

东天山晚古生代埃达克岩成因及铜金成矿意义*

熊小林 蔡志勇 牛贺才 陈义兵 王强 赵振华 吴金花

XIONG XiaoLin, CAI ZhiYong, NIU HeCai, CHEN YiBin, WANG Qiang, ZHAO ZhenHua and WU JinHua

中国科学院边缘海地质重点实验室, 中国科学院广州地球化学研究所

Key Laboratory of Marginal Sea Geology, Chinese Academy of Sciences at Guangzhou Institute of Geochemistry,

Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2004-10-08 收稿, 2005-05-10 改回.

Xiong XL, Cai ZY, Niu HC, Chen YB, Wang Q, Zhao ZH and Wu JH. 2005. The late Paleozoic adakites in eastern Tianshan area and their metallogenetic significance. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3) 967-976

Abstract Eastern Tianshan late Paleozoic volcanic zone is located at the center of the Paleo-Asian Oceanic Belt. A number of small tonalitic, trondhjemitic and granodioritic plutons occur in this volcanic zone, among which 6 typical plutons were selected to study their geochemical features and petrogenesis. These plutonic rocks are characterized by high Na_2O , Al_2O_3 , and Sr contents, low Y and HREE contents and high Sr/Y and La/Yb ratios, similar to the modern adakite. These rocks also possess positive $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$ (+1.80 ~ +8.47) and very low initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.7026 ~ 0.7051). These Nd and Sr isotopic compositions are also similar or close to those of most subduction-related adakites which have like-MORB isotopic compositions. The above geochemical and isotopic features, in conjunction with late Paleozoic subduction setting, suggest that these adakitic rocks may be produced by partial melting of the subducted Zhungaer oceanic crust during late Paleozoic. The MORB (basaltic oceanic crust) are a very important source for adakitic rocks and contain high abundance of Cu, Au and volatile components H_2O and Cl etc. The large scale of decomposition of amphibole within the subducted oceanic crust during the generation of adakite magmas will release large amount of H_2O , Cl and Cu, Au into the magmas. The rapid decrease of pressure during ascent of the magma will cause release of Cu, Au and volatiles to form ore-forming fluid. During the entire process from magmatic production through magmatic transportation and interaction with mantle wedge to the final stage of fluid release from the magma, high oxygen fugacity (f_{O_2}) is necessary, which will restrain the stability of sulphides to make Cu, Au enriched in the magma. Eastern Tianshan area has become an important exploration target for industrial Cu deposits due to the discovery of the superlarge Tuwu-Yandong porphyry Cu deposit whose parent magmas are adakitic rocks. The newly reported adakitic rocks here are surely helpful for the guidance of further exploration of similar Cu, Au deposits in this area.

Key words Adakite; Cu and Au mineralization; Eastern Tianshan

摘要 东天山晚古生代岛弧带位于古亚洲洋成矿域的腹地, 该区发育许多埃达克质的英云闪长岩、斜长花岗岩和花岗闪长岩小侵入体, 本文选择尾亚北、三岔口、312 国道东、312 国道西、土屋-延东和巴仑台等小岩体进行了地球化学研究。这些岩石具有高 Sr、 Na_2O 和 Al_2O_3 , 低 Y 和 HREE 等特征, 与埃达克岩地球化学特征一致。绝大部分样品的 $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$ 为正值 (+1.80 ~ +8.47), 且 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) 很低 (0.7026 ~ 0.7051), 与现代 MORB 以及新生代俯冲洋壳熔融形成的埃达克岩的 Nd 和 Sr 同位素组成接近。东天山大部分埃达克质岩石具有高 $\text{Mg}^\#$ (>40) 特点, 且它们形成于晚古生代岛弧构造背景, 暗示这些埃达克岩可能由俯冲洋壳熔融产生, 并经历了与地幔楔橄榄岩的相互作用; 三岔口英云闪长斑岩具有低 $\text{Mg}^\#$ (<40), 且形成于碰撞后构造背景, 可能是增厚下地壳熔融的产物。土屋-延东与埃达克岩有关的超大型斑岩铜矿的发现和突破使得东天山成为寻找斑岩铜金矿的重要靶区, 本文新发现的埃达克岩无疑为在该区进一步寻找相关的矿床提供了有用的线索。特别是大部分埃达

* 国家自然科学基金 (40172029, 40373035)、广州地球化学研究所创新工程项目 (GIGCX-04-03) 和国家重点基础研究计划项目 (2001CB409803) 资助, 并获中国科学院广州地球化学研究所元素和同位素实验室部分资助。

第一作者简介: 熊小林, 男, 1963 年生, 博士, 研究员, 从事岩石地球化学、矿床地球化学和实验地球化学研究, E-mail: xiongxl@gig.ac.cn

