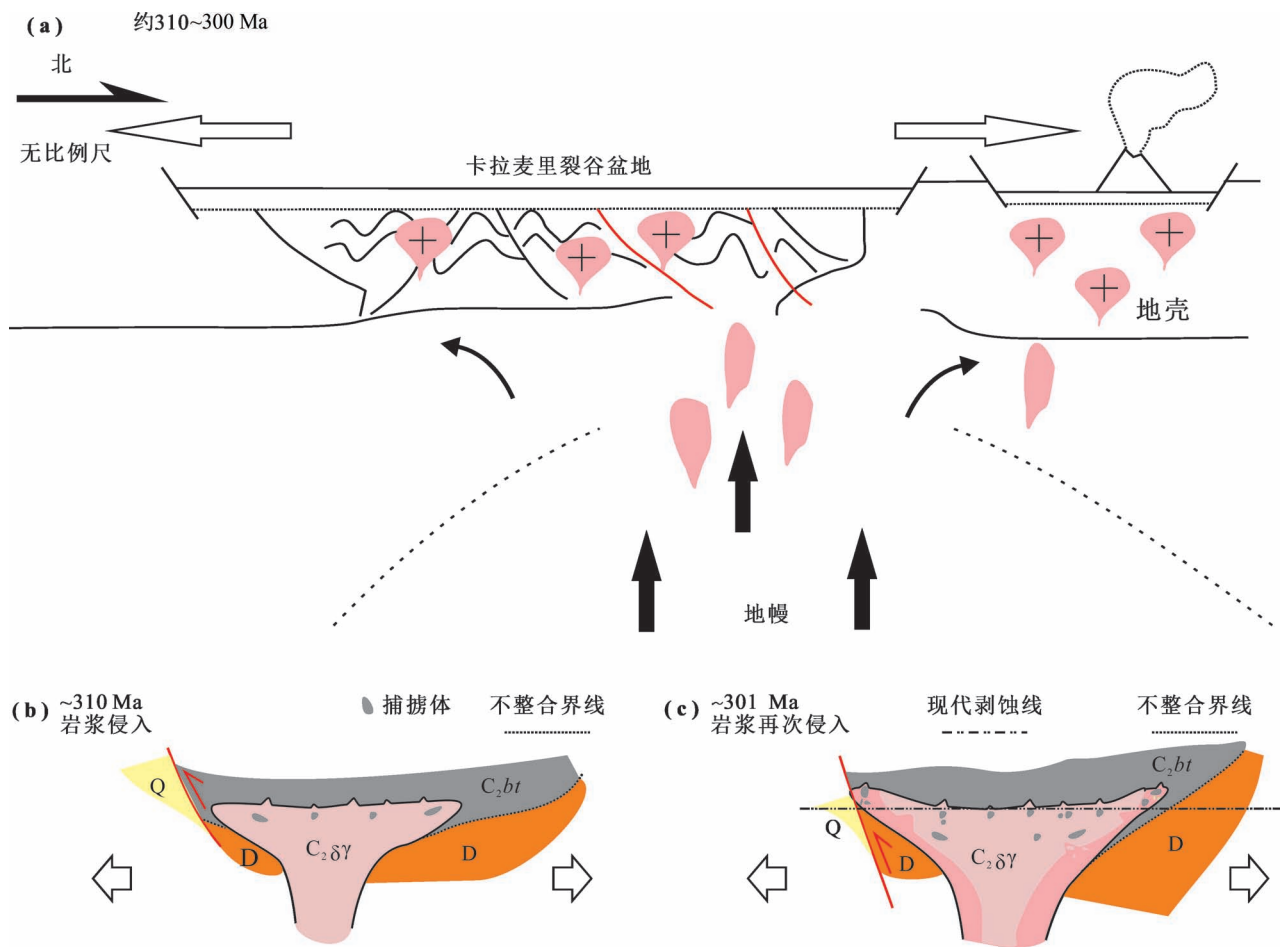


图 11 东准噶尔地区晚石炭世构造重建(a)及岩株两阶段侵位(b、c)示意图
Fig. 11 Sketch diagrams for the Late Carboniferous tectonic reconstruction(a) and magma two-phase intrusive process of stock(b,c) in the Basike area

(δEu 平均值 0.75) 及不同程度的亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti、P, 这些特点与碰撞晚期或后碰撞岩浆岩特点相一致 (Harris et al., 1986; Liegeois et al., 1998)。同时, 样品在 Rb—Y+Nb 图解 (图 10a) 中主体落入后碰撞花岗岩范围内, 在 R_1 — R_2 图解 (图 10b) 中样品落入板块碰撞后隆起期或造山晚期花岗岩范围, 表明其产出背景应为造山碰撞后阶段。

