

中国北天山晚石炭世白杨沟火山岩的成因及地质意义*

颀炜^{1 2} 祝近近¹ 罗震宇² 徐义刚²

XIE Wei^{1 2}, ZHU JinJin¹, LUO ZhenYu² and XU YiGang²

1. 河海大学海洋学院, 南京 210098

2. 中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室, 广州 510640

1. College of Oceanography, Hohai University, Nanjing 210098, China

2. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2017-07-03 收稿, 2017-10-04 改回.

Xie W, Zhu JJ, Luo ZY and Xu YG. 2018. Petrogenesis and geological implications of the Late Carboniferous Baiyanggou volcanic rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 34(1): 126–142

Abstract Chinese Northern Tianshan Orogen is one of the important components of the Central Asian Orogenic Belt (CAOB) as its western part. Considerable debates persist as to its tectonic setting during the Late Paleozoic era, among which two dominant schools of quite different opinions were presented, one thought it was formed in an active subduction system while the other in an intraplate rift environment. Some researchers ever suggest that lots of bimodal volcanics occur in Chinese Northern Tianshan from Carboniferous to Permian, which are related to the Tarim mantle plume. To provide new constraints on this issue, petrology and geochemical analyses have been carried out on the Baiyanggou volcanics from the Bogda Mountains. The Baiyanggou volcanics are composed of pillow basalt, massive basalt, andesitic-dacitic ignimbrite, rhyolite and volcanic breccia. Andesitic-dacitic ignimbrite and rhyolite belong to I-type felsic rock and are in conformable contact with the pillow and massive basalts. Marine Echinodermata fossil and zircon SHRIMP U-Pb age (~311Ma) indicate that these volcanics are formed in Late Carboniferous (the Qijiagou Formation). Furthermore, occurrence of andesitic-dacitic ignimbrite suggests that the eruption of the Baiyanggou volcanics is not a bimodal volcanism, but related to bimodal magma (basaltic and rhyolitic magmas). MELTS modeling implies that the felsic volcanics are not produced by fractional crystallization of the pillow or massive basalt. Comparison with previous basaltic melting experiments, positive $\varepsilon_{Nd}(t)$ values (+5.9 ~ +7.5) and arc-like trace element characteristics indicate that they are produced by partial melting of neonatal hydrated arc mafic crustal rocks. Rhyolites likely represent the direct product of neonatal arc crustal rocks. Nevertheless, ignimbrites contain lots of basaltic and silicic fiammes and feldspars and display negative to positive Eu anomalies ($\delta Eu = 0.8 \sim 1.1$), implying that magma mingling and feldspar accumulation may have played an important role in the genesis of the ignimbrites. Combined with the Bogda Late Carboniferous basalts, we suggest that it may be an intra-oceanic rear-arc or back-arc environment in the Bogda belt during Late Carboniferous, probably related to southward subduction of the North Tianshan Ocean (also named as Junggar Ocean). The transition of the tectonic settings of the Bogda arc is likely related to a “soft” arc-arc collision (East Junggar arc vs. Bogda arc) at the boundary of Carboniferous-Permian.

Key words Chinese Northern Tianshan; The Bogda belt; Late Carboniferous; Ignimbrite; Intra-oceanic rear-arc or back-arc setting

摘要 中国北天山作为中亚造山带西部重要的组成部分,其晚古生代的构造背景长期存在板内裂谷环境和岛弧环境两个截然不同的认识,有些学者还提出该地区有塔里木地幔柱的影响,从石炭纪到二叠纪均发育大量的双峰式火山岩。为了厘定其石炭-二叠纪模糊不清的构造属性以及火山岩的地质特征,本文对北天山博格达隆起带白杨沟地区火山岩进行了系统的研究。这套火山岩由枕状玄武岩、块状玄武岩、安山-英安质熔结凝灰岩、流纹岩和火山角砾岩组成。安山-英安质熔结凝灰岩和流纹岩属于 I 型酸性岩,与枕状玄武岩及块状玄武岩整合接触。海相棘皮类化石的发现以及锆石 SHRIMP U-Pb 年龄

* 本文受国家自然科学基金青年基金项目(41503017、41203009)和中央高校基本科研业务费项目(2017B03714)联合资助

第一作者简介: 颀炜,男,1985年生,博士,副教授,从事岩浆岩岩石地球化学、岩浆铜镍硫化物矿床的教学和科研工作, E-mail: weixie@hhu.edu.cn

(~311Ma) 的测定指示这套白杨沟火山岩应属于晚石炭世祁家沟组。同时, 安山-英安质熔结凝灰岩的发现表明白杨沟火山岩剖面并非双峰式火山岩, 但与双峰式岩浆(玄武质和流纹质岩浆)有密切的成因关系。MELTS 模拟计算指示白杨沟流纹岩和熔结凝灰岩不是与其共生的玄武岩高度结晶分异的产物。与含水玄武质岩石的部分熔融实验对比, 正的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值 (+5.9 ~ +7.5) 以及岛弧特征的微量元素性质则表明白杨沟流纹岩和熔结凝灰岩主要由含水的新生岛弧玄武质地壳(岩石)发生部分熔融形成。流纹岩很可能代表新生地壳部分熔融的直接产物。然而熔结凝灰岩中发育玄武质和长英质两类浆屑, 大量斜长石晶屑的发育以及负 Eu 至正 Eu 异常 ($\delta Eu = 0.8 \sim 1.1$) 暗示安山-英安质熔结凝灰岩还受岩浆混合作用和长石堆晶作用的影响。结合博格达晚石炭世玄武岩的研究, 本文认为博格达晚石炭世应为洋内岛弧后弧或弧后环境, 与北天山洋(或称为准噶尔洋)向南俯冲有关。博格达隆起带石炭-二叠纪构造属性的转变很可能与东准噶尔弧和博格达弧在石炭-二叠纪界限时期发生的弧-弧碰撞作用有关。

关键词 中国北天山; 博格达隆起带; 晚石炭世; 熔结凝灰岩; 岛弧后弧或弧后环境

中图法分类号 P588.14

造山带是一个复杂的岩浆-变质-沉积-构造系统, 作为地壳相对隆升、发生强烈构造变形、物质组成多样的地质单元, 记录了地球各圈层之间的相互作用, 是研究板块构造和陆内造山的天然实验室, 也是探寻金属矿产资源的重要基地。中亚造山带(CAOB)是全球最大的显生宙增生型造山带。而天山造山带作为中亚造山带西部重要的组成部分, 被誉为“Gold heart of Central Asia”, 记录着长达 800Ma 的地质历史过程。位于中亚腹地的天山造山带具有多块体镶嵌、多缝合带、多期次盆山耦合的大地构造格局, 经历了新元古代-晚古生代多块体多期次俯冲和碰撞造山增生以及中-新生代陆内再活化及造山的地质过程。多期次的蛇绿混杂岩带、多类型的高压变质岩的发育, 以及多种与俯冲有关的幔源岩浆的作用和 I 型花岗岩类的产出, 指示地壳侧向增生过程的多期性和复杂性。同时, 广泛发育的同碰撞/后碰撞基性-超基性岩、A 型花岗岩类和双峰式火山岩, 表明碰撞造山或造山后过程中地壳的垂向增长作用在天山的构造演化中也具有重要的意义(肖序常等, 1992; 马瑞士等, 1997; Han *et al.*, 1997, 2011; Jahn *et al.*, 2000; Xiao *et al.*, 2004, 2013, 2015; Gao *et al.*, 2009, 2011; Shu *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2011; Song *et al.*, 2013)。

近东西向的博格达山(博格达隆起带)为中国北天山造山带的主要组成部分, 其北接准噶尔盆地, 南连吐鲁番盆地(图 1a)。相对天山其他地区, 博格达山主体由石炭纪海相火山-沉积建造组成, 且以火山岩极其发育、花岗岩不发育为特征, 同时也不发育相关矿床或矿化点, 故其研究程度较其他地区弱了不少, 并且其相关科学问题大多数是结合天山其他地区一起提出的。具体到博格达地区, 前人对该地区石炭-二叠纪岩浆岩也做了一定程度的年代学和岩石地球化学的工作(表 1 所示)。总结前人的工作, 有关博格达石炭-二叠纪时期的构造属性主要有以下两个观点: 1) 前期为岛弧环境, 后转换为碰撞造山后环境(马瑞士等, 1997; Xiao *et al.*, 2004; Yuan *et al.*, 2010; Chen *et al.*, 2011; Shu *et al.*, 2011; Xie *et al.*, 2016a, b, c); 2) 为一大陆裂谷环境, 并与地幔柱有关(顾连兴等, 2000, 2001; 夏林圻等, 2004; Xia *et al.*, 2008, 2012; 高景刚等, 2014)。同时, 对于北天山洋或

准噶尔洋(古天山洋的北部分支)在北天山地区最终的闭合时限, 也即岛弧俯冲向碰撞造山后的转变时限, 也存在争议, 主要观点有: 1) 晚泥盆世-早石炭世末(顾连兴等, 2000, 2001; 夏林圻等, 2004; Han *et al.*, 2010; Chen *et al.*, 2011); 2) 晚石炭世-早二叠世(ca. 300Ma; 马瑞士等, 1997; Laurent-Charvet *et al.*, 2003; Xiao *et al.*, 2004; Yuan *et al.*, 2010; Shu *et al.*, 2011; Xie *et al.*, 2016a, b, c; Wali *et al.*, 2017)。

对于古老的构造体系, 由于受到后期构造事件的叠加, 其结构和组成会遭到一定程度的破坏, 用古地理或者地球物理的手段很难准确识别。而来自幔源的玄武质岩浆以及相关的中酸性岩浆岩在这些构造事件中记录着许多关键的地质信息, 对恢复古构造环境具有非常好的指示意义。在博格达隆起带, 发育大量的石炭-二叠纪火山-沉积岩建造。这些火山岩主要由玄武岩、流纹岩、中酸性熔结凝灰岩以及火山角砾岩组成(新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1993; 顾连兴等, 2000, 2001; 梁婷等, 2011; 赵同阳等, 2014)。然而前人主要聚焦在火山熔岩和侵入岩之上, 而往往忽略了对与其共生的中酸性熔结凝灰岩(Ignimbrite)或凝灰岩(Tuff)的研究。熔结凝灰岩和凝灰岩在世界各大火山区均有发育, 且涵盖了除了超基性成分以外所有的岩浆化学成分(玄武、安山、英安、流纹、粗面、响岩质等), 时间尺度上也跨越了整个地质历史时期(Sparks *et al.*, 1973; Walker, 1983; Branney and Kokelaar, 2002)。熔结凝灰岩是一种以熔结作用形成的一种细粒的火山碎屑岩, 其往往含有大量的晶屑、刚性岩屑、塑性岩屑(浆屑)和玻屑, 胶结物常为熔浆、玻璃或火山灰。在博格达西段白杨沟地区发育大量的枕状玄武质熔岩以及相关的中酸性岩和火山角砾岩, 其出露和保留程度均非常完好, 在国内并不多见, 是一个经典的地质景观。本文重点剖析与枕状熔岩共生的中酸性熔结凝灰岩以及流纹岩的岩石成因, 为进一步了解博格达晚石炭世构造背景提供新的证据。

1 地质概况及火山岩特征

博格达隆起带主要出露晚古生代和中-新生代地层, 其

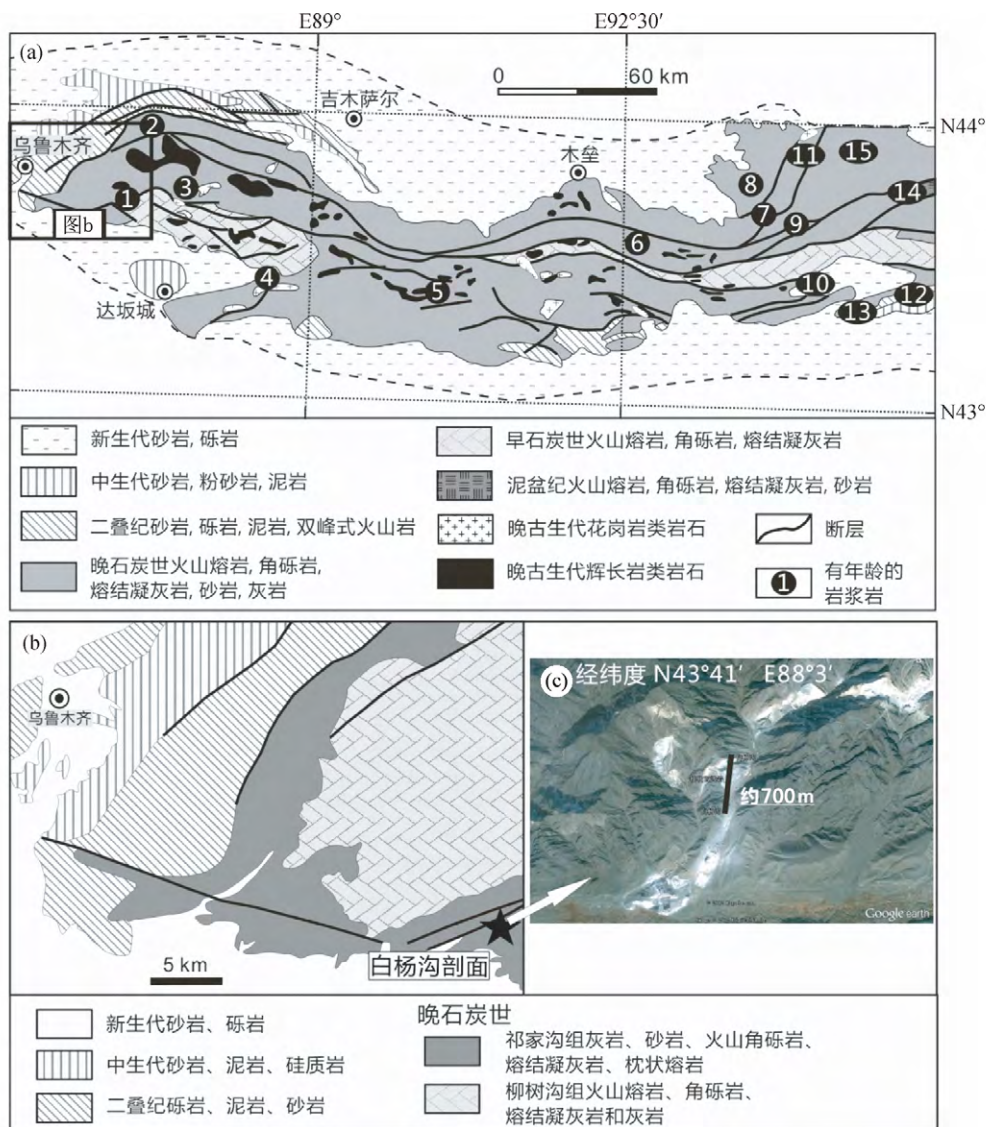


图1 研究区地质简图

(a) 中国北天山博格达隆起带地质简图(据 Chen *et al.*, 2011; 赵同阳等, 2014 修改), 图中有年龄的岩浆岩与表 1 所列的岩浆岩一一对应; (b) 博格达白杨沟地区地质简图(据新疆维吾尔自治区地质局, 1965^① 修改); (c) 白杨沟剖面所在地的 Google Earth 卫星图