克岩由俯冲洋壳熔融产生 暗示其源区含有高丰度的 Cu、Au 和挥发份 H_2O 、Cl 等 且其岩浆可能在角闪岩相向榴辉岩相转变时产生 此时角闪石大规模分解有利于产生含丰富挥发份和成矿元素的埃达克岩岩浆 暗示良好的成矿条件和成矿潜力。

关键词 埃达克岩;地球化学和成因;Cu、Au 成矿作用;东天山

中图法分类号 P588.122

1 引言

埃达克岩(adakite)是 Defant and Drummond (1990)提出的,最初是指产于岛弧环境,由年轻的俯冲洋壳部分熔融产生的,具有特定地球化学特征的一套中酸性火山岩和侵入岩。其独特的地球化学特征是富 Na_2O 和 Al_2O_3 ,高 Sr,低 Y 和 HREE。这些地球化学特征表明洋壳部分熔融发生在石榴子石和金红石稳定但斜长石不稳定的压力条件(Rapp and Watson, 1995; Xiong *et al.*, 2005)。后来,在 2001 年北京召开的埃达克岩讨论会上,adakite 这一术语在内涵上得到发展,总的指具有埃达克岩地球化学特征的中酸性火成岩,它们可以由俯冲洋壳熔融产生,也可以由下地壳镁铁质岩石部分熔融产生(Defant *et al.*, 2002; 张旗等, 2001, 2003; Xu *et al.*, 2002; Xiong *et al.*, 2001a, b, 2003; 王强等, 2003; 吴福元等, 2002; 翟明国, 2004)。埃达克岩不仅具有极其重要的地球动力学(如俯冲洋壳熔融和早期大陆壳产生等方面)意义,近年来研究表明,埃达克岩与斑岩型 Cu、Cu-Au 及浅成低温热液 Au-Ag 矿床具有密切的时空和成因关系(Thieblemont *et al.*, 1997; Sajona & Maury, 1998; Defant *et al.*, 2002; 张旗等, 2001, 2004; Oyarzum *et al.*, 2001; Mungall, 2002; Wang *et al.*, 2003a-c; 王强等, 2003, 2004; 侯增谦等, 2004)。Defant *et al.* (2002)指出埃达克岩可以作为这些类型的矿床的找矿标志。国际上的相关报道和研究,主要集中在新生代埃达克岩广泛发育的环太平洋消减带,如智利北部和菲律宾群岛许多世界级的斑岩型 Cu 矿床产于埃达克岩之中。在国内,以张旗研究员为首的一批研究者在该领域进行了积极的开拓(张旗等, 2001, 2004; Wang *et al.*, 2003a-c; 王强等, 2003; 2004; 侯增谦等, 2004)。张旗等(2004)建议把我国铜金找矿工作的重点放在古亚洲洋造山带(中国境内的北方造山带)、吉黑东部和冈底斯等与板块俯冲作用有关的地区。

东天山古生代造山带是古亚洲洋造山带中的重要造山带,区内分布着许多埃达克质的中酸性小侵入体,并已发现与埃达克岩相关的土屋-延东大型-超大型斑岩铜矿带和一批有前景的铜金矿床和矿化点(王福同等, 2001; 芮宗瑶等, 2002; 张连昌等, 2004),是斑岩型 Cu 矿成矿和找矿潜力巨大的地区。尽管如此,本区与埃达克岩有关的基础研究仍较薄弱。本文在东天山埃达克岩野外调查和室内岩石学研究的基础上,选择该区典型埃达克岩进行地球化学特征剖析,并讨论它们的岩石成因和成矿意义,为在东天山进一步寻找相关的矿床提供有用的线索。本文基于目前的知识和认识

水平对许多研究工作者十分关注的问题——埃达克岩为什么有利于成矿以及埃达克岩的成矿机理作了较多的讨论。

2 地质背景和岩石学简述

中国的天山地处中亚或古亚洲洋造山带的腹地。本文所述的东天山位于和静巴仑台以东,土哈盆地以南的天山地区。该区地质构造单元主要有北天山晚古生代造山带以及中天山地块和南部塔里木板块北缘和哈萨克斯坦-准噶尔板块南缘(图 1)。在东天山地区,北天山晚古生代造山带由一系列次一级岛弧组成,如大南湖-头苏泉岛弧、阿齐山-雅满苏岛弧等,这些岛弧中发育泥盆纪-石炭纪的玄武岩-安山岩-英安岩组合。目前,对这些岛弧的属性还存在着一些争议;一些学者认为它们属于塔里木板块的北部陆缘弧(马瑞士等, 1997; 秦克章等, 2002; 张连昌等, 2004),另外一些学者则认为它们属于准噶尔地块的南部陆缘(如姬金生等, 1994; 毛景文等, 2002; 李锦轶等, 2002)。