在利用地球化学图解的同时, 一定要结合岩石构造组合及其时空演化等多方面地质证据 (邓晋福等, 2015b)。上述结论也得到本项目在该地区获得的地质证据支持, 本研究的花岗闪长岩侵入最新围岩为晚石炭世巴塔马依内山组 (C_2bt)。该组在区内主要岩性为玄武岩、玄武质火山角砾岩、火山集块岩、深灰色杏仁状英安岩、玄武岩夹流纹岩等, 并以碱性玄武岩—粗面岩双峰式系列为特征, 表现出大陆裂谷性质 (大陆板内拉张区域) 的岩石特征^①。这一证据也表明侵入其中的花岗闪长岩 (310~301 Ma) 处于造山后伸展阶段。

综上所述, 东准地区野马泉岛弧在晚石炭世 (310~301 Ma) 处于碰撞后、幔源岩浆底侵作用下伸展构造背景。同时, 地幔底侵作用引起区域地温梯度升高, 下地壳部分熔融并混入部分地幔物质形成花岗质岩浆 (图 11a)。且由于该期构造—岩浆事件持续时间较长, 在上述构造体制下岩浆分批次熔融、岩株增量生长 (图 11b, c), 进而导致地壳发生垂向增生与再造。

6 结论

(1) 东准噶尔地区巴斯克花岗闪长岩为富钠、钙碱性、准铝—弱过铝质的 I 型花岗质岩石, 在岩浆形成过程中存在少量幔源物质的混入及壳幔岩浆混合作用。

(2) 巴斯克花岗闪长岩锆石 $^{206}\text{U}/^{238}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $301.3\pm2.5\text{ Ma}$ ($n=28$, $MSWD=0.33$) 至 $310.7\pm3.6\text{ Ma}$ ($n=27$, $MSWD=0.75$), 形成时代属于晚石炭世。

(3) 综合两组样品主微量元素特征、全岩 (Zr) 温度、锆石 (Ti) 温度及锆石 U-Pb 定年结果, 表明该岩株具有岩浆分批熔融、增量生长的特征。

(4) 野马泉岛弧地区在晚石炭世 (310~301 Ma) 处于后碰撞伸展构造体制, 软流圈上涌引起幔源岩浆底侵, 区域地温梯度升高, 导致该区地壳发生垂向增生与再造。

致谢: 野外工作得到黄岗高级工程师、宇峰工

程师的帮助; 参加野外工作的还有张雷、徐岩、梁博、姚文丰等同志; 成文得到侯广顺教授、秦江锋副教授、陈隽璐研究员的指导; 熊双才工程师等三位审稿专家和章雨旭研究员的宝贵意见和建议, 提高了本文质量; 笔者等在此致以衷心的感谢!

注 释 / Notes

- ① 中国地质调查局西安地质调查中心. 2019. 新疆东准噶尔别勒库都克幅幅区域地质矿产调查报告. 西安: 中国地质调查局西安地质调查中心.
- ② 陕西省地质矿产勘查开发局区域地质矿产研究院. 2012. 新疆 1: 25 万滴水泉幅、北塔山幅区域地质调查报告 (修测). 咸阳: 陕西省地质矿产勘查开发局区域地质矿产研究院.