Fig. 1 Simplified geological map of study area

(a) geological map of the Bogda belt at the north margin of the Chinese North Tianshan (modified after Chen *et al.*, 2011; Zhao *et al.*, 2014), in which the details of the Late Paleozoic magmatic rocks are given in Table 1; (b) simplified geological map around the Baiyanggou area; (c) Google Earth map showing the location of the Baiyanggou volcanics section

中晚古生代地层以石炭系为主, 二叠系次之(图 1a)。中-上泥盆统仅在博格达东段大石头一带少量出露。以中酸性的火山熔岩、熔结凝灰岩、火山角砾岩及少量的(凝灰质)砂岩为主, 为海陆交互相火山-沉积建造, 厚度 > 2000m, 与上覆石炭系为断层接触。博格达地区石炭纪各地层的命名在各个文献中并不统一, 本文结合新疆维吾尔自治区地质矿产局(1993) 以及该地区最新发表的文章, 将石炭系分为下石炭统七角井组以及上石炭统柳树沟组和祁家沟组(顾连兴等,

2001; 夏林圻等, 2004; 梁婷等, 2011; 赵同阳等, 2014)。下石炭统七角井组主要分布在博格达东段七角井一带以及西南端达坂城一带。其岩性主要以双峰式火山熔岩、中酸性熔结凝灰岩以及凝灰质砂岩组成, 局部还发育枕状玄武岩, 为一套浅海-滨海相火山岩建造, 厚度约 2000m。七角井组地层与上石炭统为断层接触。上石炭统占该地区出露地层的绝大部分, 主要分为下伏的柳树沟组和上覆的祁家沟组。柳树沟组主要由中酸性火山熔岩-熔结凝灰岩-火山角砾岩以及

① 新疆维吾尔自治区地质局. 1965. 1: 20 万乌鲁木齐幅地质图

表1 中国北天山博格达隆起带晚古生代岩浆岩年龄一览表

Table 1 Brief introduction of the Carboniferous–Early Permian felsic rocks with dating ages in the Bogda belt, Chinese North Tianshan

编号	出露地区	岩性	年龄(Ma)	方法	文献
博格达西段					
1	白杨沟	英安质熔结凝灰岩	311 ± 2	SHRIMP 锆石 U-Pb	Xie <i>et al.</i> , 2016a
		玄武岩	296 ± 3	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	Chen <i>et al.</i> , 2011
		流纹岩	293 ± 2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	Chen <i>et al.</i> , 2011
		流纹岩	297 ± 2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	Shu <i>et al.</i> , 2011
		辉长岩脉	288 ± 3	SHRIMP 锆石 U-Pb	Shu <i>et al.</i> , 2011
2	天池	粗面质熔结凝灰岩	315 ± 2	SHRIMP 锆石 U-Pb	Xie <i>et al.</i> , 2016b
3	三个山	辉绿岩墙	322 ± 7	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	靳刘圆等, 2014
		闪长岩	334 ± 2	SHRIMP 锆石 U-Pb	李平等, 2013
4	大河沿	花岗岩	298 ± 1	全岩 Rb-Sr	顾连兴等, 2000
		流纹岩	298 ± 8	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	Wali <i>et al.</i> , 2017
博格达中段					
5	黑沟	闪长岩	309 ± 6	SHRIMP 锆石 U-Pb	施文翔等, 2015
		花岗闪长岩	311 ± 4	SHRIMP 锆石 U-Pb	施文翔等, 2015
		二长花岗岩	309 ± 4	SHRIMP 锆石 U-Pb	施文翔等, 2015
6	博斯坦	凝灰岩	319 ± 6	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	张妍等, 2015
博格达东段					
7	大石头	粗面质熔结凝灰岩	319 ± 3	SHRIMP 锆石 U-Pb	Xie <i>et al.</i> , 2016b
		流纹岩	330 ± 3	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	Zhang <i>et al.</i> , 2017
8	大石头北	安山岩	346 ± 7	SHRIMP 锆石 U-Pb	谭佳奕等, 2010
		安山岩	326 ± 2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	谭佳奕等, 2010
		流纹岩	307 ± 2	全岩 Rb-Sr	王银喜等, 2007
9	色皮口	流纹岩	314 ± 1	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	高景刚等, 2013a
		石英角斑岩	315 ± 1	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	高景刚等, 2014
		辉绿岩	301 ± 2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	高景刚等, 2013b
10	七角井	玄武岩	342 ± 3	全岩 Rb-Sr	王银喜等, 2006
		流纹岩	340 ± 3	全岩 Rb-Sr	王银喜等, 2006
		流纹岩	295 ± 2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	Chen <i>et al.</i> , 2011
11	西地	流纹岩	296 ± 2	全岩 Rb-Sr	王金荣等, 2010
		玄武岩	322 ± 3	全岩 Rb-Sr	田黎萍等, 2010
12	车轱辘泉	流纹岩	294 ± 2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	Chen <i>et al.</i> , 2011
		玄武岩	295 ± 4	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	Chen <i>et al.</i> , 2011
		流纹岩	294 ± 2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	Chen <i>et al.</i> , 2011
13	红山口	流纹岩	344 ± 2	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	Chen <i>et al.</i> , 2013
		流纹岩	345 ± 3	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	Chen <i>et al.</i> , 2013
		玄武岩	347 ± 4	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	Chen <i>et al.</i> , 2013
14	下涝坝	安山岩	398 ± 5	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	崔方磊等, 2015
15	苕苕台子	流纹岩	312 ± 1	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	汪晓伟等, 2015a
		流纹岩	294 ± 1	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	汪晓伟等, 2015b

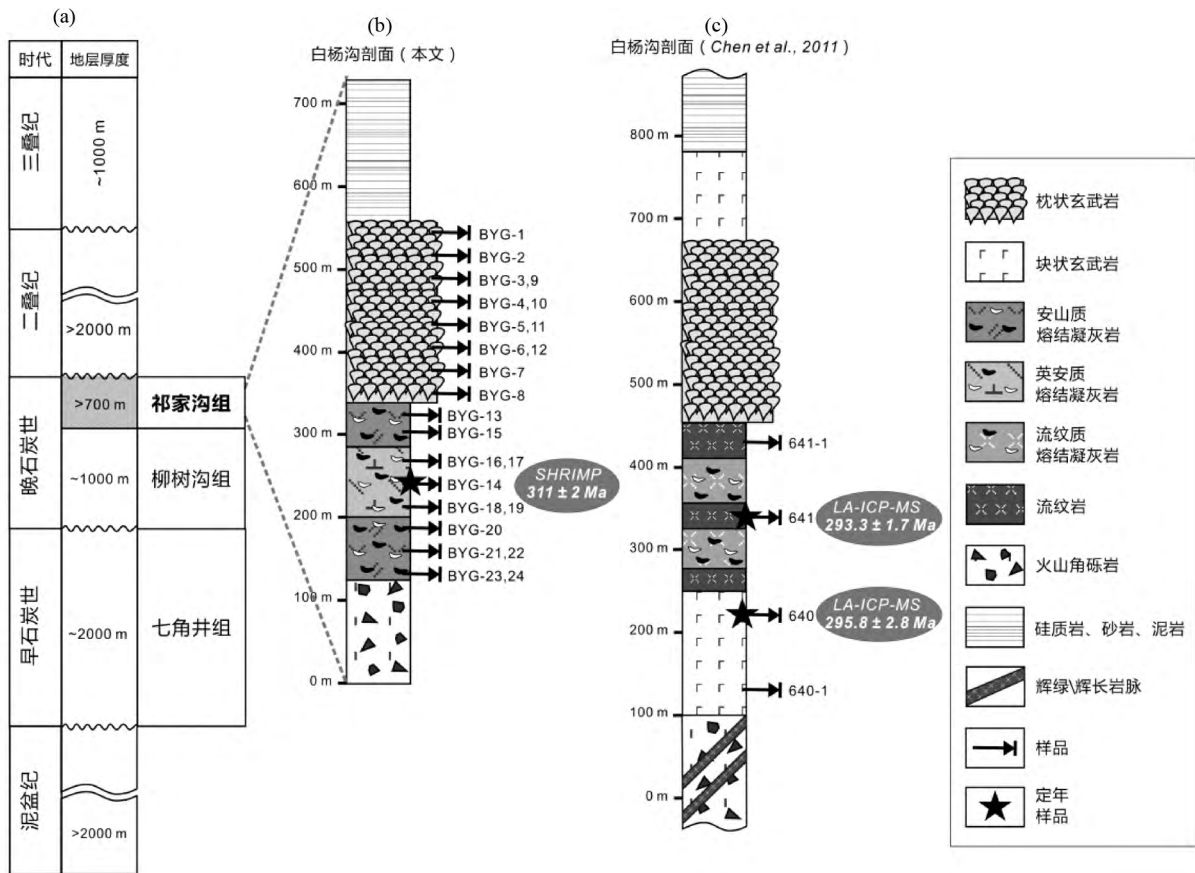


图2 博格达隆起带简略的泥盆-三叠纪地层柱状图 (a 据新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1993 修改) 和两套晚石炭世祁家沟组火山岩柱状图 (b, c)

Fig. 2 Simplified stratigraphy column from Devonian to Triassic in the Bogda belt (a , modified after BGMRX , 1993) and two composite stratigraphy columns of the Qijiagou Formation in the Bogda belt , showing the relationship of the felsic volcanics and pillow basalts (b , c)

表 2 博格达隆起带晚石炭世祁家沟组沉积相一览表 (据刘松柏等, 2017 修改)

Table 2 The regional sedimentary facies for the Late Carboniferous Qijiagou Formation in the Bogdabelt (after Liu *et al.* , 2017)

文献	刘文彬 (1993)	新疆维吾尔自治区地质矿产局 (1999)	高金汉等 (2004)	孙国智 (2009)	秦海峰等 (2011 ^①)	郭丽娜等 (2013)	周动力 (2015)	初建朋等 (2016)	刘松柏等 (2017)
研究区域	博格达西南麓	乌鲁木齐祁家沟	吐哈盆地北缘桃西沟	博格达	木垒县-色皮口	巴里坤-七角井	哈密地区	克泽勒库都克	博格达中部麻沟梁地区
沉积相	浅海	浅海	滨海	浅海	浅海-滨海	滨海-扇三角洲	滨海	浅海-滨海	浅海-滨海-扇三角洲

块状玄武岩夹少量凝灰质砂岩和灰岩组成,为浅海-滨海相火山岩-沉积岩建造,厚度约 1000m。祁家沟组主要由(枕状)玄武岩、中酸性火山熔结凝灰岩、火山角砾岩、砂岩和灰岩组成,厚度 >700m。前人研究祁家沟组沉积相主要为浅海-滨海-扇三角洲相(表 2)。上石炭统柳树沟组和祁家沟组之间为整合接触关系,二者与上覆二叠系为断层接触关系。二

叠系主要出露在博格达山两侧,厚度 >2000m。其中下二叠统主要为陆相的钙质砾岩、砂岩、硅质泥岩和双峰式火山岩;上二叠统主要为陆相砂岩、细砂岩和硅质泥岩沉积。上下二叠统为整合接触,与三叠系为不整合接触。三叠纪地层在博格达地区少量出露,主要也为陆相的砂岩、粉砂岩和硅质泥岩沉积,厚度约 1000m。新生代的砂岩和砾岩主要以沉