东天山晚古生代岛弧区发育许多埃达克质的中酸性小侵入体,主要的岩性包括英云闪长岩、斜长花岗岩、花岗闪长岩和花岗闪长斑岩,其中一些已发现铜金矿床或矿化,如著名的延东-土屋-灵龙-赤湖斑岩铜矿带(张连昌等, 2004);该区维权、康古尔塔格东、大南湖、路白山等铜矿床或矿点以及康古尔、马头滩、夹白山、小红山等金矿床或矿点也可能与这些类型的斑岩密切相关;与成矿有关的埃达克质侵入体主要形成于泥盆纪和石炭纪,如土屋-延东斜长花岗斑岩单颗粒锆石 U-Pb 年龄为 356 ~ 361 Ma(秦克章, 2002; 芮宗瑶等, 2002),为早石炭世;情况不同的是,与三岔口铜矿相关的斜长花岗斑岩和英云闪长斑岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 278 ± 4 Ma(李华芹等, 2004),可能形成碰撞后背景。除土屋-延东斜长花岗斑岩取自钻孔,其样品具有微弱蚀变外,本文采集的其它样品均为新鲜未蚀变岩石。英云闪长岩和斜长花岗岩通常具有中细或中粗粒结构,主要由石英、斜长石和暗色矿物角闪石和黑云母组成,暗色矿物含量 < 10% 时为斜长花岗岩,其斜长石通常为更长石;暗色矿物含量超过 10% 时为英云闪长岩,其斜长石以中长石为主,它们的副矿物为磁铁矿、榍石、磷灰石和锆石等。花岗闪长岩具有中细粒结构,主要由斜长石、钾长石、石英、角闪石和黑云母组成;花岗闪长斑岩具有斑状结构,斑晶为斜长石、角闪石和黑云母组成;基质具有微粒-细粒结构,由斜长石、钾长石、石英和黑云母组成,副矿物为磁铁矿、磷灰石、榍石和锆石等。在上述岩学研究的基础上,我们选择尾亚北花岗闪长岩和闪长岩(图 1: X_1)、三岔口英云闪长岩(X_2)、312 国道东英云闪长岩

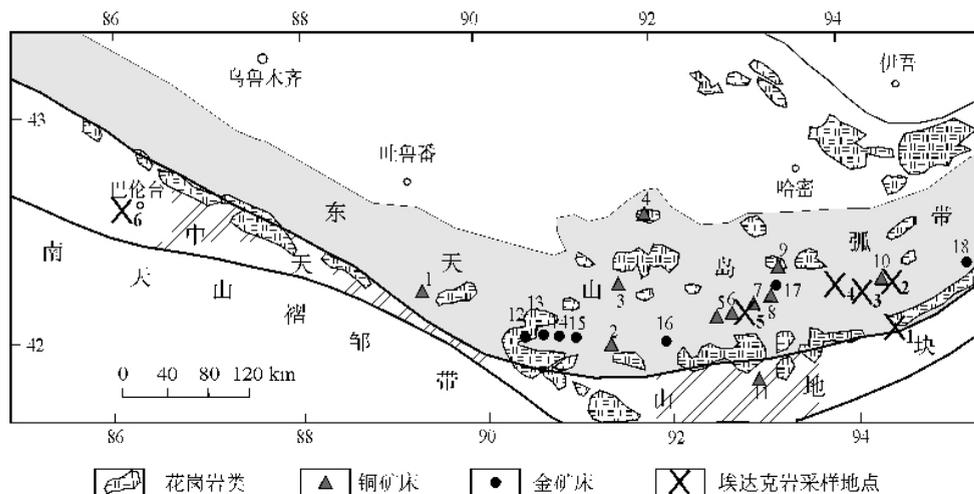


图1 东天山构造单元、铜金矿床分布及埃达克岩采样位置 (部分资料来自芮宗瑶等 2002)

1. 小热泉子铜矿; 2. 维权铜矿; 3. 康古尔塔格东铜矿; 4. 卡拉塔格铜矿; 5. 延东铜矿; 6. 土屋铜矿; 7. 灵龙铜矿; 8. 赤湖铜矿; 9. 大南湖铜矿; 10. 三岔口铜矿; 11. 路白山铜矿; 12. 石英滩金矿; 13. 康西金矿; 14. 康古尔金矿; 15. 马头滩金矿; 16. 夹白山金矿; 17. 小红山金矿; X₁-尾亚北; X₂-三岔口; X₃-312 国道东; X₄-312 国道西; X₅-延东; X₆-巴仑台

Fig. 1 Geological units, distribution of Cu and Au deposits and sample locations of adakites in the eastern Tianshan area

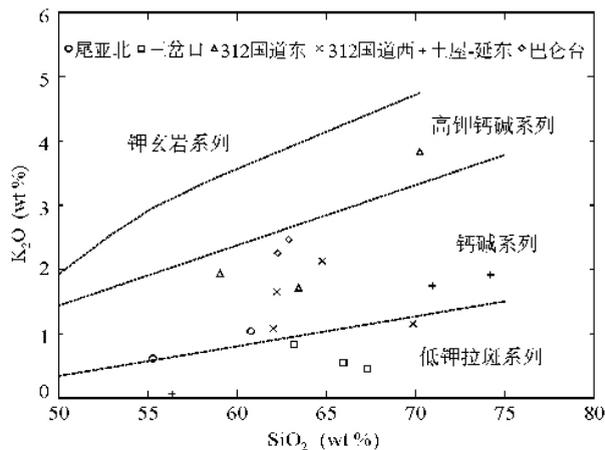


图2 东天山埃达克质岩石的 $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$ 图

Fig. 2 $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$ plot for the adakitic rocks from eastern Tianshan area.