参 考 文 献 / References

- (The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)
- 白建科, 陈隽璐, 唐卓, 张越. 2018. 新疆准噶尔古生代洋盆闭合时限——来自卡拉麦里地区石炭纪碎屑锆石 U-Pb 年代学的约束. 地质通报, 37(1): 26~38.
- 邓晋福, 冯艳芳, 狄永军, 刘翠, 肖庆辉, 苏尚国, 赵国春, 孟斐, 马帅, 姚图. 2015a. 岩浆弧火成岩构造组合与洋陆转换. 地质论评, 61(3): 473~484.
- 邓晋福, 刘翠, 冯艳芳, 肖庆辉, 狄永军, 苏尚国, 赵国春, 段培新, 戴蒙. 2015b. 关于火成岩常用图解的正确使用: 讨论与建议. 地质论评, 61(4): 717~734.
- 甘林, 唐红峰, 韩宇捷. 2010. 新疆东准噶尔野马泉花岗岩体的年龄和地球化学特征. 岩石学报, 26(8): 2374~2388.
- 韩宝福, 李建清, 宋彪, 陈立辉, 张磊. 2006. 新疆准噶尔晚古生代陆壳垂向生长 (I)——后碰撞深成岩浆活动的时限. 岩石学报, 22(5): 1077~1086.
- 韩宝福. 2007. 后碰撞花岗岩类的多样性及其构造环境判别的复杂性. 地学前缘, 14(3): 64~72.
- 胡万龙. 2016. 新疆东准噶尔老鸦泉晚石炭世花岗岩地球化学特征及地质意义. 导师: 王金荣. 兰州: 兰州大学硕士学位论文; 1~70.
- 黄岗, 牛广智, 王新录, 郭俊, 宇峰. 2012. 新疆东准噶尔卡拉麦里蛇绿岩的形成和侵位时限——来自辉绿岩和凝灰岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄的证据. 地质通报, 31(8): 1267~1278.
- 黎彬, 袁怀雨. 2011. 大洋岩石圈和大陆岩石圈的元素丰度. 地球化学, 40(1): 1~5.
- 李艳广, 汪双双, 刘民武, 孟恩, 魏小燕, 赵慧博, 靳梦琪. 2015. 斜锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年方法及应用. 地质学报, 89(12): 2400~2418.
- 李振生, 聂峰, 田晓莉, 石永红, 牛浩, 王创. 2016. 东准噶尔构造带晚古生代地层时代的厘定及其对区域构造演化意义. 地质学报, 90(3): 569~588.
- 李宗怀, 韩宝福, 李辛子, 杜蔚, 杨斌. 2004. 新疆准噶尔地区花岗岩中微粒闪长质包体特征及后碰撞花岗质岩岩浆起源和演化. 岩石矿物学杂志, 23(3): 214~226.
- 龙晓平, 孙敏, 袁超, 肖文交, 陈汉林, 赵永久, 蔡克大, 李继亮. 2006. 东准噶尔石炭系火山岩的形成机制及其对准噶尔洋盆闭合时限的制约. 岩石学报, 22(1): 31~40.
- 罗婷, 陈帅, 廖群安, 陈继平, 胡朝斌, 王富明, 田健, 吴魏伟,