① 秦海峰,高景刚,周汝洪. 2011. 新疆木垒县色皮口一带 1:5 万区域地质矿产调查成果报告

积盖层出露在博格达山周边。

根据 1:20 万乌鲁木齐幅地质图(新疆维吾尔自治区地质局,1965)我们在博格达山西南角的白杨沟地区仔细观测了一厚度约 700m 的晚石炭世祁家沟组火山岩剖面。白杨沟剖面(图 1b)。该剖面在野外出露非常好,主要由枕状玄武岩、块状玄武岩、流纹岩、中酸性熔结凝灰岩和火山角砾岩组成(图 2)。至今熊发挥等(2011)、Chen *et al.* (2011)、Xie *et al.* (2016a) 报道过这套火山岩,而舒良树等学者也报道了一套位于白杨沟地区以碱性玄武岩(枕状和块状玄武岩)为主的二叠纪双峰式火山岩剖面(舒良树等,2005; Shu *et al.*, 2011) 这些玄武岩和流纹岩均具有独特的 Nb-Ta 不亏损地球化学特征,和区域上其他学者报道的石炭-叠纪火山岩截然不同,同时也与其同年报道的另一套白杨沟火山岩剖面明显不同(Chen *et al.*, 2011)。故这套以碱性玄武岩为主的双峰式火山岩剖面还需要进一步的后续研究工作来加以证实,本文不做具体讨论。

黑色枕状玄武岩厚约 220m,叠覆在熔结凝灰岩和火山角砾岩之上,与其呈整合接触关系。枕状玄武岩核部发育细粒辉绿结构,其成分主要包括斜长石和单斜辉石,另有少量脱玻化玻璃基质(<5%)、磁铁矿和硫化物。枕状玄武岩边部则发育细粒斑状结构和淬火结构,具有气孔构造和杏仁构造。其斑晶主要为斜长石,单斜辉石和磁铁矿次之。另外,枕状玄武岩边部多发育囊泡和杏仁,且多被后期的方解石或石英填充(熊发挥等,2011; Xie *et al.*, 2016a)。Chen *et al.* (2011) 报道的块状玄武岩和流纹岩作者在野外未发现。他们报道的块状玄武岩在枕状玄武岩上下层位均有发育,流纹岩和流纹质凝灰岩夹在枕状玄武岩和下层块状玄武岩之间(厚约 200m)。本文作者在野外发现的中酸性熔结凝灰岩主要为安山质和英安质(见后文地球化学讨论),也是紫红色和绿色,厚约 200m。其中玄武质浆屑和长英质浆屑均非常发育,大体从安山质到英安质,玄武质浆屑逐渐减少,长英质浆屑逐渐增多。白杨沟中酸性熔结凝灰岩晶屑也非常发育,主要以长石为主,暗色矿物(辉石、磁铁矿等)和石英次之,且以黑色的玻璃质熔浆胶结和火山灰压胶结为主,假流动构造不明显,偏火山碎屑熔岩类,个别熔结凝灰岩含古生物化石,多沸石化(图 3)。

2 分析方法及结果

本文选取 12 个相对新鲜无蚀变的中酸性熔结凝灰岩样品去皮并研磨至 200 目粉末进行全岩地球化学分析。粉末样品的制备由北京天和信地质服务公司完成。全岩主微量元素及 Nd 同位素分析均在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室完成。准确称取已烘干的粉末样品 0.7g,然后与一定量的 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ - LiBO_2 助熔剂一起装入瓷坩埚中,置于马弗炉中 900℃ 灼烧 40min,计算烧失量。主量元素分析用 Rigaku ZSX-400e 型荧光光谱仪(XRF)

测试,分析精度优于 1%~5%。详细步骤请参考 Goto and Tatsumi (1996)。微量元素分析在 PerkinElmer SciencELAN 6000 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)上测试。使用 USGS 标准样品 AGV-2 和 BHVO-2 及国内标准样品 GSR-1、GSR-2 和 GSR-3 来校正所测样品的元素含量。对于含量 $>10 \times 10^{-6}$ 的微量元素,分析误差一般小于 5%,对于含量 $<10 \times 10^{-6}$ 的微量元素,分析误差一般小于 8%,对于过渡金属元素,分析误差一般小于 10%。具体流程参见刘颖等(1996)。Nd 同位素的测定在 Micro-Mass-Isoprobe 型多接受电感耦合等离子质谱仪(MC-ICPMS)上完成。所测 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 做分馏校正,在本文样品的分析过程中,用国际标样 JNdi-1 来进行检测。所测 JNdi-1 的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 为 0.512115。详细步骤和流程参见 Li *et al.* (2006)。

白杨沟熔结凝灰岩具有较高的烧失量(1.8%~4.2%)。在后面的图解和讨论中,所有主要氧化物均已扣除烧失量,并且全铁均为 Fe_2O_3^T 的形式换算成 100% 硅酸盐成分来讨论。其主微量元素及 Nd 同位素数据请见表 3。在岩石地球化学硅碱图中,白杨沟中酸性熔结凝灰岩均落在亚碱性岩石的范围内(图 4a),大部分样品为安山-英安质,部分样品落在粗面安山-粗面岩的范围内,为方便起见,后文中均以安山质和英安质统称。这些样品具有较高的全碱含量,但 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 均小于 1(除了样品 BYG-17) 指示它们主要为钠质岩石。白杨沟中酸性熔结凝灰岩和流纹岩均显示准铝质-轻微过铝质的特征(图 4b 所示,铝饱和指数 A/CNK 均小于或近似等于 1.1, A/NK 在 1~2 之间)。总体上,白杨沟安山-英安质熔结凝灰岩相对 HREE 则较富集 LREE ($(\text{La}/\text{Yb})_N = 2.1 \sim 2.9$, $(\text{Dy}/\text{Yb})_N = 1.1 \sim 1.2$) 以及非常轻微的负 Eu 至正 Eu 异常 ($\delta\text{Eu} = 0.8 \sim 1.1$)。同时,富集大离子亲石元素(LILE),亏损高场强元素(HFSE),并显示强烈的 Nb-Ta、Ti 负异常和 Pb 正异常以及轻微 Sr 的负-正异常。这些类似岛弧的特征非常相似与其共生的枕状/块状玄武岩,但较之玄武岩,它们更富集 LILE、更亏损 Ti 而相对富集 Sr。白杨沟流纹岩大部分微量元素与安山-英安质熔结凝灰岩相似,不过具有更富集 LREE ($(\text{La}/\text{Yb})_N = 4.6 \sim 5.7$, $(\text{Dy}/\text{Yb})_N = 1.2 \sim 1.4$) 和 Nb-Ta,更亏损 Eu ($\delta\text{Eu} = \sim 0.3$)、Ti 和 Sr(图 5)。白杨沟安山-英安质熔结凝灰岩的 Nd 同位素测试数据将回算到 311Ma(表 3)。这些样品具有非常正的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值($+5.9 \sim +7.5$),以及年轻的一阶段 Sm-Nd 模式年龄(554~755Ma)。

3 岩石成因

3.1 白杨沟火山岩的喷发时限

本文作者曾报道了白杨沟火山岩剖面中英安质熔结凝灰岩(BYG-14)的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄(Xie *et al.*, 2016a)。BYG-14 中挑选了 >300 颗锆石,其中绝大多数锆石

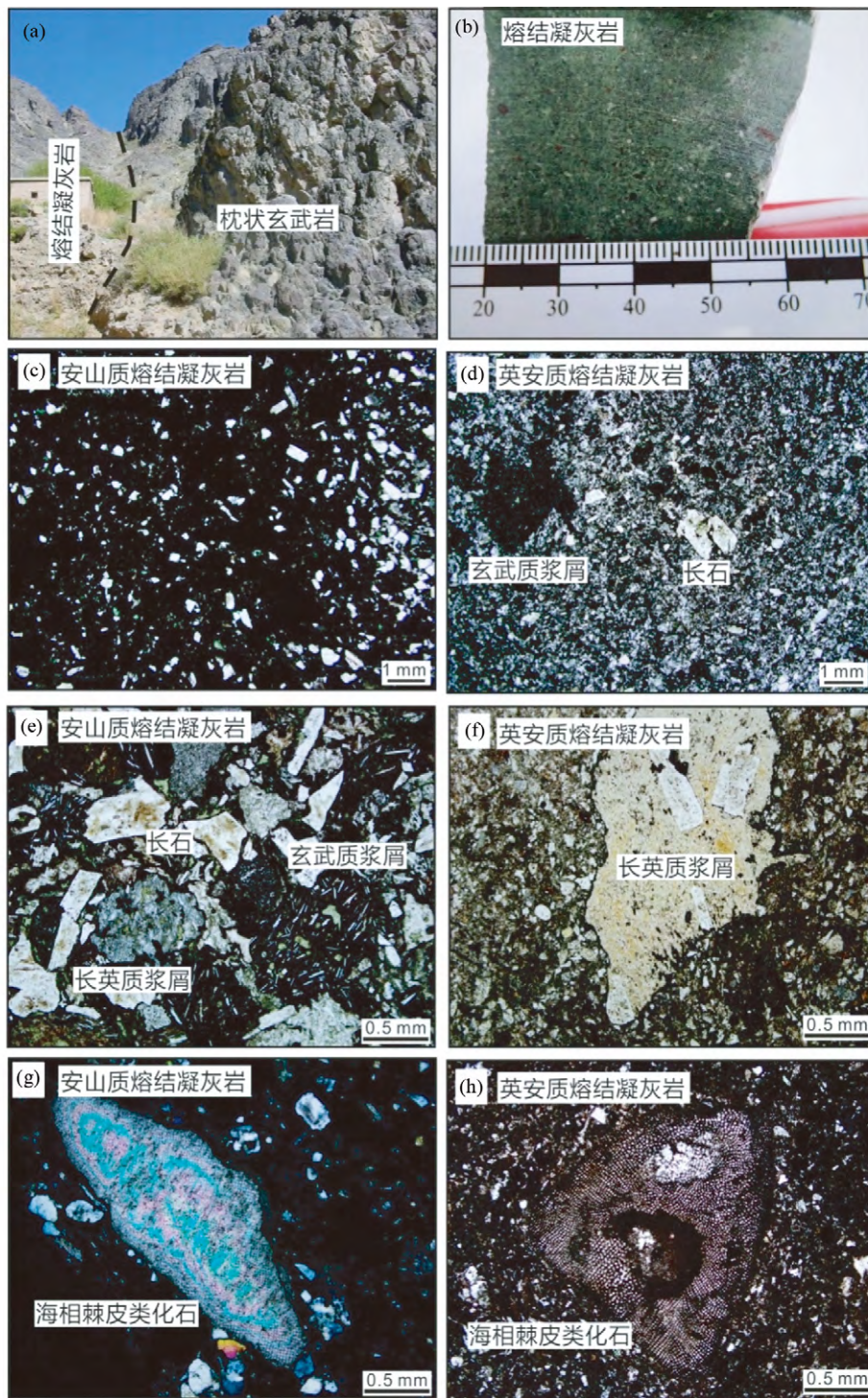


图3 野外特征及镜下照片

(a) 白杨沟枕状玄武岩与中酸性火山岩的野外接触关系为整合接触关系; (b) 熔结凝灰岩的手标本照片; (c-f) 中酸性熔结凝灰岩显微镜下照片; (g-h) 熔结凝灰岩中发现海相棘皮类化石

Fig. 3 Field characteristics and photomicrographs

(a) field photos showing the conformable contact of the Baiyanggou pillow basaltic lavas with the felsic ignimbrite; (b) hand specimen of a typical ignimbrite; (c-f) photomicrographs showing the typical textures of the andesite-dacitic ignimbrites; (g, h) photomicrographs showing the marine echinoderm fossils

表3 白杨沟中酸性熔结凝灰岩全岩主(wt%)、微量($\times 10^{-6}$)元素及Nd同位素数据

Table 3 Compositions of major (wt%), trace ($\times 10^{-6}$) element and Nd isotope of the Baiyanggou felsic ignimbrites