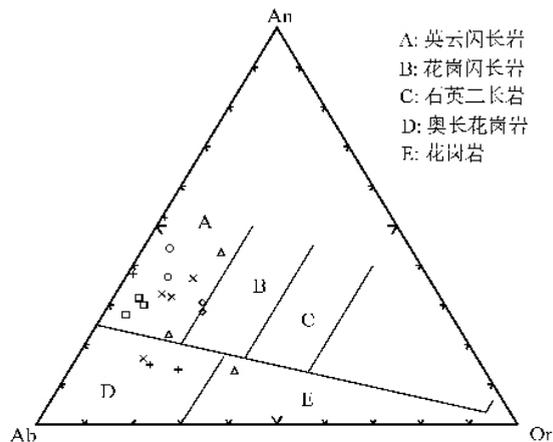


图3 东天山埃达克质岩石的 Ab - An - Or 标准矿物图解

Fig. 3 CIPW normative Ab - An - Or plot for the adakitic rocks from eastern Tianshan area.

(X₃)、312 国道西英云闪长岩(X₄)、延东斜长花岗岩和闪长玢岩(X₅)和巴仑台英云闪长岩(X₆)进行了主要元素、微量元素和必要的 Sm-Nd 和 Rb-Sr 同位素分析。除巴仑台外,上述岩体都位于东天山地区。巴仑台英云闪长岩尽管处于中天山地块,但其岩性新鲜,无片理化,新疆地矿局 1:20 万地质图将其划归海西早期。

3 元素地球化学特征

主要和微量元素在中国科学院广州地球化学研究所同位素实验室完成,主要元素由 ICP-AES 测定,微量元素由

ICP-MS 测定,前者分析精度优于 10%,后者优于 5%(绝大部分优于 2%)。尾亚北、三岔口、312 国道东、312 国道西、土屋-延东和巴仑台代表性样品的分析结果列于表 1,这些样品的 SiO_2 范围在 54 ~ 72.23%,以高 Na_2O (3.5 ~ 5.0%) 和 Al_2O_3 (绝大部分大于 15.0%),低钾 (小于 2.5%) 和 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} > 1$ 为特征,FeO, MgO 和 CaO 含量中等,但 $\text{Mg}^\# = \text{MgO}/(\text{MgO} + \text{FeO})$ 分子数之比 [较高 (除三岔口样品 $\text{Mg}^\# = 35 \sim 38$,其他样品 $\text{Mg}^\# > 40$)。在 $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$ 图上,这些酸性岩石落入钙碱系列和低钾拉斑系列(图 2);在 Ab-An-Or

表1 东天山地区埃达克质岩石的主要(wt.%)和微量元素($\mu\text{g/g}$)组成

Table 1 Major and trace element composition of adakitic rocks from eastern Tianshan area