2016. 东准噶尔晚石炭世双峰式火山岩年代学、地球化学及其构造意义. 地球科学, 41(11): 1845~1862.
- 沈晓明, 张海洋, 马林. 2013. 阿尔泰山缘晚石炭世淡色花岗岩的发现及其构造意义. 大地构造与成矿学, 37(4): 721~729.
- 苏玉平, 唐红峰, 刘丛强, 侯广顺, 梁莉莉. 2006. 新疆东准噶尔苏吉铝质 A 型花岗岩的确立及其初步研究. 岩石矿物学杂志, 5(3): 175~184.
- 汤贺军. 2021. 新疆东准噶尔扎河坝及邻区古生代构造演化与成岩成矿研究. 导师: 吴珍汉. 北京: 中国地质科学院博士论文.
- 田健, 廖群安, 樊光明, 聂小妹, 胡朝斌, 王富明, 陈帅, 吴魏伟. 2016. 东准噶尔卡拉麦里断裂以南幔源底侵体、“钉合花岗岩体”的发现及其地质意义. 岩石学报, 32(6): 1715~1730.
- 田健. 2014. 东准噶尔卡拉麦里地区早石炭世侵入岩的岩石学特征及其地质意义. 导师: 廖群安. 武汉: 中国地质大学(武汉)硕士学位论文.
- 王涛. 2000. 花岗岩研究与大陆动力学. 地学前缘, 7(增刊): 137~146.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 郑永飞. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题. 岩石学报, 23(6): 1217~1238.
- 肖庆辉, 邱瑞照, 邢作云, 张昱, 伍光英, 童劲松. 2007. 花岗岩成因研究前沿的认识. 地质论评, 53(增刊): 17~27.
- 熊双才, 李广, 张征峰. 2019a. 东准噶尔晚石炭世构造体制转变: 来自 A2 型流纹岩的证据. 地质力学学报, 25(S1): 49~52.
- 熊双才, 张征峰, 李广, 刘润泽, 华叙登, 赵富庄, 周鹏飞, 李关禄. 2019b. 东准噶尔老爷庙地区碱性花岗岩锆石 U-Pb 定年、地球化学及其地质意义. 地质论评, 65(1): 221~231.
- 杨高学, 李永军, 吴宏恩, 司国辉, 金朝, 张永智. 2009. 东准噶尔卡拉麦里地区黄羊山花岗岩和包体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及地质意义. 岩石学报, 25(12): 3197~3207.
- 杨高学. 2008. 新疆东准噶尔卡拉麦里地区花岗岩类研究. 导师: 李永军. 西安: 长安大学硕士学位论文.
- 张峰. 2014a. 东准噶尔卡拉麦里地区金铜多金属矿成矿规律与成矿预测. 导师: 陈建平. 北京: 中国地质大学(北京)博士学位论文.
- 张峰, 陈建平, 徐涛, 范俊杰, 潘爱军, 郭晓东, 李杰美, 朝银银. 2014b. 东准噶尔晚古生代依旧存在俯冲消减作用——来自石炭纪火山岩岩石学、地球化学及年代学证据. 大地构造与成矿学, 38(1): 140~156.
- 张旗, 李承东. 2012. 花岗岩: 地球动力学意义. 北京: 海洋出版社; 1~276.
- 张征峰, 熊双才, 范香莲. 2021. 东准噶尔木炭窑地区同造山花岗岩锆石 U-Pb 定年、地球化学及地质意义. 地质论评, 67(1): 231~241.
- 赵霞, 贾承造, 张光亚, 卫延召, 赖绍聪, 方向, 张丽君. 2008. 准噶尔盆地陆东—五彩湾地区石炭系中、基性火山岩地球化学及其形成环境. 地学前缘, 15(2): 272~279.
- 周建厚, 丰成友, 沈灯亮, 李大新, 王辉, 张明玉, 马圣钊. 2015. 新疆祁漫塔格维宝矿区西北部花岗闪长岩年代学、地球化学及其构造意义. 地质学报, 89(3): 471~486.
- 朱志新, 李少贞, 李篱龄. 2005. 东准噶尔纸房地区晚石炭世巴塔玛依内山组陆相火山—沉积体系特征. 新疆地质, 23(1): 14~25.
- Altherr R, Holl A, Hegner E, Langer C, Kreuzer H. 2000. High-potassium, calc-alkaline I-type plutonism in the European Variscides: Northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany). Lithos, 50: 51~73.
- Bai Jianke, Chen Junlu, Tang Zuo, Zhang Yue. 2018. The closure time of Junggar Paleozoic oceanic basin: Evidence from Carboniferous detrital zircon U-Pb geochronology in Kalamaili area. Geological Bulletin of China, 37(1): 26~38.
- Batchelor R A, Bowden P. 1985. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters. Chemistry Geology, 50(48): 43~55.
- Boehnke P, Watson E B, Trail D, Harrison T M, Schmit A K. 2013. Zircon saturation re-revisited. Chemical Geology, 351: 324~334.
- Chappell B W, White A J R. 1992. I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt, Trans. Royal. Edinburgh: Earth Sciences, 83(1~2): 1~26.