样品号	BYG-13	BYG-15	BYG-20	BYG-21	BYG-22	BYG-23	BYG-24	BYG-14	BYG-16	BYG-17	BYG-18	BYG-19	
岩性	安山质熔结凝灰岩						英安质熔结凝灰岩						
SiO ₂	57.5	60.1	62.2	60.0	59.8	61.9	60.1	69.0	66.1	65.3	71.3	69.2	
TiO ₂	1.24	0.94	1.03	0.94	0.97	0.90	1.12	0.69	0.84	0.84	0.63	0.75	
Al ₂ O ₃	16.5	14.7	12.9	14.4	15.6	15.6	15.0	12.5	14.5	15.8	10.8	11.9	
Fe ₂ O ₃ ^T	10.2	7.08	11.2	7.20	8.62	8.54	10.2	6.32	6.55	5.52	5.64	8.39	
MnO	0.19	0.14	0.09	0.15	0.13	0.17	0.21	0.10	0.10	0.14	0.10	0.10	
MgO	4.36	4.24	1.48	4.40	2.05	3.94	4.50	1.24	2.54	1.97	1.37	1.90	
CaO	2.78	6.95	4.76	7.22	6.07	1.49	2.15	3.91	4.39	2.55	5.66	3.18	
Na ₂ O	3.92	3.30	5.46	3.36	5.56	5.81	5.61	5.44	4.39	1.73	2.79	3.05	
K ₂ O	3.01	2.41	0.69	2.21	1.02	1.61	0.86	0.65	0.40	5.97	1.62	1.39	
P ₂ O ₅	0.25	0.16	0.17	0.16	0.22	0.10	0.21	0.13	0.17	0.18	0.15	0.14	
LOI	3.09	4.24	3.08	4.39	3.61	2.38	3.06	2.33	2.12	2.00	3.72	1.83	
Total	99.7	99.8	99.7	99.8	99.6	99.7	99.7	99.8	100.5	99.7	99.6	99.6	
V	115	104	208	113	148	183	174	81.7	112	29.3	69.3	148	
Cr	14.0	69.7	12.5	73.6	14.8	36.3	21.0	14.7	8.61	5.73	24.3	8.25	
Ni	5.82	24.45	8.47	25.9	8.38	8.10	8.75	6.36	7.45	1.82	11.2	7.74	
Ga	17.6	14.4	11.0	14.4	17.0	14.4	17.0	11.0	16.7	17.8	10.2	12.5	
Rb	29.8	26.1	7.41	23.3	8.96	14.5	8.34	6.18	4.36	103.1	17.6	14.8	
Sr	239	359	172	363	245	190	156	250	152	409	182	180	
Y	39.0	30.8	21.1	30.3	34.5	17.5	27.8	22.1	21.7	43.7	23.7	25.1	
Zr	138	127	65.0	125	117	68.1	94.6	94.0	89.2	141	80.4	91.1	
Nb	2.95	2.99	1.54	2.91	2.43	1.86	2.15	2.48	1.96	2.92	1.99	1.83	
Ba	861	453	119	409	257	281	222	163	129	1325	350	301	
La	12.9	11.0	9.18	10.7	12.3	6.77	9.55	9.66	9.24	12.9	9.32	11.2	
Ce	31.9	26.6	20.0	25.8	28.8	16.8	22.3	21.9	21.8	32.7	20.7	24.2	
Pr	4.71	3.77	2.75	3.66	4.05	2.47	3.31	3.08	3.10	4.92	2.94	3.17	
Nd	22.7	17.7	12.9	17.4	19.7	11.9	15.8	14.2	15.0	24.0	13.7	14.8	
Sm	5.95	4.58	3.22	4.35	5.04	3.13	4.19	3.49	3.83	6.42	3.5	3.79	
Eu	1.82	1.35	0.968	1.32	1.55	1.15	1.31	1.00	1.19	2.09	0.997	1.12	
Gd	6.51	5.15	3.39	4.92	5.37	3.28	4.61	3.80	3.82	7.10	3.63	3.97	
Tb	1.18	0.903	0.624	0.889	0.892	0.587	0.800	0.654	0.665	1.263	0.62	0.678	
Dy	7.46	5.53	3.97	5.37	5.86	3.56	4.92	4.05	4.11	7.92	3.92	4.34	
Ho	1.59	1.19	0.797	1.17	1.30	0.725	1.06	0.849	0.838	1.66	0.844	0.925	
Er	4.58	3.38	2.28	3.32	3.76	2.09	3.03	2.39	2.45	4.80	2.41	2.73	
Tm	0.691	0.506	0.345	0.497	0.539	0.303	0.458	0.354	0.369	0.724	0.357	0.410	
Yb	4.39	3.28	2.25	3.24	3.58	1.96	2.98	2.38	2.45	4.64	2.36	2.73	
Lu	0.683	0.504	0.359	0.489	0.571	0.304	0.458	0.362	0.370	0.734	0.365	0.426	
Hf	4.16	3.47	1.85	3.38	3.566	1.90	2.65	2.54	2.571	4.05	2.371	2.661	
Ta	0.209	0.224	0.092	0.209	0.177	0.123	0.151	0.165	0.141	0.191	0.142	0.128	
Pb	6.98	5.70	3.29	5.10	10.5	5.71	3.65	4.94	5.19	5.80	3.59	4.40	
Th	2.73	2.58	1.20	2.36	2.04	1.54	1.91	2.50	1.55	1.96	1.75	1.62	
U	0.963	0.972	0.631	0.836	0.847	1.06	0.732	0.728	0.502	0.704	0.766	0.579	
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	0.512903		0.512909		0.512936		0.512900		0.512842	0.512935	0.512951	0.512861	0.512918
(¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd) _i	0.512584		0.512602		0.512621		0.512574		0.512540	0.512621	0.512622	0.512545	0.512603
$\epsilon_{Nd}(t)$	6.8		7.1		7.5		6.6		5.9	7.5	7.5	6.0	7.1
t_{DM} (Ma)	664		586		557		717		722	554	586	755	602

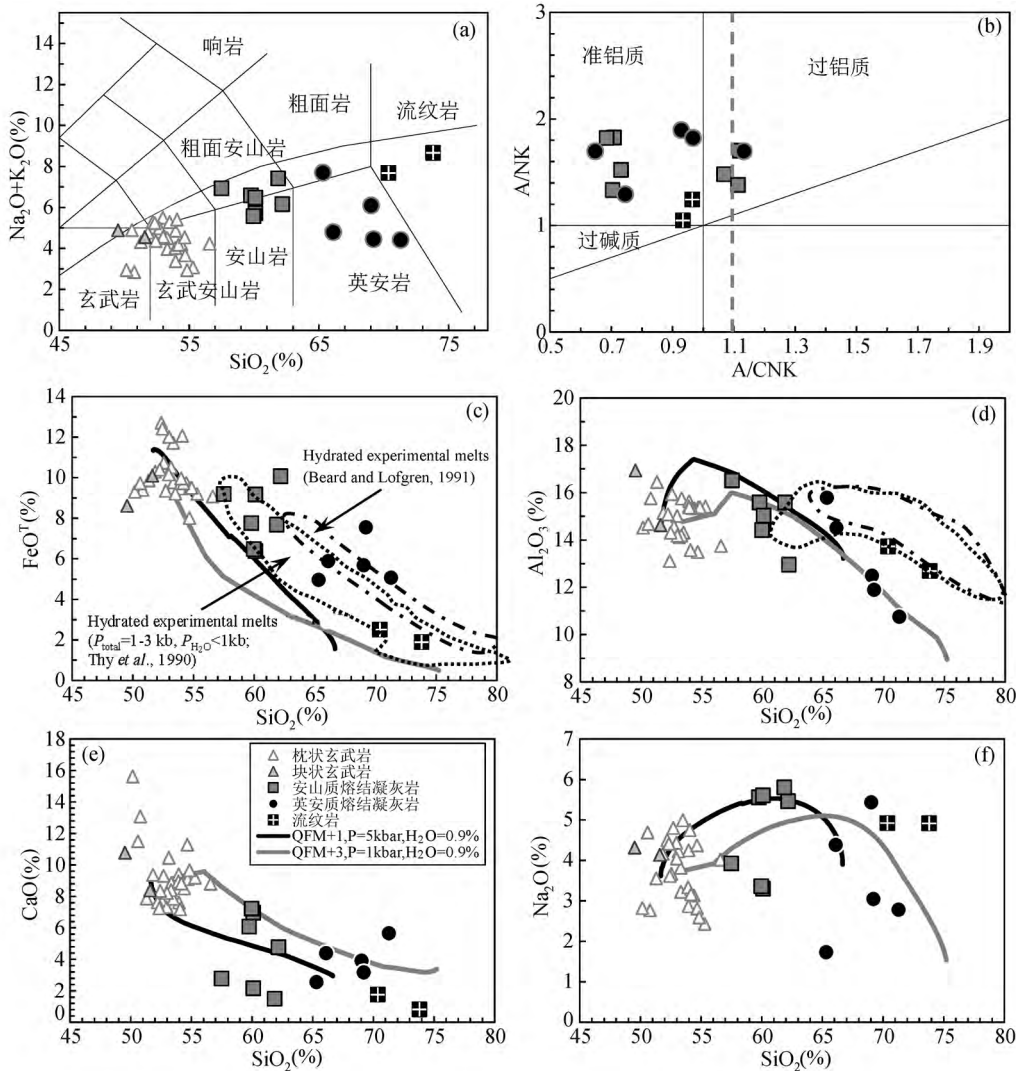


图4 白杨沟中酸性熔结凝灰岩岩石地球化学图解

(a) 硅碱图(TAS图解);(b) A/NK-A/CNK图解;(c-f)部分氧化物与SiO₂的二元相关图,图中的曲线为MELTS计算的不同条件下岩浆结晶过程中熔体的成分曲线。阴影区域为含水玄武质和安山质岩石部分熔融的实验岩石学区域(Thy et al., 1990; Beard and Lofgren, 1991);白杨沟流纹岩、块状玄武岩与枕状玄武岩的数据引自Chen et al. (2011)、熊发挥等(2011)和Xie et al. (2016a)图5、图7数据来源同此图

Fig. 4 Diagrams of geochemistry from the Baiyanggou felsic ignimbrites

(a) total alkalis vs. silica (TAS); (b) A/NK vs. A/CNK; (c-f) binary diagrams of major oxides versus SiO₂, the curves are the liquid curves calculated by MELTS program under different conditions. The shadow fields are after previous experimental melts of hydrated basaltic and andesitic rocks (Thy et al., 1990; Beard and Lofgren, 1991); data of the Baiyanggou basalts and rhyolites from Xiong et al. (2011), Chen et al. (2011) and Xie et al. (2016a), also in Fig. 5 and Fig. 7

物理性质基本相同,粒径100~300 μm不等、透明、短柱状,发育典型的振荡环带,显示典型的酸性岩浆锆石的特征,且不发育继承锆石核,无变质反应边。所测的20个锆石具有高但较分散的U(144 × 10⁻⁶ ~ 1925 × 10⁻⁶,但 < 2000 × 10⁻⁶)和Th(105 × 10⁻⁶ ~ 4070 × 10⁻⁶),具有高的Th/U比值(0.66 ~ 2.11),也指示了其岩浆成因。同时,这20个测试点的²⁰⁶Pb/²³⁸U数据误差均小于2%,和²⁰⁷Pb/²³⁵U构成了一个非常和谐的²⁰⁶Pb/²³⁸U加权平均年龄311 ± 2Ma(MSWD = 0.97)。另外,如图3g, h所示,作者在白杨沟熔结凝灰岩中发现了海相棘皮类化石(与原中国科学院南京地质古生物研

究所林日白研究员邮件通讯所得)。结合枕状玄武岩为水下喷发的产物以及区域上大量发育枕状玄武岩(指示存在广大的水域)的特征,我们不难推测出白杨沟火山岩剖面应为一套海相火山岩建造。Chen et al. (2011)和Shu et al. (2011)也分别报道了白杨沟火山岩剖面4个锆石U-Pb年龄(表1)除了1个辉长岩脉为SHRIMP所测,其他3个年龄均为LA-ICP-MS所得。他们所得年龄比本文作者所得到的年龄(Xie et al., 2016a)年轻了15Ma,指示白杨沟火山岩可能喷发于早二叠世。但是,LA-ICP-MS相对SHRIMP方法,其测试灵敏度较后者低,且不能直接测定锆石中的普通铅,不能

有效地进行普通铅的校正, 从而所获的锆石 U-Pb 年龄可信度比 SHRIMP 方法低。不少学者在博格达祁家沟组地层中发现珊瑚、腕足、有孔虫、苔藓虫、海百合茎化石等海相化石以及海相碎屑岩-碳酸盐岩岩石组合(见表 2, 郑有伟等, 2015; 刘松柏等, 2017), 而在早二叠世地层(如梧桐窝子组、茆茆槽子组、石人沟组)中发现了陆相的碳化木(*Prototaxoxylon*)、羊齿、科达和盘穗属等植物化石以及陆相粗粒碎屑岩组合(新疆维吾尔自治区地质局, 1965; 新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1993; 初建朋, 2016; Wan *et al.*, 2016), 同时早二叠世发育红色巨厚层陆相磨拉石建造(舒良树等, 2005)。这些研究表明博格达隆起带晚石炭世应为浅海-滨海环境, 而进入二叠纪则转换成陆相环境。结合博格达隆起带石炭-二叠纪沉积相的研究, 我们认为白杨沟火山岩剖面应该形成于晚石炭世, 隶属祁家沟组, ~311Ma 更接近它的喷发年龄。

3.2 白杨沟酸性岩的成因

白杨沟酸性熔结凝灰岩和流纹岩均显示准铝质-轻微过铝质的特征(图 4b 所示), 暗示他们应属于 I 型或 A 型酸性岩(Barbarin, 1999; Chappell and White, 1992)。因为酸性熔结凝灰岩一般为岩浆混合成因, 其化学成分不能代表纯岩浆本身的特征, 故我们用流纹岩去进一步讨论白杨沟酸性岩的地球化学性质。如图 6a 所示, 2 个流纹岩的样品 1 个在 A 型酸性岩的范围内, 1 个在 I&S 型的范围内; 而图 6b 中 2 个流纹岩均落在 I&S 型的范围内。虽然流纹岩没有同位素数据, 但这些熔结凝灰岩具有非常高的正 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值(+5.9 ~ +7.5), 故我们更偏向性认为白杨沟酸性岩属于 I 型岩石类型, 其成因很可能是新生玄武质岩浆直接经过高程度的结晶分异作用形成, 又或者是新生玄武质地壳(岩石)部分熔融形成。前人研究一般认为 10km³ 的玄武质岩浆经过结晶分异或者 10km³ 的玄武质岩石经过部分熔融可形成 1km³ 的流纹岩。而白杨沟地表所出露的玄武岩与流纹岩的体积比最大约 8:1(图 2)。如果计算上酸性熔结凝灰岩的体积, 根据质量守恒定律, 白杨沟枕状/块状玄武岩很难形成如此多的中酸性岩。在图 4c-e 氧化物相关图解中, 玄武岩与中酸性岩具有一定的线性关系。在这里我们用 MELTS 软件(Chiorso and Sack, 1995)进行模拟计算。初始岩浆选取熊发挥等(2011)发表的 07Y-524 样品成分为代表, 因为这个样品具有最高的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值(+9.8)、最小的 La 值以及基本无 Eu 异常($\delta Eu = \sim 1.02$)。岩浆水的含量选取 Xie *et al.* (2016a) 报道的枕状玄武岩的岩浆水含量 ~0.9%。根据 MELTS 计算, 低压或者高氧逸度可以使玄武岩的结晶分异熔体更接近酸性的流纹质成分, 然而作者尝试了各种不同压力和氧逸度的条件也很难模拟出白杨沟酸性岩的成分(图 4c-f)。另外, 根据 Chen *et al.* (2011) 报道的白杨沟流纹岩和玄武岩的锆石 Hf 同位素显示, 流纹岩锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 的值主要为 -5.8 ~ +2(除了 2 个为 +6.2 和 +8.1), 玄武岩锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值大部