位置 样号	X ₁			X ₂			X ₃			X ₄			X ₅			X ₆	
	2214	2215	S1	S2	S3	2075	2077	2079	2092	2093	2094	DXTW1	DXTW2	DXT0011	2037	2040	
SiO ₂	60.15	54.56	62.47	66.17	65.00	63.08	69.47	58.41	61.25	61.36	68.83	70.15	72.23	53.97	62.17	63.13	
TiO ₂	0.68	0.79	0.51	0.47	0.46	0.48	0.51	0.80	0.53	0.62	0.42	0.27	0.16	0.94	0.70	0.65	
Al ₂ O ₃	17.48	17.10	16.27	13.03	14.63	20.29	13.57	15.43	17.01	15.99	13.48	16.02	14.33	16.94	16.72	16.69	
FeO	6.16	8.33	6.52	6.06	5.79	3.65	3.40	6.68	6.03	6.42	4.34	2.23	2.35	7.55	5.05	4.86	
MnO	0.09	0.11	0.13	0.11	0.22	0.04	0.05	0.11	0.09	0.10	0.07	0.09	0.06	0.14	0.07	0.08	
MgO	3.05	5.05	2.22	1.83	1.91	1.75	1.22	4.61	2.63	3.31	2.27	1.36	1.28	4.54	2.79	2.71	
CaO	5.92	8.32	4.90	5.80	5.55	5.50	2.90	6.00	5.37	5.70	4.41	2.01	1.47	6.76	4.66	4.97	
Na ₂ O	4.20	3.62	4.77	4.20	4.24	2.68	3.78	4.73	3.72	4.21	3.47	4.92	3.48	4.56	4.07	4.03	
K ₂ O	1.03	0.61	0.83	0.45	0.55	1.71	3.79	1.92	1.63	1.07	1.14	1.73	1.87	0.07	2.44	1.30	
P ₂ O ₅	0.21	0.20	0.25	0.21	0.22	0.23	0.21	0.23	0.17	0.13	0.10	0.11	0.12	0.26	0.18	0.16	
LOI	1.39	1.21	1.41	1.26	1.02	0.77	0.58	1.22	1.21	1.61	0.74	1.06	1.85	4.79	0.82	1.53	
Total	100.35	99.90	100.26	99.60	99.59	100.18	99.49	100.15	99.64	100.53	99.27	99.95	99.21	100.52	99.66	100.11	
Mg [#]	47	52	38	35	37	46	39	55	44	48	48	52	50	52	50	50	
Co	16.97	25.37	9.99	10.86	10.37	10.5	5.59	4.35	17.67	17.23	10.86	6.07	3.15	27.44	12.93	13.01	
Ni	14.99	32.88	3.45	2.90	3.27	35.65	6.32	2.28	14.23	27.91	10.61	3.21	2.78	45.61	22.24	22.36	
Rb	39.75	16.66	19.15	10.8	12.02	39.97	152.5	163.3	42.11	38.97	39.7	51.23	42.31	2.409	90.06	35.98	
Sr	521	543	729	839	771	465	384	488	415	437	400	586	423	1666	517	610	
Y	17.81	18.73	12.22	13.95	15.17	12.82	12.48	9.82	12.82	17.95	13.14	6.32	4.18	16.66	15.53	17.51	
Zr	93.36	48.94	77.55	70.86	68.89	124.6	258.6	314.6	100.9	88.17	72.68	42.53	17.21	119.7	132	173.6	
Nb	3.95	2.84	1.92	2.12	2.22	7.13	7.58	11.44	4.74	4.26	3.97	3.13	3.72	2.86	6.52	8.11	
Ba	322	187	390	284	477	243	942	2023	288	269	307	768	785	298	554	510	
La	15.61	12.67	10.05	11.55	12.29	13.02	75.89	89.93	6.00	13.79	13.87	11.56	13.45	15.19	15.05	20.32	
Ce	33.58	28.37	21.43	28.28	26.39	29.88	143.2	167.2	16.82	30.93	28.63	22.83	21.08	36.99	34.6	44.82	
Pr	4.38	3.86	2.88	3.33	3.64	3.79	15.38	17.34	2.46	4.28	3.56	2.81	2.58	4.95	4.93	5.88	
Nd	17.20	16.26	11.43	12.86	14.77	13.85	48.83	60.12	10.07	17.18	13.44	11.03	9.12	20.26	19.56	22.39	
Sm	3.55	3.59	2.43	2.74	3.21	2.78	6.92	7.42	2.33	3.61	2.66	1.95	1.77	4.26	3.74	4.31	
Eu	1.04	0.97	0.92	0.93	1.06	0.90	1.11	1.35	0.57	0.94	0.72	0.78	0.61	1.35	1.04	1.19	
Gd	3.46	3.70	2.24	2.64	3.12	2.48	4.26	3.65	2.23	3.49	2.55	1.58	1.42	3.78	3.17	3.67	
Tb	0.55	0.58	0.35	0.42	0.49	0.40	0.58	0.49	0.39	0.55	0.41	0.21	0.22	0.57	0.5	0.57	
Dy	3.25	3.44	2.12	2.45	2.91	2.36	2.63	2.32	2.36	3.17	2.34	1.12	1.25	3.18	2.74	3.28	
Ho	0.64	0.68	0.43	0.51	0.58	0.47	0.48	0.37	0.49	0.65	0.48	0.22	0.25	0.62	0.54	0.64	
Er	1.75	1.81	1.18	1.42	1.61	1.34	1.29	1.07	1.35	1.78	1.31	0.61	0.75	1.67	1.46	1.73	
Tm	0.26	0.27	0.18	0.21	0.24	0.20	0.18	0.12	0.21	0.27	0.20	0.08	0.12	0.20	0.22	0.25	
Yb	1.72	1.72	1.32	1.53	1.67	1.29	1.16	0.75	1.38	1.76	1.31	0.60	0.78	1.64	1.46	1.67	
Lu	0.27	0.27	0.22	0.26	0.27	0.20	0.21	0.11	0.22	0.28	0.20	0.08	0.13	0.24	0.23	0.27	
Hf	2.45	1.60	2.04	2.10	2.02	3.48	6.46	8.57	2.55	2.86	2.29	1.25	0.59	2.97	3.57	4.78	
Ta	0.23	0.15	0.11	0.13	0.15	0.45	0.46	0.65	0.30	0.28	0.26	0.31	0.41	0.22	0.39	0.57	
Ti	3.24	2.53	0.70	1.33	1.13	5.92	27.07	22.39	2.74	3.89	4.83	1.61	1.51	2.08	3.58	7.27	
Σr/Y	29	29	60	60	51	36	31	50	32	24	30	93	101	100	33	35	