- Chappell B W. 1988. Origin of infracrustal (I-type) granite magmas. Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences, 79: 71~86.
- Chappell B W. 1999. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites. Lithos, 46(3): 535~551.
- Collins W J, Beams S D, White A J R, Chappell B W. 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia. Contrib. Mineral. Petrol., 80(2): 189~200.
- Collins W J, Richards S W. 2008. Geodynamic significance of S-type granite in circum-Pacific orogens. Geology, 36(7): 559~562.
- Deng Jinfu, Feng Yanfang, Di Yongjun, Liu Cui, Xiao Qinghui, Su Shangguo, Zhao Guochun, Meng Fei, Ma Shuai, Yao Tu. 2015a. Magmatic Arc and Ocean—Continent Transition: Discussion. Geological Review, 61(3): 473~484.
- Deng Jinfu, Liu Cui, Feng Yanfang, Xiao Qinghui, Di Yongjun, Su Shangguo, Zhao Guochun, Duan Peixin, Dai Meng. 2015b. On the correct application in the common igneous petrological diagram: discussion and suggestion. Geological Review, 61(4): 717~734.
- Ewart A. The mineralogy and petrology of Tertiary—Recent orogenic volcanic rocks: with special reference to the andesitic—basaltic compositional range. 1982. In: Thorpe R S. ed. Chichester: Andesites. Wiley: 25~87.
- Ferry J M, Watson E B. 2007. New thermodynamic models and revised calibrations for the Ti-in-zircon and Zr-in-rutile thermometers. Contrib. Mineral. Petrol., 154: 429~437.
- Gan Lin, Tang Hongfeng, Han Yujie. 2010. Geochronology and geochemical characteristics of the Yemaquan granitic pluton in East Junggar, Xinjiang, Acta Petrologica Sinica, 26(8): 2374~2388.
- Green T H. 1995. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust—mantle system. Chemical Geology, 120: 347~359.
- Harris N, Marzouki F, Ali S. 1986. The Jabel Sayid complex, Arabian Shield: geochemical constraints on the origin of peralkaline and related granites. Journal of the Geological Society, 143(2): 287~295.
- Han Baofu, Ji Jianqing, Song Biao, Chen Lihui, Zhang Lei. 2006. Late Paleozoic vertical growth of continental crust around the Junggar Basin, Xinjiang, China (I): Timing of post-collisional plutonism. Acta Petrologica Sinica, 22(5): 1077~1086.
- Han Baofu. 2007. Diverse post-collisional granitoids and their tectonic setting discrimination. Earth Science Frontiers, 14(3): 64~72.
- Henderson P. 1982. Inorganic Geochemistry. New York: Pergamon Press: 1~353.
- Hofmann A W. 1988. Chemical differentiation of the Earth: The relationship between mantle ‘continental crust’ and oceanic crust. Earth and Planetary Science Letters, 90(3): 297~314.
- Hu Fangyang, Liu Shuwen, Ducea M N, Zhang Wanyi, Chapman, J B,