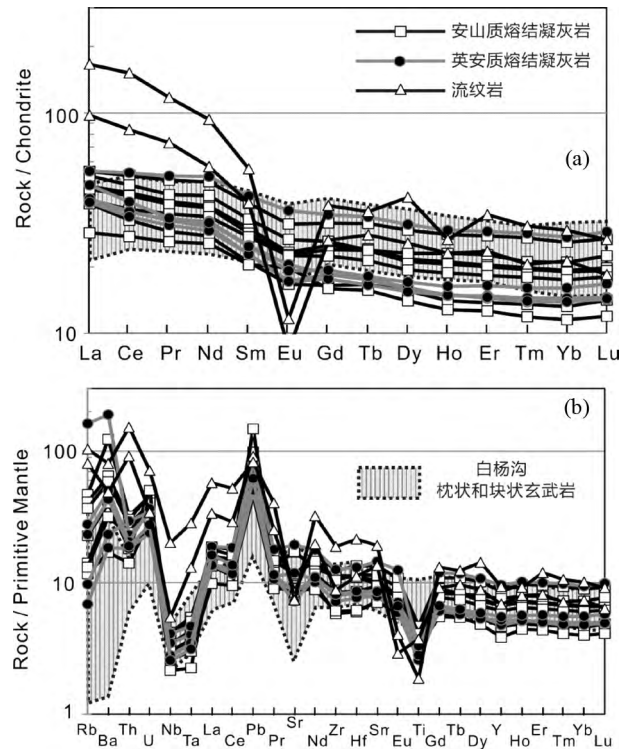


图 5 白杨沟酸性熔结凝灰岩球粒陨石标准化 REE 配分模式图(a)和原始地幔标准化不相容元素蛛网图(b) (标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE diagrams (a) and primitive mantle-normalized multi-element variation diagrams (b) for the Baiyanggou felsic ignimbrites (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

分为 +4 ~ +19.1(除了 5 个在 -0.5 ~ +1.5 之间)。结合熔结凝灰岩和流纹岩具有正的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值(+5.9 ~ +7.5) 以及岛弧特征的微量元素性质, 以上研究表明白杨沟玄武岩的结晶分异作用很难形成如此之多, 与其共生的流纹岩和熔结凝灰岩。这些酸性岩很可能是由新生岛弧玄武质地壳(岩石)经过部分熔融所形成的产物。

Pin and Paquette (1997) 提出玄武质地壳需要其含水或者有额外的热源才能发生部分熔融, 然而白杨沟中酸性岩的低锆饱和温度($T_{Zr} = 706 \sim 798^\circ\text{C}$) 指示并没有额外热源的加入。不少学者通过含水玄武质和安山质岩石部分熔融的实验岩石学研究表明水能促使玄武质岩石发生部分熔融并形成流纹质熔体(Thy *et al.*, 1990; Beard and Lofgren, 1991)。如图 4c, d 所示, 白杨沟流纹岩和部分熔结凝灰岩很好地投影在含水玄武质和安山质岩石部分熔融的实验岩石学区域内。同时, 前人研究表明含水玄武质岩石发生部分熔融, 可以导致斜长石、磁(钛)铁矿和磷灰石的残留(Thy *et al.*, 1990; Beard and Lofgren, 1991), 这与白杨沟流纹岩具有明显的 Eu、Ti、Sr 负异常以及低的 P 含量的特征相一致(图 5)。流纹岩很可能代表新生地壳部分熔融的直接产物。

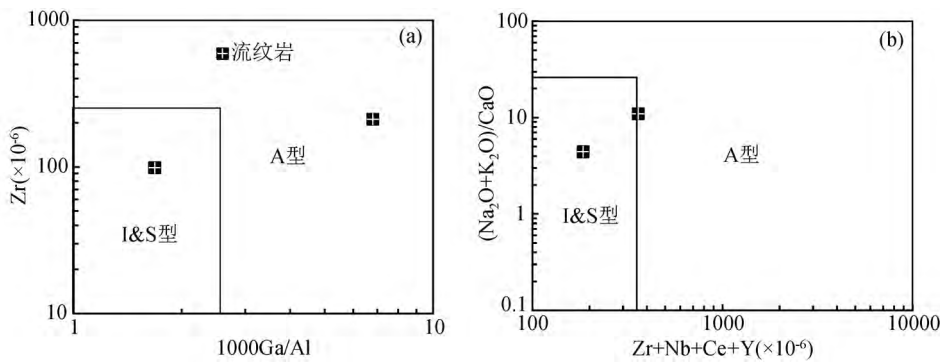


图6 白杨沟火山岩的 $Zr-1000Ga/Al$ (a) 和 $(Na_2O + K_2O) / CaO - (Zr + Nb + Ce + Y)$ (b) 二元相关图(据 Whalen *et al.*, 1987) 白杨沟流纹岩的数据引自 Chen *et al.* (2011)

Fig. 6 Plots of Zr vs. $1000Ga/Al$ (a) and $(Na_2O + K_2O) / CaO$ vs. $(Zr + Nb + Ce + Y)$ (b) of the Baiyanggou volcanic rocks (after Whalen *et al.*, 1987)

Data source of the Baiyanggou rhyolites is from Chen *et al.* (2011)

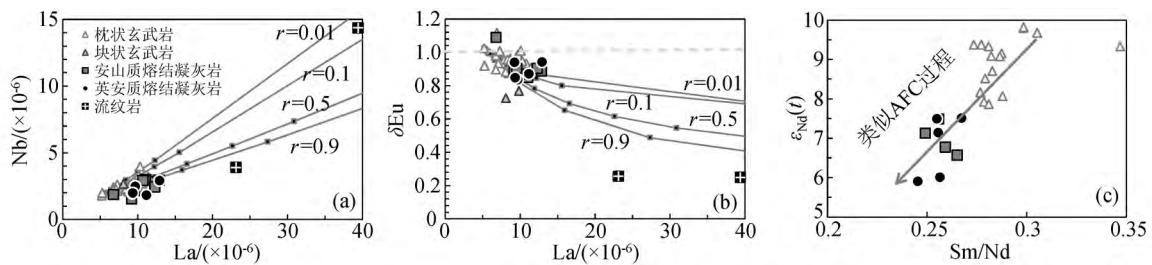


图7 白杨沟火山岩的 Nb (a) 和 δEu (b) 与 La 以及 $\epsilon_{Nd}(t)$ 与 Sm/Nd 的二元相关图(c)

图 a, b 中的计算曲线代表类似于同化混染-结晶分异曲线 (AFC; DePaolo, 1981) 每一个节点表示结晶分异递增 10% ,计算所用参数请参考表 4; 图 c 指示白杨沟中酸性熔结凝灰岩受岩浆混合作用和长石堆晶作用的影响

Fig. 7 Plots of Nb (a) and δEu (b) vs. La and $\epsilon_{Nd}(t)$ vs. Sm/Nd of the Baiyanggou volcanic rocks

The calculated solid curves in (a) and (b) represent assimilation-fractional crystallization trends (AFC; DePaolo, 1981) with ticks at 10% increments of crystallization, and the parameters for the calculation are listed in Table 4. Fig. 4(c) shows the effect of magma mingling and feldspar accumulation

另有部分熔结凝灰岩样品投影点在此范围之外,暗示其还受其他作用的影响。白杨沟安山-英安质熔结凝灰岩发育玄武质和长英质两类浆屑则表明他们还受岩浆混合作用 (magma mingling) 的影响,大量斜长石晶屑的发育以及负 Eu 至正 Eu 异常 ($\delta Eu = 0.8 \sim 1.1$) 则暗示这些岩石也受到了长石堆晶作用的影响。这一模式类似于 DePaolo (1981) 同化混染-结晶分异 (AFC) 模式。我们选取 07Y-524 样品(特点如前所述) 作为玄武岩端元、Chen *et al.* (2011) 报道的 641 号样品作为流纹岩端元,采用表 4 所列参数进行计算模拟,结果较好地模拟了白杨沟安山-英安质熔结凝灰岩的成分(图 7a, b) 而 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值和 Sm/Nd 比值的负相关关系也进一步证明了类似于 AFC 过程(图 7c)。另外,因为安山-英安质熔结凝灰岩的全岩成分很可能是不同岩浆的混合成分,不能代表地壳部分熔融所产生的岩浆成分,故很难探讨部分熔融程度、源区成分及深度差异等因素是否也影响了安山-英安质熔结凝灰岩和流纹岩之间的地球化学成分差异。

表 4 用于计算类似于 AFC 过程的端元组分和微量元素配分系数

Table 4 Selected two end-number samples and trace element partition coefficients for AFC model

Sample No.	Nb	La	Sm	Eu	Gd	文献
07Y-524	1.8	5.2	3.5	1.3	4.2	熊发挥等, 2011
641	3.9	23.1	6	0.5	5.4	Chen <i>et al.</i> , 2011
配分系数 D						
斜长石(75%)	0.01	0.01	0.02	0.3	0.05	
橄榄石(1%)	0.01	0.01	0.004	0.005	0.004	
单斜辉石(20%)	0.008	0.2	0.3	0.3	0.6	GERM website(http://www.earthref.org/databases/KDD/main.htm)
斜方辉石(1%)	0.001	0.032	0.015	0.03	0.034	
磁铁矿(3%)	0.07	0.7	0.026	0.025	0.018	
总配分系数	0.011	0.069	0.076	0.286	0.158	

4 构造指示意义

前人提出博格达地区在石炭-二叠纪时期应属于大陆裂谷环境, 和新疆其他地区的石炭-二叠纪火成岩共同构成一个超大的石炭-二叠纪大火成岩省, 并与塔里木地幔柱(290~280Ma)有关(顾连兴等, 2000, 2001; 夏林圻等, 2004; Xia *et al.*, 2008, 2012)。这个观点的主要依据是前人报道博格达地区发育石炭纪双峰式火山岩, 并指出具有“岛弧”特征的微量元素性质为强烈的地壳混染所致(顾连兴等, 2000, 2001; 夏林圻等, 2004; 高景刚等, 2014; 汪晓伟等, 2015a)。然而双峰式火山岩的发育只能指示伸展环境而非大陆裂谷环境, 高度亏损的 Sr-Nd-Hf-Pb 同位素也并不支持地壳混染的观点(Xie *et al.*, 2016a, b, c; Zhang *et al.*, 2017)。再者, 前人的研究多聚焦在火山熔岩而忽略了与其共生的中酸性熔结凝灰岩或凝灰岩的研究。本文对这些中酸性熔结凝灰岩和凝灰岩的研究, 弥补了玄武岩和流纹岩之间的成分间断。故我们推测前人报道的很多博格达石炭-二叠纪的火山岩剖面并非真正意义上的双峰式火山岩, 但很可能是由双峰式岩浆(玄武质和流纹质岩浆)形成(Xie *et al.*, 2016c)。Xie *et al.* (2016a, b) 将博格达晚石炭世发育的高铝玄武岩和枕状玄武岩与典型的二叠纪大陆溢流玄武岩(如西伯利亚、峨眉山、塔里木等)做对比, 发现博格达玄武岩无论在野外地质特征、还是地球化学以及矿物学组成上均显示与后者明显不同的特征, 很难支持前人提出的“地幔柱”模式。

高铝玄武岩为一特殊成因的岩石类型。现今所报道的高铝玄武岩多产于以下几种环境: (1) 岛弧环境, 如阿留申(Aleutian)、日本岛(Japan)、南桑威奇(South Sandwich)、伊豆-小笠原-马里亚纳(Izu-Bonin-Mariana)、瓦努阿图(Vanuatu)、汤加-克马德克(Tonga-Kermadec)以及千岛-勘察加(Kurile-Kamchatka)等岛弧(Kuno, 1960; Crawford *et al.*, 1987; Sisson and Grove, 1993; Ozerov, 2000); (2) 洋中脊环境, 如加拉帕戈斯(Galapagos)等洋中脊(Eason and Sinton, 2006)。博格达高铝玄武岩形成于晚石炭世, 其岛弧玄武岩的地球化学特征又指示博格达地区在晚石炭世不是板内环境, 很可能是一个岛弧, 甚至是一个洋内岛弧的构造环境。另外指示博格达晚石炭世为洋内岛弧环境的证据还有: (1) 整个北天山缺失古老的前寒武地层, 出露的最老地层为奥陶-志留纪荒草坡组海相火山岩建造(马家常, 1999)。在博格达隆起带出露最老的地层是泥盆纪海相的火山-沉积建造; (2) 博格达在整个石炭纪时期, 均为浅海-滨海相火山-沉积建造; (3) 在泥盆-石炭纪博格达多发育岛弧玄武岩和安山岩(马瑞士等, 1997)。一个完整的岛弧体系应包括海沟(trench)、前弧(fore-arc)、后弧(rear-arc)和弧后盆地(back-arc basin)(Ishizuka *et al.*, 2009)。Izu-Bonin 岛弧位于环太平洋造山带西缘, 是现今为数不多研究最为详尽的岛弧之