X₁-尾亚花岗岩闪长岩, X₂-三岔口英云闪长岩, X₃-312 国道东英云闪长岩, X₄-312 国道西英云闪长岩, X₅-土屋-延东斜长花岗岩和闪长玢岩, X₆-巴台英云闪长岩。FeO = FeO + Fe₂O₃, Mg[#] = MgO/(MgO + FeO) (分子数)

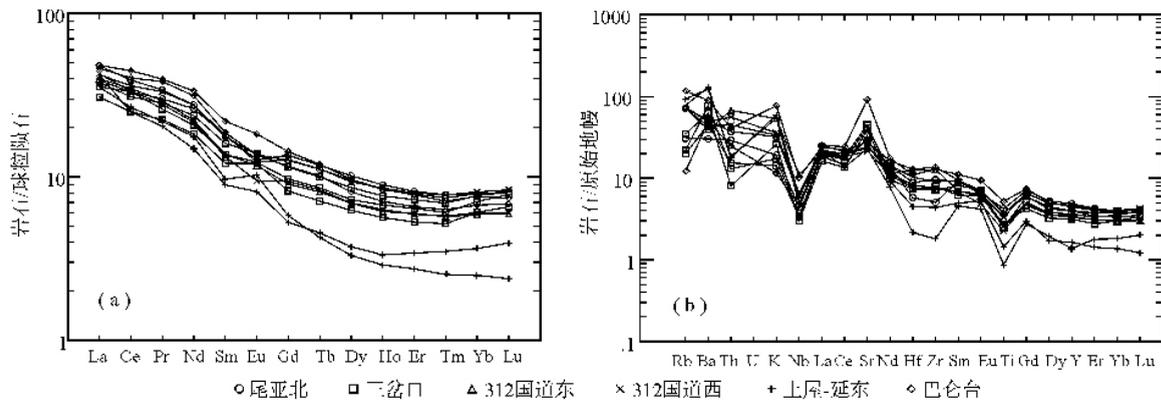


图4 东天山埃达克质岩石的稀土元素分布模式 (a) 与原始地幔标准化微量元素图解 (b)

Fig. 4 Rare earth element patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element diagram (b) for the adakitic rocks from eastern Tianshan area.

标准矿物图解中,绝大部分落入英云闪长岩,少量落入奥长花岗岩域(图3)。

花微量元素表现为富集大离子亲石元素,亏损 HREE,并具有明显的正 Sr 和负 Nb 和 Ti 异常等特征(图 4a, b)。Sr 含量高达 384 ~ 1666 $\mu\text{g/g}$, Y 和 Yb 分别高达 4.18 ~ 18.73 $\mu\text{g/g}$ 和 0.60 ~ 1.72 $\mu\text{g/g}$, Eu 表现为弱正异常或弱负异常(图 4a)。Ni 和 Co 含量较高,大部分样品 Ni 含量超过 10 $\mu\text{g/g}$ 。上述高 Sr、 Na_2O 和 Al_2O_3 , 低 Y 和 HREE 等特征与 Defant & Drummond (1990) 和 Drummond *et al.* (1996) 定义的埃达克岩地球化学特征是一致的,在 Sr/Y - Y 图解中落入埃达克岩区(图 5)。

4 Nd 和 Sr 同位素组成

Nd 和 Sr 同位素组成由中国科学院广州地球化学研究所多收集器等离子体质谱测定,分析流程见梁细荣等(2002)。5 个英云闪长岩和闪长质岩石样品的 Nd 和 Sr 同位素组成及计算参数见表 2。除 312 国道西英云闪长岩外,所有其他样品的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(T)$ 为正值(+1.80 ~ +8.47), Nd 模式年龄为 454 ~ 1080 Ma; ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 很低,为 0.7026 ~ 0.7051。这些岩石的 Nd 和 Sr 同位素组成与洋中脊玄武岩(MORB)以及新生代环太平洋起源于俯冲洋壳的埃达克岩的 Nd 和 Sr 同位素组成($\varepsilon_{\text{Nd}}(T)$ 为正值, ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i < 0.704, Defant & Drummond, 1990) 非常接近,其源区岩石可能起源于亏损地幔。312 国道西英云闪长岩具有负的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(T)$ 值和相对高($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 值,可能受到地壳物质的混染或俯冲沉积物参与了熔融。

5 岩石成因讨论

东天山英云闪长质和奥长花岗岩具有与埃达克岩相似的高 Na、Al 和 Sr, 低 Y 和 HREE 以及高 Sr/Y 等特点。因此,埃达克质岩石的成因模型可用来解释这些岩石的形