- Fu Jinghao, Wang Maojiang, 2018. Interaction among magmas from various sources and crustal melting processes during continental collision: Insights from the Huayang intrusive complex of the South Qinling Belt, China. *Journal of Petrology*, 59:735~770.
- Hu Wanlong. 2016. Geochemical Characteristics and Geological Significance of Late Carboniferous Granites from the Laoyaquan in eastern Junggar, Xinjiang. Tutor: Wang Jinrong. Master thesis of Lan Zhou University: 1~70.
- Huang Gang, Niu Guangzhi, Wang Xinlu, Guo Jun, Yu Feng. 2012. Formation and emplacement age of Karamaili ophiolite: LA-ICP-MS zircon U-Pb age evidence from the diabase and tuff in eastern Junggar, Xinjiang. *Geological Bulletin of China*, 31(8):1267~1278.
- Kemp A I S, Hawkesworth C J, Foster G J, Gray C M, Paterson B A, Hergt J M, Whitehouse M J, Woodhead J D. 2007. Magmatic and crustal differentiation history of granitic rocks from Hf—O isotopes in zircon. *Science*, 315(5814): 980~983.
- Kovalenko A. Clemens, J D. Savatkov V. 2005. Petrogenetic constraints for the genesis of Archaean sanukitoid suites: geochemistry and isotopic evidence from Karelia, Baltic Shield. *Lithos*, 79(1/2):147~160.
- Kröner A, Windley B F, Badarch G, Tomurtogoo O, Hegner E, Jahn B M, Gruschka S, Khain E V, Demoux A, Wingate M T D. 2007. Accretionary growth and crust-formation in the central Asian Orogenic Belt and comparison with the Arabian—Nubian shield. In: Hatcher R D Jr, Carlson M P, McBride J H, Martinez Catalan J R. eds. 4-D Framework of Continental Crust. Geological Society of America Memoir 200: 181~209; doi: 110. 1130/2007. 1200 (1111)
- Li Di, He Dengfa, Sun Min, Zhang Lei. 2020. The role of arc—arc collision in accretionary orogenesis: Insights from ca. 320 Ma tectono—sedimentary transition in the Karamaili area, NW China. *Tectonics*, doi: 10.1029/2019TC005623.
- Li Shan, Wilde Simon A, Wang Tao, Guo Qianqian. 2013. Incremental growth and origin of the Cretaceous Renjiayingzi pluton, southern Inner Mongolia, China: Evidence from structure, geochemistry and geochronology. *Journal of Asian Earth Sciences*, 75: 226~242.
- Li Tong, Yuan Huaiyu. 2011. Element abundance in the oceanic and the continental lithospheres. *Geochimica*, 40(1): 1~5.
- Li Yang, Li Sanzhong, Liang Wentian, Lu Rukui, Zhang Youjun, Li Xiyao, Wang Pengcheng, Somerville Ian, Zhang Guowei. 2019. Incremental emplacement and syn-tectonic deformation of Late Triassic granites in the Qinling Orogen: Structural and geochronological constraints. *Gondwana Research*, 72:194~212.
- Li Yanguang, Wang Shuangshuang, Liu Minwu, Meng En, Wei Xiaoyan, Zhao Huibo, Jin Mengqi. 2015. U-Pb dating study of Baddeleyite by LA-ICP-MS: Technique and application. *Acta Geologica Sinica*, 89(12):2400~2418.
- Li Zhensheng, Nie Feng, TIAN Xiaoli, SHI Yonghong, NIU Hao, Wang Chuang. 2016. Redefinition of formation age of Late Paleozoic strata in the eastern Junggar tectonic zone and its implications for evolution of regional geological structure. *Acta Geologica Sinica*, 90(3):569~588.
- Li Zonghuai, Han Baofu, Li Xinzi, Du Wei, Yang Bin. 2004. Microgranular dioritic enclaves in Junggar granites and their implications for the origin and evolution of post-collisional granitic magmatism in North Xinjiang. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 23(3):214~226.
- Liegeois J P, Navez J, Hertogen J, Black R. 1998. Contrasting origin of post-collisional high-K calc-alkaline and shoshonitic versus alkaline and peralkaline granitoids. The use of sliding normalization. *Lithos*, 45(1):1~28.
- Long Xiaoping, Sun Min, Yuan Chao, Xiao Wenjiao, Chen Hanlin, Zhao Yongjiu, Cai Keda, Li Jiliang. 2006. Genesis of Carboniferous volcanic rocks in the eastern Junggar: constraints on the closure of the Junggar ocean. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1): 31~40.
- Long, Xiaoping, Yuan Chao, Sun Min, Safonova I, Xiao Wenjiao, Wang Yujing. 2012. Geochemistry and U - Pb detrital zircon dating of Paleozoic graywackes in east Junggar, NW China: Insights into subduction—accretion processes in the southern Central Asian Orogenic Belt. *Gondwana Research*, 21:637~653.
- Ludwig K R. 2003. Users Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication: 25~32.
- Luo Biji, Zhang Hongfei, Xu Wangchun, Guo Liang, Pan Fabin, Yang He. 2015. The Middle Triassic Meiwu batholith, west Qinling, central China: Implications for the evolution of compositional diversity in a composite batholith. *Journal of Petrology*, 56:1139~1172.
- Luo Ting, Chen Shuai, Liao Qun'an, Chen Jiping, Hu Chaobin, Wang Fuming, Tian Jian, Wu Weiwei. 2016. Geochronology, geochemistry and geological significance of the Late Carboniferous bimodal volcanic rocks in the eastern Junggar. *Earth Science*, 41(11): 1845~1862.
- Maniar P D, Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635~643.
- McLennan S M. 2001. Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust. *Geochem. , Geophys. , Geosyst.*, 2(4): 203~236.
- Middlemost E A. 1994. Naming materials in the magma / igneous rock system. *Earth-Science Reviews*, 37(3): 215~224.
- Miller C F. 1985. Are strongly peraluminous magmas derived from polytict sedimentary source. *J. Geol.*, 93: 673~689.
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25(4):956~983.
- Pitcher W S. 1987. Granites and yet more granites forty years on. *Geologische Rundschau*, 76(1):51~79.
- Pitcher W S. 1997. The Nature and Origin of Granite. The Nature and Origin of Granite (second edition). London: Chapman & Hall: 1~345.
- Rapp R P, Watson E B. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8~32 kbar: implications for continental growth and crust—mantle recycling. *Journal of Petrology*, 36(4): 891~931.
- Rubatto D, Williams I S. 2000. Imaging, trace element geochemistry and mineral inclusions: Linking U-Pb ages with metamorphic conditions. *EOS*, 21: 25
- Rudnick R L, Barth M, Horn I, McDonough W F 2000. Rutile-bearing refractory eclogites: Missing link between continents and depleted mantle. *Science*, 287(5451): 278~281.
- Sengör A M C, Natal' in B A, Burtman V S. 1993. Evolution of Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia. *Nature*, 364:299~307.
- Shen Xiaoming, Zhang Haixiang, Ma Lin. 2013. Discovery of the Late Carboniferous Leucogranite in the Southern Altay Range and its