一。本文作者进一步将博格达石炭纪玄武岩与 Izu-Bonin 岛弧体系的前弧和后弧以及弧后玄武岩做对比研究, 结果表明博格达玄武岩的全岩地球化学以及矿物学特征与 Izu-Bonin 后弧和弧后玄武岩非常相似(Xie *et al.*, 2016a)。发育在博格达北边的卡拉麦里蛇绿岩和西边的巴音沟蛇绿岩均为 SSZ 型蛇绿岩, 是目前报道的天山造山带中最年轻且距离博格达山最近的蛇绿岩套(325~345Ma; Jian *et al.*, 2005; 徐学义等, 2006a, b; 汪邦耀等, 2009) 其很可能代表着北天山洋的洋壳残片(Xiao *et al.*, 2004, 2008; Han *et al.*, 2010)。然而, 蛇绿岩套的形成年龄并不能代表大洋消失或闭合的最后时限。一般情况下, 大洋的闭合时限往往晚于蛇绿岩套的形成时代(Dilek and Furnes, 2011, 2014)。故我们推测博格达晚石炭世为洋内岛弧后弧或弧后环境的形成与北天山洋向南俯冲有关(马瑞士等, 1997; Laurent-Charvet *et al.*, 2003; Xiao *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2009; Yuan *et al.*, 2010; Wali *et al.*, 2017)。

部分学者认为北天山洋在早石炭世就已经闭合, 晚石炭世-二叠纪为碰撞造山后环境(Han *et al.*, 2010; Chen *et al.*, 2011)。这种观点的主要依据为 Han *et al.* (2010) 报道的北天山巴音沟地区发育一个侵入到巴音沟蛇绿岩中约 316Ma 的“钉合岩体”(四棵树花岗岩)。这个“钉合岩体”被认为是碰撞造山后 A2 型花岗岩体。但是, 司国辉等(2014)报道称四棵树花岗岩其 SiO₂ 含量变化非常大, 从 58%~74% 均有, 且显示准铝质 I 型的特征。另外, 其锆饱和和温度变化较小($T_zr = 792 \sim 842^\circ\text{C}$), 落在典型 A 型和 I 型花岗岩的重叠区域(King *et al.*, 1997; 钟玉婷和徐义刚, 2009; Liu *et al.*, 2013)。其实天山造山带晚石炭世主要发育 I 型花岗岩类(Zhu *et al.*, 2009; Tang *et al.*, 2010, 2014; 童英等, 2010; Liu *et al.*, 2013; 闫永红等, 2013; Zhang *et al.*, 2016) 相反 A 型花岗岩类绝大多数形成于早二叠世(Tang *et al.*, 2010; Yuan *et al.*, 2010; Zhang and Zou, 2013; Li *et al.*, 2015)。结合博格达石炭纪海相至二叠纪陆相古环境的转变, 我们认为博格达隆起带从岛弧俯冲环境转变到板内环境很可能发生在石炭-二叠纪界限处。但也有少数 A 型花岗岩形成于晚石炭世末。这些晚石炭世 A 型花岗岩的发育可能暗示其构造属性的转换不是突变过程, 而更像一个渐变过程。因为塑性的岛弧地壳相对刚性的大陆地壳, 其碰撞作用相对非常柔和且碰撞时间短(一般 < 10Ma), 从而表现出渐变的碰撞造山作用。例如, 现今东南亚地区的哈马黑拉岛弧(Halmahera)和桑义赫岛弧(Sangihe)的弧-弧碰撞作用(Hall, 1996; Charlton, 2000), 北美西部瓦洛厄岛弧(Wallowa)和奥兹费里岛弧(Olds Ferry)的弧-弧碰撞作用(Dorsey and LaMaskin, 2007)。故我们大胆推测, 博格达地区石炭-二叠纪构造属性的转变很可能与东准噶尔弧和博格达弧在石炭-二叠纪界限时期发生的弧-弧碰撞作用有关(马瑞士等, 1997; Xiao *et al.*, 2004, 2013; Yuan *et al.*, 2010; Shu *et al.*, 2011; Wilhem *et al.*, 2012)。

5 结论

中国北天山博格达隆起带白杨沟地区发育的安山-英安质熔结凝灰岩和流纹岩属于 I 型酸性岩,与枕状玄武岩及块状玄武岩整合接触。海相棘皮类化石的发现以及锆石 SHRIMP U-Pb 年龄(~311Ma) 指示这套白杨沟火山岩应属于晚石炭世祁家沟组。安山-英安质熔结凝灰岩的发现表明白杨沟火山岩剖面并非双峰式火山岩,但与双峰式岩浆(玄武质和流纹质岩浆)有密切的成因关系。本文研究表明安山-英安质熔结凝灰岩和流纹岩不是与其共生的玄武岩高度结晶分异的产物,而是由含水的新生岛弧玄武质地壳(岩石)部分熔融形成的产物。同时,安山-英安质熔结凝灰岩还受到了岩浆混合作用、长石的堆晶作用的影响。博格达晚石炭世应为洋内岛弧后弧或弧后环境,与北天山洋向南俯冲有关。博格达隆起带石炭-二叠纪构造属性的转变很可能与东准噶尔弧和博格达弧在石炭-二叠纪界限时期发生的弧-弧碰撞作用有关。

致谢 本次研究的野外工作是作者与中国科学院广州地球化学研究所陈义兵老师 2012 年共同完成的,在此特别感谢他在野外的全力相助。刘颖、胡光黔、涂湘林、任钟元、张乐以及北京离子探针中心的颜炳强等各位老师们在实验分析和数据处理过程中提供了便利条件和技术支持;承蒙两位匿名论文评审专家给予了非常宝贵的修改意见和建议;在此一并致以衷心的感谢!

References

Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. *Lithos*, 46(3): 605–626

Beard JS and Lofgren GE. 1991. Dehydration melting and water-saturated melting of basaltic and andesitic greenstones and amphibolites at 1, 3, and 6.9 kb. *Journal of Petrology*, 32(2): 365–401

Branney MJ and Kokelaar BP. 2002. *Pyroclastic Density Currents and the Sedimentation of Ignimbrites*. London: The Geological Society, 1–143

Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region (BGMRX). 1993. *Regional Geology of Xinjiang Autonomous Region*. Beijing: Geological Publishing House, 1–841 (in Chinese)

Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region. 1999. *Stratigraphy (Lithostratic) of Xinjiang Uygur Autonomous Region*. Wuhan: China University of Geosciences Press, 81–84 (in Chinese)

Chappell BW and White AJR. 1992. I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 83(1–2): 1–26

Charlton TR. 2000. Tertiary evolution of the Eastern Indonesia collision complex. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(5): 603–631

Chen XJ, Shu LS and Santosh M. 2011. Late Paleozoic post-collisional magmatism in the Eastern Tianshan Belt, Northwest China: New insights from geochemistry, geochronology and petrology of bimodal

volcanic rocks. *Lithos*, 127(3–4): 581–598

Chen XJ, Shu LS, Santosh M and Zhao XX. 2013. Island arc-type bimodal magmatism in the eastern Tianshan Belt, Northwest China: Geochemistry, zircon U-Pb geochronology and implications for the Paleozoic crustal evolution in Central Asia. *Lithos*, 168–169: 48–66

Chu JP. 2016. *Research on strata and paleontology of Late Paleozoic in Bogda stratigraphic subregion, East Tianshan Mountains*. Ph. D. Dissertation. Xi'an: Chang'an University (in Chinese with English summary)

Chu JP, Li Y, Guo JF, Xiao L and Zhang YM. 2016. Research progress on carboniferous strata in Bogda Area, Eastern Tianshan. *Northwestern Geology*, 49(2): 229–236 (in Chinese with English abstract)

Crawford AJ, Falloon TJ and Eggins S. 1987. The origin of island arc high-alumina basalts. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 97(3): 417–430

Cui FL, Wang XW, Ma ZP, Sun JM and Zhu XH. 2015. Comparison of genesis of Devonian volcanic rocks in the Bogda and Harlik areas and its tectonic implications. *Geology and Exploration*, 51(3): 519–533 (in Chinese with English abstract)

DePaolo DJ. 1981. Trace element and isotopic effects of combined wallrock assimilation and fractional crystallization. *Earth and Planetary Science Letters*, 53(2): 189–202

Dilek Y and Furnes H. 2011. Ophiolite genesis and global tectonics: Geochemical and tectonic fingerprinting of ancient oceanic lithosphere. *GSA Bulletin*, 123(3–4): 387–411

Dilek Y and Furnes H. 2014. Ophiolites and their origins. *Elements*, 10(2): 93–100

Dorsey RJ and LaMaskin TA. 2007. Stratigraphic record of Triassic–Jurassic collisional tectonics in the Blue Mountains Province, northeastern Oregon. *American Journal of Science*, 307(10): 1167–1193

Eason D and Sinton J. 2006. Origin of high-Al N-MORB by fractional crystallization in the upper mantle beneath the Galápagos Spreading Center. *Earth and Planetary Science Letters*, 252(3–4): 423–436

Gao J, Long LL, Klemd R, Qian Q, Liu DY, Xiong XM, Su W, Liu W, Wang YT and Yang FQ. 2009. Tectonic evolution of the South Tianshan orogen and adjacent regions, NW China: Geochemical and age constraints of granitoid rocks. *International Journal of Earth Sciences*, 98(6): 1221–1238

Gao J, Klemd R, Qian Q, Zhang X, Li JL, Jiang T and Yang YQ. 2011. The collision between the Yili and Tarim blocks of the southwestern Altaids: Geochemical and age constraints of a leucogranite dike crosscutting the HP-LT metamorphic belt in the Chinese Tianshan Orogen. *Tectonophysics*, 499(1–4): 118–131

Gao JG, Li WY, Zhou Y, Liu JC, Fan TB, Lu L and Zhou RH. 2013a. Geochemistry, zircon U-Pb ages and geological significance of the Liushugou Formation rhyolite in the Sepikou region, eastern Bogda, Xinjiang. *Geology and Exploration*, 49(4): 665–675 (in Chinese with English abstract)

Gao JG, Li WY, Guo XC, Zhou Yi, Liu JC, Fan TB and Zhou RH. 2013b. Studies on the geochemistry, zircon U-Pb age and geological significance of Diabase in the Sepikou region, eastern Bogda, Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 31(2): 117–123 (in Chinese with English abstract)

Gao JG, Li WY, Liu JC, Gao YX, Guo XC, Zhou Y and Fan TB. 2014. Geochemistry, zircon U-Pb age and Hf isotopes of Late Carboniferous rift volcanic in the Sepikou region, eastern Bogda, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 30(12): 3539–3552 (in Chinese with English abstract)

Gao JH, Wang XL, Fu GB, Song JX and Qin EP. 2004. The influence of relative sea level changes to the replacement of brachiopods communities: A case study of Taoxigou Carboniferous section of the north margin of Turpan-Hami basin. *Geoscience*, 18(3): 290–296 (in Chinese with English abstract)