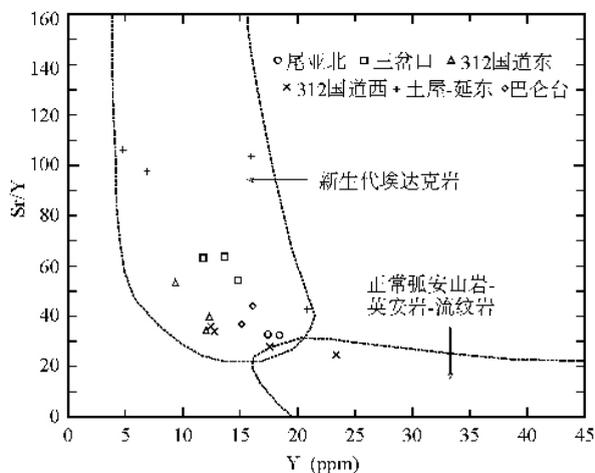


图5 东天山埃达克质岩石的 Sr/Y - Y 图解

Fig. 5 Sr/Y - Y plot for the eastern Tianshan adakitic rocks

成。埃达克质岩石的成因模型包括:

- (1) 俯冲洋壳的熔融(Defant and Drummond, 1990);
- (2) 增厚的下地壳铁镁质岩石熔融(Atherton & Petford, 1993; 张旗等, 2001, 2002; Wang *et al.*, 2003a, b, c; 熊小林等, 2001);
- (3) 拆沉下地壳的熔融(Xu *et al.*, 2002; 王强等, 2003, 2004);
- (4) 幔源岩浆在厚地壳底部岩浆库中分离结晶和混染作用(AFC 过程)(Feeley and Hacker, 1995)。

幔源岩浆在厚的(能稳定石榴石压力条件)下地壳底部岩浆库中产生分离结晶作用同时与大陆壳物质的混染作用已用来解释安第斯火山带中埃达克质岩石的成因(Feeley and Hacker, 1995),石榴石的析出,使岩浆中 Y 和 HREE 含量快速亏损,而对岩浆中的 Sr 和 LREE 含量几乎无影响,结果导致剩余岩浆中 Sr/Y 和 La/Yb 增大。此模式较容易解释

埃达克质岩石的低 Y 和 HREE 含量及高 Sr/Y 和 La/Yb 特征,但难解释东天山英云闪长质和奥长花岗岩质岩石的高 Sr 含量以及 Sr 和 Nd 同位素组特征。东天山大部分埃达克质岩石无明显 Eu 异常-正 Eu 异常和正 Sr 异常,暗示其可能不受幔源物质分离结晶控制,而其正 $\epsilon_{Nd}(T)$ 值和低 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 值表明它们没有受到明显的大陆壳物质的混染作用。大部分东天山埃达克质岩石可能也不是下地壳物质熔融产生的,中国东部增厚的下地壳铁镁质岩石熔融(张旗等, 2001, 2002; Wang *et al.*, 2003a, b, c)及拆沉的下地壳熔融(Xu *et al.*, 2002)产生的埃达克质岩石的 Nd 和 Sr 同位素组成通常表现为负 $\epsilon_{Nd}(T)$ 值和高 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 值(通常 > 0.706),东天山埃达克质岩石在 Nd 和 Sr 同位素组成方面显然与这些下地壳起源的埃达克质岩石有着显著的区别;此外,下地壳起源的埃达克质岩石通常形成于伸展的构造背景(Wang *et al.*, 2003a, b, c; Xiong *et al.*, 2003),除三岔口等岩体外,东天山的大部分相关岩石显然也不具备这样的背景,因此大部分东天山埃达克质岩石可能与下地壳熔融或下地壳拆沉无关。

东天山大部分埃达克质岩石形成于晚古生代岛弧带,这些岩石的 Nd 和 Sr 同位素组成与洋中脊玄武岩(MORB)以及起源于俯冲洋壳的埃达克岩的 Nd 和 Sr 同位素组成的相似性,表明他们可能是俯冲洋壳熔融的产物,它们的高 $Mg^{\#}$ 和高 Ni 含量特点表明其岩浆经历了与地幔楔的相互作用;实验的结果(如 Rapp and Watson, 1995; Sen and Dunn, 1994)证实,由玄武质岩石部分熔融产生的埃达克质熔体,其 $Mg^{\#}$ 绝大部分小于 35。Drummond *et al.* (1996)和 Defant *et al.* (2002)指出,由俯冲板片熔融产生的埃达克岩 $Mg^{\#}$ 通常大于 40,是埃达克岩浆与地幔楔相互作用导致 MgO 加入的结果。本文研究的东天山埃达克质岩石(除三岔口外) $Mg^{\#} > 40$ (表 1),在 $MgO-SiO_2$ 图上(图 6),这些埃达克质岩石的 MgO 含量明显高于实验产生的玄武岩部分熔体,基本上都落入俯冲洋壳熔融产生的埃达克岩范围,我们认为俯冲洋壳的熔融是大部分东天山埃达克质岩浆产生的一种最为适合的解释;但三岔口英云闪长斑岩具有低 $Mg^{\#}$ (< 40)特点,且形成于碰撞后构造背景,可能是增厚下地壳熔融的产物。