- tectonic implications. *Geotectonica et Metallogenia*, 37(4): 721~729.
- Shen Xiaoming, Zhang Haixiang, Wang Qiang, Wyman D A, Yang Yueheng. 2011. Late Devonian—Early Permian A-type granites in the southern Altay Range, Northwest China: Petrogenesis and implications for tectonic setting of ‘A2-type’ granites. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42: 986~1007.
- Su Yuping, Tang Hongfeng, Liu Congqiang, Hou Guangshun, Liang Lili. 2006&. The determination and a preliminary study of Sujiquan aluminous A-type granites in East Junggar, Xinjiang. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 5(3): 175~184.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; implications on mantle composition and processes. In: Saunders A D, Norry M J. eds. *Magmatism in the Ocean Basins*; Geological Society Special Publications London, 42: 313~345.
- Sylvester P J. 1989. Post-collisional alkaline granites. *Journal of Geology*, 97(3): 261~281.
- Sylvester P J. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites. *Lithos*, 45: 29~44.
- Tang Hejun. 2021&. Paleozoic tectonic evolution, diagenesis and mineralization of the Zhaheba and its adjacent areas in East Junggar, Xinjiang. Supervisor: Wu Zhenhan. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences.
- Tao Wei, Li Yang, Chen Yingtao, Lu Rukui, Ran Yazhou, Zhang Pengpeng, Zhang Guowei. 2021. Syn-tectonic emplacement during sinistral transpression; The Late Triassic Gaoqiao pluton in the South Qinling Belt, central China. *Geological Journal*, 56: 995~1011.
- Taylor S R, McLennan S M. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Oxford: Blackwell Scientific Publications.
- Taylor S R, McLennan S M. 1995. The geochemical evolution of the continental crust. *Rev. Geophys.*, 33: 241~265.
- Tian Jian, Liao Qun'an, Fan Guangming, Nie Xiaomei, Hu Chaobin, Wang Fuming, Chen Shuai, Wu Weiwei. 2016. Mantle underplated pluton and stitching granites pluton from south side of the Karamaili fault in the eastern Junggar: Geochronological, geochemical and Sr—Nd isotopic constrains on their petrogenesis and tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 32(6): 1715~1730.
- Tian Jian. 2014&. The petrological characteristics and tectonics implications for Early Carboniferous intrusions from the area of Karamaili in eastern Junggar. Supervisor: Liao Qun'an. Wuhan: Master thesis of China University of Geosciences(Wuhan).
- Van Achterbergh E, Ryan C G, Jackson S E, Griffin W. 2001. Data reduction software for LA-ICP-MS. In: Sylvester P J. ed. *Laser—Ablation—ICP MS in the Earth Sciences: Principles and Applications*. Mineralogical Society of Canada Short Course Series, (29): 239~243.
- Wang Tao. 2000&. Studies on granites and continental dynamics. *Earth Science Frontiers*, 7(supp.): 137~146.
- Windley B F, Garde A A. 2009. Arc-generated blocks with crustal sections in the North Atlantic craton of West Greenland: Crustal growth in the Archean with modern analogues. *Earth-Science Reviews*, 93(1~2): 1~30.
- Wolf M B, London D. 1994. Apatite dissolution into peraluminous haplogranitic melts: An experimental study of solubilities and mechanisms. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(19): 4127~4245.
- Wright J B. 1969. A simple alkalinity ratio and its application to questions of non-orogenic granite genesis. *Geological Magazine*, 106(4): 370~384.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Yang Jinhui, Zheng Yongfei. 2007&. Discussions on the petrogenesis of granites. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1217~1238.
- Xiao Qinghui, Qiu Ruizhao, Xing Zuoyun, Zhan Yu, Wu Guangying, Tong Jinsong. 2007&. Major Frontiers on Studies of Granite Formation. *Geological Review*, 53(Supp): 17~27.
- Xiao Wenjiao, Kröner A, Windley B. 2009. Geodynamic evolution of Central Asia in the Paleozoic and Mesozoic. *International Journal of Earth Science*, 98(1): 1185~1188.
- Xiao Wenjiao, Pirajno F, Seltmann R. 2008. Geodynamics and metallogeny of the Altaid orogen. *Journal of Asian Earth Science*, (32): 77~81.
- Xiong Shuangcai, Li Guang, Zhang Zhengfeng. 2019a&. Late carboniferous tectonic regime transition in east Junggar: Evidence from A2-type rhyolite. *Journal of Geomechanics*, 25(S1): 49~52.
- Xiong Shuangcai, Zhang Zhengfeng, Li Guang, Liu Runze, Hua Xudeng, Zhao Fuzhuang, Zhou Pengfei, Li Guanlu. 2019b&. Zircon U-Pb dating, geochemical characteristics of Alkali-granites in Laoyemiao area, eastern Junggar, and geological significance. *Geological Review*, 65(1): 221~231.
- Xu Xingwang, Jiang Neng, Li Xianhua, Wu Chu, Qu Xun, Zhou Gang, Dong Lianhui. 2015. Spatial—temporal framework for the closure of the Junggar Ocean in central Asia; New SIMS zircon U-Pb ages of the ophiolitic mélange and collisional igneous rocks in the Zhifang area, east Junggar. *Journal of Asian Earth Sciences*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jseas.2015.06.017>
- Yakubchuk A. 2004. Architecture and mineral deposit settings of the Altaid orogenic collage; a revised model. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23: 761~779.
- Yang Gaoxue. 2008&. The Study of Granitoids in Kalamaili Area of Eastern Junggar, Xinjiang. Supervisor: Li Yongjun. Xi'an: Master thesis of Chang'an University.
- Yang Gaoxue, Li Yongjun, Wu Hong'en, Si Guohui, Jin Chao, Zhang Yongzhi. 2009&. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the Huangyangshan pluton and its enclaves from Kalamaili area eastern Junggar, Xinjiang, and geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 25(12): 3197~3207.
- Zhang Feng. 2014a&. Metallogenic Characteristics and Prediction of Gold and Copper Polymetallic Deposits in Kalamaili, Eastern Junggar, Xinjiang. Supervisor: Chen Jianping. Beijing: China University of Geosciences.
- Zhang Feng, Chen Jianping, Xu Tao, Fan Junjie, Pan Aijun, Guo Xiaodong, Li Jiemei, Chao Yinyin. 2014b&. Late Paleozoic Subduction in the eastern Junggar: Evidence from the petrology, geochemistry and geochronology of Carboniferous volcanic rocks. *Geotectonica et Metallogenia*, 38(1): 140~156.
- Zhang Qi, Li Chengdong. 2012&. Granites: Implications for Continental Geodynamic. Beijing: Ocean Press: 1~276.
- ZHANG Zhengfeng, XIONG Shuangcai, FAN Xianglian. 2021&. Zircon U-Pb dating, geochemistry and geological significance of synorogenic – granit in Mutanyao area, eastern Junggar. *Geological Review*, 67(1): 231~241.
- Zhao Xia, Jia Chengzao, Zhang Guangya, Wei Yanzhao, Lai Saocong, Fang Xiang, Zhang Lijun. 2008&. Geochemistry and tectonic