Ghiorso MS and Sack RO. 1995. Chemical mass transfer in magmatic

- processes IV. A revised and internally consistent thermodynamic model for the interpolation and extrapolation of liquid–solid equilibria in magmatic systems at elevated temperatures and pressures. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 119(2–3): 197–212
- Goto A and Tatsumi Y. 1996. Quantitative analysis of rock samples by an X-ray fluorescence spectrometer (II). *The Rigaku Journal*, 13(2): 20–39
- Gu LX, Hu SX, Yu CS, Li HY, Xiao XJ and Yan ZF. 2000. Carboniferous volcanics in the Bogda orogenic belt of eastern Tianshan: Their tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 16(3): 305–316 (in Chinese with English abstract)
- Gu LX, Hu SX, Yu CS, Zhao M, Wu CZ and Li HY. 2001. Intrusive activities during compression–extension tectonic conversion in the Bogda intracontinental orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2): 187–198 (in Chinese with English abstract)
- Guo LN, Li Y, Xiao L, Zhou JR and Cai Y. 2013. Sedimentary characteristic and implication of Late Carboniferous Qijiagou Formation in Balikun County, Xinjiang. *Geological Review*, 59(Suppl.): 210–211 (in Chinese)
- Hall R. 1996. Reconstructing Cenozoic SE Asia. In: Hall R and Blundell D (eds.). *Tectonic Evolution of Southeast Asia*. Geological Society, London, Special Publications, 106(1): 153–184
- Han BF, Wang SG, Jahn BM, Hong DW, Kagami H and Sun YL. 1997. Depleted-mantle source for the Ulungur River A-type granites from North Xinjiang, China: Geochemistry and Nd–Sr isotopic evidence, and implications for Phanerozoic crustal growth. *Chemical Geology*, 138(3–4): 135–159
- Han BF, Guo ZJ, Zhang ZC, Zhang L, Chen JF and Song B. 2010. Age, geochemistry, and tectonic implications of a Late Paleozoic stitching pluton in the North Tian Shan suture zone, western China. *GSA Bulletin*, 122(3–4): 627–640
- Han BF, He GQ, Wang XC and Guo ZJ. 2011. Late Carboniferous collision between the Tarim and Kazakhstan–Yili terranes in the western segment of the South Tian Shan Orogen, Central Asia, and implications for the Northern Xinjiang, western China. *Earth-Science Reviews*, 109(3–4): 74–93
- Ishizuka O, Yuasa M, Taylor RN and Sakamoto I. 2009. Two contrasting magmatic types coexist after the cessation of back-arc spreading. *Chemical Geology*, 266(3–4): 274–296.
- Jahn BM, Wu FY and Chen B. 2000. Massive granitoid generation in Central Asia: Nd isotope evidence and implications for continental growth in the Phanerozoic. *Episodes*, 23(2): 82–92
- Jian P, Liu DY, Shi YR and Zhang FQ. 2005. SHRIMP dating of SSZ ophiolites from northern Xinjiang Province, China: Implications for generation of oceanic crust in the Central Asian Orogenic Belt. In: Sklyarov EV (ed.). *Structural and Tectonic Correlation across the Central Asia Orogenic Collage: Northeastern Segment*. Irkutsk, Russia: IEC SB RAS, 1–246
- Jin LY, Liu W, Zhu ZX and Zhao TY. 2014. U–Pb age, geochemistry and tectonic implications of mafic dyke in Sangeshan, Bogda. *Xinjiang Geology*, 32(3): 316–321 (in Chinese with English abstract)
- King PL, White AJR, Chappell BW and Allen CM. 1997. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan Fold Belt, Southeastern Australia. *Journal of Petrology*, 38(3): 371–391
- Kuno H. 1960. High-alumina basalt. *Journal of Petrology*, 1(2): 121–145
- Laurent-Charvet S, Charvet J, Monié P and Shu LS. 2003. Late Paleozoic strike-slip shear zones in eastern central Asia (NW China): New structural and geochronological data. *Tectonics*, 22(2): 1009
- Li NB, Niu HC, Shan Q and Yang WB. 2015. Two episodes of Late Paleozoic A-type magmatism in the Qunjisayi area, western Tianshan: Petrogenesis and tectonic implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 113: 238–253
- Li P, Liu W, Zhu ZX, Chen C, Jin LY, Xu SQ, Zhao TY and Chen BX. 2013. Geochemical characteristics, geochronology and its geological significance of quartz diorite in Sangeshan area, west of Bogda, Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 31(3): 162–166 (in Chinese with English abstract)
- Li XH, Li ZX, Wingate MTD, Chung SL, Liu Y, Lin GC and Li WX. 2006. Geochemistry of the 755Ma Mundine Well dyke swarm, northwestern Australia: Part of a Neoproterozoic mantle superplume beneath Rodinia? *Precambrian Research*, 146(1–2): 1–15
- Liang T, Guo XC, Gao JG, Fan TB, Qin HF, Zhou RH and Hei H. 2011. Geochemistry and structure characteristic of Carboniferous volcanic rocks in the eastern of Bogeda Mountain. *Xinjiang Geology*, 29(3): 289–295 (in Chinese with English abstract)
- Liu HQ, Xu YG and He B. 2013. Implications from zircon-saturation temperatures and lithological assemblages for Early Permian thermal anomaly in Northwest China. *Lithos*, 182–183: 125–133
- Liu SB, Li CS, Dou H, Wu PD, Peng ZJ and Cui YB. 2017. The geological characteristics and sedimentary facies analysis of later Carboniferous epoch Qijiagou Formation in Magouliang area of Bogeda Mountain, Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 35(2): 139–144 (in Chinese with English abstract)
- Liu WB. 1993. C–O isotopes and Palaeoenvironment of the Carboniferous–Permian carbonate rocks from SW Bogda Mountains, Xinjiang. *Journal of Stratigraphy*, 17(2): 141–144 (in Chinese)
- Liu Y, Liu HC and Li XH. 1996. Simultaneous and precise determination of 40 trace elements in rock samples using ICP–MS. *Geochimica*, 25(6): 552–558 (in Chinese with English abstract)
- Ma JC. 1999. Study on the Huangcaopo group in the eastern Junggar. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 19(4): 52–55 (in Chinese with English abstract)
- Ma RS, Shu LS and Sun JQ. 1997. *Tectonic Evolution and Metallization in the Eastern Tianshan Belt, China*. Beijing: Geological Publishing House, 1–202 (in Chinese)
- Ozerov AY. 2000. The evolution of high-alumina basalts of the Klyuchevskoy volcano, Kamchatka, Russia, based on microprobe analyses of mineral inclusions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 95(1–4): 65–79
- Pin C and Paquette JL. 1997. A mantle-derived bimodal suite in the Hercynian Belt: Nd isotope and trace element evidence for a subduction-related rift origin of the Late Devonian Brévenne metavolcanics, Massif Central (France). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 129(2–3): 222–238
- Shi WX, Tian ST, Feng HG, Feng JP, Li Yan and Luo T. 2015. Zircon SHRIMP U–Pb dating and geological significances of Heigou granitic complex from Bogda orogenic, eastern Tianshan. *Journal of Guilin University of Technology*, 35(2): 251–256 (in Chinese with English abstract)
- Shu LS, Zhu WB, Wang B, Faure M, Charvet J and Cluzel D. 2005. The post-collision intracontinental rifting and olistostrome on the southern slope of Bogda Mountains, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 25–36 (in Chinese with English abstract)
- Shu LS, Wang B, Zhu WB, Guo ZJ, Charvet J and Zhang Y. 2011. Timing of initiation of extension in the Tianshan, based on structural, geochemical and geochronological analyses of bimodal volcanism and olistostrome in the Bogda Shan (NW China). *International Journal of Earth Sciences*, 100(7): 1647–1663
- Si GH, Su HP, Yang GH, Zhang C and Yang GX. 2014. Geological significance and geochemical characteristics of the Sikeshu pluton in North Tianshan, Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 32(1): 19–24 (in Chinese with English abstract)
- Sisson TW and Grove TL. 1993. Temperatures and H₂O contents of low–MgO high-alumina basalts. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 113(2): 167–184
- Song XY, Chen LM, Deng YF and Xie W. 2013. Syncollisional tholeiitic magmatism induced by asthenosphere upwelling owing to slab detachment at the southern margin of the Central Asian Orogenic Belt. *Journal of the Geological Society*, 170(6): 941–950
- Sparks RSJ, Self S and Walker GPL. 1973. Products of ignimbrite eruptions. *Geology*, 1(3): 115–118

- Sun GZ. 2009. The Carboniferous prototype basin analysis in Bogda region, Xinjiang, Northwest China. Master Degree Thesis. Xi'an: Northwest University (in Chinese with English summary)
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313–345
- Tan JY, Wang SF, Wu RJ, Zhang YY and Guo ZJ. 2010. Types and time of Carboniferous volcanic edifices in eastern Junggar, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 26(2): 440–448 (in Chinese with English abstract)
- Tang GJ, Wang Q, Wyman DA, Sun M, Li ZX, Zhao ZH, Sun WD, Jia XH and Jiang ZQ. 2010. Geochronology and geochemistry of Late Paleozoic magmatic rocks in the Lamasu-Dabate area, northwestern Tianshan (West China): Evidence for a tectonic transition from arc to post-collisional setting. *Lithos*, 119(3–4): 393–411
- Tang GJ, Chung SL, Wang Q, Wyman DA, Dan W, Chen HY and Zhao ZH. 2014. Petrogenesis of a Late Carboniferous mafic dike-granitoid association in the western Tianshan: Response to the geodynamics of oceanic subduction. *Lithos*, 202–203: 85–99
- Thy P, Beard JS and Lofgren GE. 1990. Experimental constraints on the origin of Icelandic rhyolites. *The Journal of Geology*, 98(3): 417–421
- Tian LP, Wang JR, Tang ZL, Yu M, Wang HT and Zhao ZX. 2010. Geochemical characteristic and tectonic significance of the Early Carboniferous volcanic rocks in eastern Bogda mountains of Xinjiang region. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 46(4): 30–36, 41 (in Chinese with English abstract)
- Tong Y, Wang T, Hong DW, Han BF, Zhang JJ, Shi XJ and Wang C. 2010. Spatial and temporal distribution of the Carboniferous-Permian granitoids in northern Xinjiang and its adjacent areas, and its tectonic significance. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(6): 619–641 (in Chinese with English abstract)
- Wali G, Wang B, Cluzel D and Zhong LL. 2017. Carboniferous-Early Permian magmatic evolution of the Bogda Range (Xinjiang, NW China): Implications for the Late Paleozoic accretionary tectonics of the SW Central Asian Orogenic Belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, doi: 10.1016/j.jseas.2017.07.045
- Walker GPL. 1983. Ignimbrite types and ignimbrite problems. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 17(1–4): 65–88
- Wan ML, Zhou WM, Yang W and Wang J. 2016. Charred wood of Prototoxylon from the Wuchiapingian Wutonggou Formation (Permian) of Dalongkou, northern Bogda Mountains, northwestern China. *Palaeoworld*, 25(1): 21–31
- Wang B, Cluzel D, Shu LS, Faure M, Charvet J, Chen Y, Meffre S and De Jong K. 2009. Evolution of calc-alkaline to alkaline magmatism through Carboniferous convergence to Permian transcurrent tectonics, western Chinese Tianshan. *International Journal of Earth Sciences*, 98(6): 1275–1298
- Wang B, Shu LS, Faure M, Jahn BM, Cluzel D, Charvet J, Chung SL and Meffre S. 2011. Paleozoic tectonics of the southern Chinese Tianshan: Insights from structural, chronological and geochemical studies of the Heiyingshan ophiolitic mélange (NW China). *Tectonophysics*, 497(1–4): 85–104
- Wang BY, Jiang CY, Li YJ, Wu HE, Xia ZD and Lu RH. 2009. Geochemistry and tectonic implications of Karamaili ophiolite in East Junggar of Xinjiang. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 29(3): 74–82 (in Chinese with English abstract)
- Wang JR, Li TD, Tian LP, Yu M, Wang HT, Zhao ZX and Tang ZL. 2010. Late Paleozoic tectono-magmatic evolution in Bogda Orogenic Belt, Xinjiang: Evidence from geochemistry of volcanic rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 26(4): 1103–1115 (in Chinese with English abstract)
- Wang XW, Xu XY, Ma ZP, Chen JL, Zhu XH, Sun JM and Cui FL. 2015a. Geochemical characteristics of the Late Carboniferous bimodal volcanic rocks in Jijitaizi area, eastern Bogda orogenic belt, and their geological significance. *Geology in China*, 42(3): 553–569 (in Chinese with English abstract)
- Wang XW, Cui FL, Sun JM, Zhu XH, Bai JK and Zhu T. 2015b. Geochemical characteristics and its significance of the Early Permian bimodal volcanic rocks in Jijitaizi area, east of the Bogda Orogenic Belt. *Northwestern Geology*, 48(4): 100–114 (in Chinese with English abstract)
- Wang YX, Gu LX, Zhang ZZ, Wu CZ, Zhang KJ, Li HM and Yang JD. 2006. Geochronology and Nd-Sr-Pb isotopes of the bimodal volcanic rocks of the Bogda rift. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1215–1224 (in Chinese with English abstract)
- Wang YX, Gu LX, Zhang ZZ, Wu CZ, Li HM and Yang JD. 2007. Sr-Nd-Pb isotope geochemistry of rhyolite of the Late Carboniferous Dashitou Group in eastern Tianshan. *Acta Petrologica Sinica*, 23(7): 1749–1755 (in Chinese with English abstract)
- Whalen JB, Currie KL and Chappell BW. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407–419
- Wilhem C, Windley BF and Stampfli GM. 2012. The Altaids of Central Asia: A tectonic and evolutionary innovative review. *Earth-Science Reviews*, 113(3–4): 303–341
- Xia LQ, Xia ZC, Xu XY, Li XM, Ma ZP and Wang LS. 2004. Carboniferous Tianshan igneous megaprovince and mantle plume. *Geological Bulletin of China*, 23(9–10): 903–910 (in Chinese with English abstract)
- Xia LQ, Xia ZC, Xu XY, Li XM and Ma ZP. 2008. Relative contributions of crust and mantle to the generation of the Tianshan Carboniferous rift-related basic lavas, northwestern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 31(4–6): 357–378
- Xia LQ, Xu XY, Li XM, Ma ZP and Xia ZC. 2012. Reassessment of petrogenesis of Carboniferous-Early Permian rift-related volcanic rocks in the Chinese Tianshan and its neighboring areas. *Geoscience Frontiers*, 3(4): 445–471
- Xiao L, Xu YG, Mei HJ, Zheng YF, He B and Pirajno F. 2004. Distinct mantle sources of low-Ti and high-Ti basalts from the western Emeishan large igneous province, SW China: Implications for plume-lithosphere interaction. *Earth and Planetary Science Letters*, 228(3–4): 525–546
- Xiao WJ, Han CM, Yuan C, Sun M, Lin SF, Chen HL, Li ZL, Li JL and Sun S. 2008. Middle Cambrian to Permian subduction-related accretionary orogenesis of Northern Xinjiang, NW China: Implications for the tectonic evolution of Central Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(2–4): 102–117
- Xiao WJ, Windley BF, Allen MB and Han CM. 2013. Paleozoic multiple accretionary and collisional tectonics of the Chinese Tianshan orogenic collage. *Gondwana Research*, 23(4): 1316–1341
- Xiao WJ, Windley BF, Sun S, Li JL, Huang BC, Han CM, Yuan C, Sun M and Chen HL. 2015. A tale of amalgamation of three Permian-Triassic collage systems in Central Asia: Oroclines, sutures, and terminal accretion. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 43: 477–507
- Xiao XC, Tang YQ, Feng YM, Zhu BQ, Li JY and Zhao M. 1992. Tectonic Evolution of the Northern Xinjiang and Its Adjacent Regions. Beijing: Geological Publishing House, 1–171 (in Chinese)
- Xie W, Luo ZY, Xu YG, Chen YG, Hong LB, Ma L and Ma Q. 2016a. Petrogenesis and geochemistry of the Late Carboniferous rear-arc (or back-arc) pillow basaltic lava in the Bogda Mountains, Chinese North Tianshan. *Lithos*, 244: 30–42
- Xie W, Xu YG, Chen YB, Luo ZY, Hong LB, Ma L and Liu HQ. 2016b. High-alumina basalts from the Bogda Mountains suggest an arc setting for Chinese Northern Tianshan during the Late Carboniferous. *Lithos*, 256–257: 165–181
- Xie W, Xu YG, Luo ZY, Liu HQ, Hong LB and Ma L. 2016c. Petrogenesis and geodynamic implications of the Late Carboniferous felsic volcanics in the Bogda belt, Chinese Northern Tianshan. *Gondwana Research*, 39: 165–179
- Xiong FH, Yang JS, Jia Y, Xu XZ, Chen SY, Li TF, Ren YF and Zuo GC. 2011. The pillow lava of Baiyanggou in Bogda, Xinjiang:

- Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic characteristics. *Geology in China*, 38(4): 838–854 (in Chinese with English abstract)
- Xu XY, Li XM, Ma ZP, Xia LQ, Xia ZC and Peng SX. 2006a. LA-ICPMS zircon U-Pb dating of gabbro from the Bayingou ophiolite in the Northern Tianshan Mountains. *Acta Geologica Sinica*, 80(8): 1168–1176 (in Chinese with English abstract)
- Xu XY, Xia LQ, Ma ZP, Wang YB, Xia ZC, Li XM and Wang LS. 2006b. SHRIMP zircon U-Pb geochronology of the plagiogranites from Bayingou ophiolite in North Tianshan Mountains and the petrogenesis of the ophiolite. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1): 83–94 (in Chinese with English abstract)
- Yan YH, Xue CJ, Zhang ZC, Ding ZX, Yang WH and Han ZH. 2013. Geochemistry and genesis of the Qunjisayi granite porphyry in the west of Awulale area, Western Tianshan Mountains. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 32(2): 139–153 (in Chinese with English abstract)
- Yuan C, Sun M, Wilde S, Xiao WJ, Xu YG, Long XP and Zhao GC. 2010. Post-collisional plutons in the Balikun area, East Chinese Tianshan: Evolving magmatism in response to extension and slab break-off. *Lithos*, 119(3–4): 269–288
- Zhang CL and Zou HB. 2013. Permian A-type granites in Tarim and western part of Central Asian Orogenic Belt (CAOB): Genetically related to a common Permian mantle plume? *Lithos*, 172–173: 47–60
- Zhang WF, Chen HY, Han JS, Zhao LD, Huang JH, Yang JT and Yan XL. 2016. Geochronology and geochemistry of igneous rocks in the Bailingshan area: Implications for the tectonic setting of Late Paleozoic magmatism and iron skarn mineralization in the eastern Tianshan, NW China. *Gondwana Research*, 38: 40–59
- Zhang Y, Li ZS, Nie F, Tian XL and Shi YH. 2015. Age, provenance and tectonic evolution of Late Paleozoic strata in Bogda Mountain, Xinjiang: Evidence from detrital zircon U-Pb geochronology. *Chinese Journal of Geology*, 50(1): 155–181 (in Chinese with English abstract)
- Zhang YY, Yuan C, Long XP, Sun M, Huang ZY, Du L and Wang XY. 2017. Carboniferous bimodal volcanic rocks in the Eastern Tianshan, NW China: Evidence for arc rifting. *Gondwana Research*, 43: 92–106
- Zhao TY, Xu SQ, Zhu ZX, Liu X and Chen C. 2014. Geological and geochemical features of carboniferous volcanic rocks in Bogda-Harlik Mountains, Xinjiang and their tectonic significances. *Geological Review*, 60(1): 115–124 (in Chinese with English abstract)
- Zheng YW, Guo JM, Zheng JJ, Wang YD and Xu SY. 2015. Late Paleozoic tectonic framework and evolution process of Bogda tectonic belt in Xinjiang. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 30(4): 588–593 (in Chinese with English abstract)
- Zhong YT and Xu YG. 2009. Characteristics of plume-related A-type granites: An example from the Emeishan Large Igneous Province. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 39(5): 828–838 (in Chinese with English abstract)
- Zhou DL. 2015. Carboniferous Paleogeographic characteristics in Hami region, Xinjiang. *Neijiangkeji*, 36(4): 83–84 (in Chinese)
- Zhu YF, Guo X, Song B, Zhang LF and Gu LB. 2009. Petrology, Sr-Nd-Hf isotopic geochemistry and zircon chronology of the Late Palaeozoic volcanic rocks in the southwestern Tianshan Mountains, Xinjiang, NW China. *Journal of the Geological Society*, 166(6): 1085–1099
- (3): 519–533
- 高金汉, 王训练, 傅国斌, 宋健兴, 秦恩鹏. 2004. 相对海平面变化对腕足动物群落取代的影响——以吐哈盆地北缘桃西沟上石炭统祁家沟组-奥尔土组剖面为例. *现代地质*, 18(3): 290–296
- 高景刚, 李文渊, 周义, 刘建朝, 范庭宾, 鲁麟, 周汝洪. 2013a. 新疆博格达东缘色皮口地区柳树沟组流纹岩地球化学、LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学及地质意义. *地质与勘探*, 49(4): 665–675
- 高景刚, 李文渊, 郭新成, 周义, 刘建朝, 范庭宾, 周汝洪. 2013b. 新疆博格达东缘色皮口一带辉绿岩地球化学、锆石 U-Pb 年龄及地质意义. *新疆地质*, 31(2): 117–123
- 高景刚, 李文渊, 刘建朝, 高云霞, 郭新成, 周义, 范庭宾. 2014. 新疆博格达东缘色皮口地区晚石炭世裂谷火山岩地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素研究. *岩石学报*, 30(12): 3539–3552
- 顾连兴, 胡受奚, 于春水, 李宏宇, 肖新建, 严正富. 2000. 东天山博格达造山带石炭纪火山岩及其形成地质环境. *岩石学报*, 16(3): 305–316
- 顾连兴, 胡受奚, 于春水, 赵明, 吴昌志, 李宏宇. 2001. 博格达陆内碰撞造山带挤压-拉张构造转折期的侵入活动. *岩石学报*, 17(2): 187–198
- 郭丽娜, 李勇, 肖良, 周建仁, 蔡玥. 2013. 新疆巴里坤县上石炭统祁家沟组沉积相特征及意义. *地质论评*, 59(增刊): 210–211
- 靳刘圆, 刘伟, 朱志新, 赵同阳. 2014. 博格达三个山地区基性岩墙 U-Pb 年龄、地球化学特征及地质意义. *新疆地质*, 32(3): 316–321
- 李平, 刘伟, 朱志新, 陈川, 靳刘圆, 徐仕琪, 赵同阳, 陈邦学. 2013. 博格达西段三个山石英闪长岩体地球化学特征、年代学及地质意义. *新疆地质*, 31(3): 162–166
- 梁婷, 郭新成, 高景刚, 范庭宾, 秦海峰, 周汝洪, 黑欢. 2011. 博格达山东段石炭纪火山岩地球化学及构造属性. *新疆地质*, 29(3): 289–295
- 刘松柏, 李长寿, 窦虎, 吴攀登, 彭志军, 崔玉宝. 2017. 新疆博格达麻沟梁地区晚石炭世祁家沟组地质特征及沉积相分析. *新疆地质*, 35(2): 139–144
- 刘文彬. 1993. 新疆博格达山西南麓石炭-二叠纪碳酸盐岩的碳氧同位素与古环境研究. *地层学杂志*, 17(2): 141–144
- 刘颖, 刘海臣, 李献华. 1996. 用 ICP-MS 准确测定岩石样品中的 40 余种微量元素. *地球化学*, 25(6): 552–558
- 马家常. 1999. 东准噶尔地区荒草坡群研究新进展. *矿物岩石*, 19(4): 52–55
- 马瑞士, 舒良树, 孙家齐. 1997. 东天山构造演化与成矿. 北京: 地质出版社, 1–202
- 施文翔, 田少亭, 冯红刚, 冯江鹏, 李艳, 罗婷. 2015. 东天山博格达造山带黑沟环状花岗岩杂岩锆石 SHRIMP U-Pb 测年及地质意义. *桂林理工大学学报*, 35(2): 251–256
- 舒良树, 朱文斌, 王博, Faure M, Charvet J, Cluzel D. 2005. 新疆博格达南缘后碰撞期陆内裂谷和水下滑塌构造. *岩石学报*, 21(1): 25–36
- 司国辉, 苏会平, 杨光华, 张超, 杨高学. 2014. 北天山四棵树岩体地球化学特征及地质意义. *新疆地质*, 32(1): 19–24.

附中文参考文献

初建朋. 2016. 东天山博格达地层小区晚古生代地层及古生物研究. 博士学位论文. 西安: 长安大学

初建朋, 李勇, 郭俊锋, 肖良, 张永明. 2016. 东天山博格达地层小区石炭纪地层研究进展. *西北地质*, 49(2): 229–236

崔方磊, 汪晓伟, 马中平, 孙吉明, 朱小辉. 2015. 博格达与哈尔里克早泥盆世火山岩成因对比及其构造意义. *地质与勘探*, 51

- 孙国智. 2009. 新疆博格达地区石炭纪原型盆地分析. 硕士学位论文. 西安: 西北大学
- 谭佳奕, 王淑芳, 吴润江, 张元元, 郭召杰. 2010. 新疆东准噶尔石炭纪火山机构类型与时限. 岩石学报, 26(2): 440-448
- 田黎萍, 王金荣, 汤中立, 于漫, 王怀涛, 赵志雄. 2010. 新疆博格达山东段早石炭世火山岩地球化学特征及其构造意义. 兰州大学学报(自然科学版), 46(4): 30-36, 41
- 童英, 王涛, 洪大卫, 韩宝福, 张建军, 史兴俊, 王超. 2010. 北疆及邻区石炭-二叠纪花岗岩时空分布特征及其构造意义. 岩石矿物学杂志, 29(6): 619-641
- 汪帮耀, 姜常义, 李永军, 吴宏恩, 夏昭德, 卢荣辉. 2009. 新疆东准噶尔卡拉麦里蛇绿岩的地球化学特征及大地构造意义. 矿物岩石, 29(3): 74-82
- 王金荣, 李泰德, 田黎萍, 于漫, 王怀涛, 赵志雄, 汤中立. 2010. 新疆博格达造山带晚古生代构造-岩浆演化过程: 火山岩组合及地球化学证据. 岩石学报, 26(4): 1103-1115
- 汪晓伟, 徐学义, 马中平, 陈隽璐, 朱小辉, 孙吉明, 崔方磊. 2015a. 博格达造山带东段芨芨台子地区晚石炭世双峰式火山岩地球化学特征及其地质意义. 中国地质, 42(3): 553-569
- 汪晓伟, 崔方磊, 孙吉明, 朱小辉, 白建科, 朱涛. 2015b. 博格达造山带东段芨芨台子地区早二叠世双峰式火山岩地球化学特征及其地质意义. 西北地质, 48(4): 100-114
- 王银喜, 顾连兴, 张遵忠, 吴昌志, 张开均, 李惠民, 杨杰东. 2006. 博格达裂谷双峰式火山岩地质年代学与 Nd-Sr-Pb 同位素地球化学特征. 岩石学报, 22(5): 1215-1224
- 王银喜, 顾连兴, 张遵忠, 吴昌志, 李惠民, 杨杰东. 2007. 东天山晚石炭世大石头群流纹岩 Sr-Nd-Pb 同位素地球化学研究. 岩石学报, 23(7): 1749-1755
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 李向民, 马中平, 王立社. 2004. 天山石炭纪大火成岩省与地幔柱. 地质通报, 23(9-10): 903-910
- 肖序常, 汤耀庆, 冯益民, 朱宝清, 李锦轶, 赵民. 1992. 新疆北部及其邻区大地构造. 北京: 地质出版社, 1-171
- 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 1993. 新疆维吾尔自治区区域地质志. 北京: 地质出版社, 1-841
- 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 1999. 新疆维吾尔自治区岩石地层. 武汉: 中国地质大学出版社, 81-84
- 熊发挥, 杨经绥, 贾毅, 徐向珍, 陈松永, 李天福, 任玉峰, 左国朝. 2011. 新疆博格达白杨沟的枕状熔岩: 岩石地球化学和 Sr-Nd-Pb 同位素特征. 中国地质, 38(4): 838-854
- 徐学义, 李向民, 马中平, 夏林圻, 夏祖春, 彭素霞. 2006a. 北天山巴音沟蛇绿岩形成于早石炭世: 来自辉长岩 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄的证据. 地质学报, 80(8): 1168-1176
- 徐学义, 夏林圻, 马中平, 王彦斌, 夏祖春, 李向民, 王立社. 2006b. 北天山巴音沟蛇绿岩斜长花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及蛇绿岩成因研究. 岩石学报, 22(1): 83-94
- 闫永红, 薛春纪, 张招崇, 丁振信, 杨伟海, 韩宗华. 2013. 西天山阿吾拉勒西段群吉萨依花岗岩斑岩地球化学特征及其成因. 岩石矿物学杂志, 32(2): 139-153
- 张妍, 李振生, 聂峰, 田晓丽, 石永红. 2015. 新疆博格达山晚古生代地层的形成时代、物源及其演化: 碎屑锆石 U-Pb 年代学证据. 地质科学, 50(1): 155-181
- 赵同阳, 徐仕琪, 朱志新, 刘鑫, 陈川. 2014. 新疆博格达-哈尔里克山地区石炭纪火山岩地质地球化学特征及其构造意义. 地质论评, 60(1): 115-124
- 郑有伟, 郭建明, 郑建京, 王亚东, 许世阳. 2015. 新疆博格达构造带晚古生代构造格局与演化过程探讨. 地质找矿论丛, 30(4): 588-593
- 钟玉婷, 徐义刚. 2009. 与地幔柱有关的 A 型花岗岩的特点——以峨眉山大火成岩省为例. 吉林大学学报(地球科学版), 39(5): 828-838
- 周动力. 2015. 哈密地区石炭纪岩相古地理特征分析. 内江科技, 36(4): 83-84