settings of Carboniferous intermediate—basic volcanic rocks in Ludong—Wucaiwai, Junggar Basin. *Earth Science Frontiers*, 15 (2): 272~279.

Zhou Jianhou, Feng Chengyou, Shen Dengliang, Li Daxin, Wang Hui, Zhang Mingyu, Ma Shengchao. 2015 &. Geochronology, geochemistry and tectonic implications of granodiorite in the northwest of Weibao deposit, Qimantage, Xinjiang. *Acta Geological Sinica*, 89(3): 471~486.

Zhu Zhixin, Li Shaozhen, Li Gaoling. 2005&. The characteristics of sedimentary system——Continental facies volcano in later Carboniferous Batamayi Group, Zhifang region, east Junggar. *Xinjiang Geology*, 23(1): 14~25.

Zhou Jianhou, Feng Chengyou, Shen Dengliang, Li Daxin, Wang Hui, Zhang Mingyu, Ma Shengchao. 2015 &. Geochronology, geochemistry and tectonic implications of granodiorite in the

Zircon U-Pb ages, geochemical characterisitics of the Basike granodiorite in East Junggar and their tectonic significance

TAO Wei^{1, 2)}, GUO Ling¹⁾, ZHOU Ningchao^{1,3)}, LI Yang¹⁾, WANG Xing²⁾, CHEN Tao²⁾, BAI Jianke⁴⁾

- 1) State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an, 710069;
- 2) Shaanxi Mineral Resources and Geological Survey, Shaanxi, Xi'an, 710068;
- 3) Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an, 710054;
- 4) Xining Center of Natural Resources Comprehensive Survey, China Geological Survey, Xining, 810021

Objectives: The Late Carboniferous Basike granodiorite located in the Yemaquan island of east Junggar, which have important geological significance for constraining the tectonic evolution of the east Junggar, but no report on isotope and tectonic setting about this granodiorite.

Methods: Based on the field work, we finished microscope observation, whole-rock geochemical analysis and LA-ICP-MS zircon U-Pb dating for the granodiorite in this paper.

Results:Zircon grains of two samples from the Basike granodiorite are euhedral to subhedral in shape, display fine-scale oscillatory growth zoning with Th/U ratios of 0.39~1.12 and 0.37~0.91 respectively, indicating a magmatic origin. U-Pb dating results show that the pluton was emplaced with age of 301.3±2.5 Ma and 310.7±3.6 Ma. The granodiorite have high SiO₂ contents of 65.7%~68.6% and Al₂O₃ contents of 14.78%~15.50%, Na₂O concentrations of 4.36%~4.70%, and K₂O concentrations of 2.44%~3.40%, with (Na₂O+K₂O) concentrations of 6.94%~7.98% and Na₂O/K₂O ratios of 1.34~1.88, A/CNK values of 0.93~1.03, Mg[#] values of 42.41~50.42. The samples are enrichment of light rare earth elements(LREEs) and large ion lithophile elements (LILE), such as K, Rb, Ba, and depletion of heavy rare earth elements (HREEs) and high field-strength elements (HFSE), such as Nb, Ta, Ti, with (La/Yb)_N ratios of 5.78~10.14 and weak negative Eu anomalies(δEu=0.69~0.89).

Conclusions: These granodiorites chemically belongs to metaluminous—weak peraluminous, calc-alkaline I-type ones, and their magma could be mixed by mantle and crust, formed under the tectonic setting of extension. Combining regional geological characteristics, we propose that the east Junggar was in extensional setting after collision in Late Carboniferous, and with the characteristics of incremental emplacement.

Keywords:east Junggar; granodiorite; geochemistry; zircon U-Pb dating; post-collision, Late Carboniferous

Acknowledgements:This research is supported by National Nature Science Foundation (Nos. 41302076, 41802212 and 41773024), the Innovative Talents Promotion Plan of Shaanxi Province (No. 019KJXX-078) and the Project of China Geological Survey(No. DD20160006-1).

First author:TAO Wei, male, born in 1987, doctoral student, major in mineral prospecting and exploration, engineer, engaged in regional geological survey and structural geology; Email: hputw07@163.com

Corresponding author:GUO Ling, male, born in 1983, Ph. D., associate professor, engaged in education and research of mineral prospecting and exploration; Email: guoling@nwu.edu.cn

Manuscript received on: 2021-09-21; Accepted on: 2021-12-02; Network published on: 2021-12-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2021.12.065

Edited by: ZHANG Yuxu