6 埃达克岩与铜金成矿作用

斑岩型铜矿是铜的主要来源,其储量和产量占了世界铜资源量的一半以上;一些富金的斑岩铜矿床被称为斑岩型铜、金矿床或斑岩型金、铜矿床;浅成低温热液型金银矿床常常与斑岩型铜、金矿床共生,它们也是全球金的重要来源。近年来全球关于斑岩型和浅成低温热液型铜金矿床研究引人注目的进展是认识到许多大型和超大型铜金矿床的成矿斑岩就是埃达克岩。例如 Thieblemont *et al.* (1997)对世界上 43 个斑岩铜矿床和浅成热液金矿床的有关岩浆岩进行地球化学数据的整理,发现其中 38 个与埃达克岩有关, Sajona &

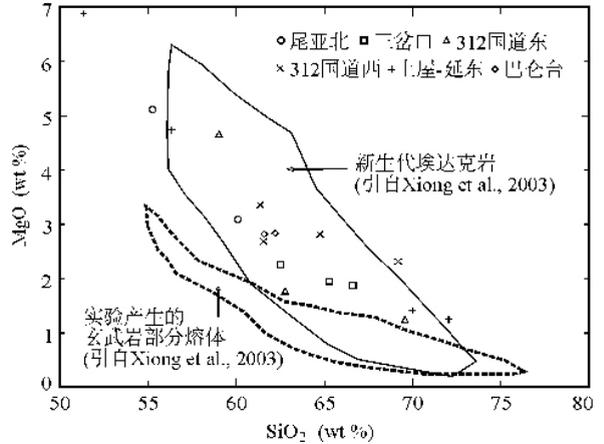


图 6 东天山埃达克质岩石的 MgO 含量与新生代埃达克岩以及实验产生的玄武岩部分熔体比较

Fig. 6 MgO vs. SiO_2 plot for the eastern Tianshan adakitic rocks compared to Cenozoic adakites and experimental basalt partial melts.

Maury (1998) 研究菲律宾群岛 16 个斑岩铜矿和浅成热液金矿床地球化学数据,发现其中 14 个矿区的 Cu、Au 矿化与埃达克质岩浆活动有时空联系。我国地质工作者也已经开始重视和加强埃达克岩与 Cu、Au 成矿关系的研究。张旗等(2001, 2004),王强等(2003, 2004)认为中国东部很多晚中生代 Cu、Au 矿床、侯增谦和曲小明等(2002, 2004)及张旗等(2004)认为特提斯成矿域东段的冈底斯斑岩铜矿带、芮宗瑶等(2002)及张连昌等(2004)认为古亚洲洋成矿域的土屋-延东铜矿带等与埃达克质岩石有成因联系。尽管埃达克岩与斑岩型和浅成低温热液型铜金矿床密切的时空和成因联系已成为一个不争的事实,然而,目前有关埃达克岩为什么有利于成矿以及埃达克岩的成矿机理还知之甚少,有关的研究还刚刚起步。下面基于我们目前的知识和认识作一些讨论。

斑岩型和浅成低温热液型铜金矿床有关的斑岩体是该类矿床的矿质(Cu、Au)、流体(H_2O 及成矿元素配位体 Cl、S 等)和能量(热)的主要来源(Hendenquist, 1994; Gammons, 1997)。熊小林等(2001)曾总结出浅成-次火山斑岩的初始岩浆 Cu、Au 丰度、 H_2O 和 Cl 含量及岩浆产生和结晶时的氧逸度是其能否最终形成富含 Cu、Au 流体的关键因素。我们认为,埃达克岩特别是洋壳产生的埃达克岩为什么有利于成矿很可能与它们的独特源区组成和独特形成条件和成岩过程以及其成岩成矿过程中高的氧逸度等有关,这些独特性造就了富含矿质和挥发份的埃达克质岩浆。

6.1 洋壳作为埃达克岩的源区含有丰富的矿质和挥发份

世界斑岩铜矿绝大多数产于板块俯冲带(如芮宗瑶等, 2004; 刘红涛等, 2004);在俯冲带,成矿斑岩绝大部分是埃达克岩,它们是玄武质洋壳熔融的产物(Defant *et al.*,

2002)因此,玄武质洋壳的Cu、Au丰度必然是决定埃达克岩成矿潜力或规模的关键因素之一。众所周知,Cu和Au是亲硫元素,主要赋存于地幔和铁镁质岩石中,例如Cu在平均N-MORB中含量高达 $74.4\mu\text{g/g}$ (Hofmann,1988),大大超过其他类型岩石,甚至高于原始地幔($28\mu\text{g/g}$)。除了高的Cu、Au丰度,玄武质洋壳可能也是挥发份 H_2O 和Cl富集的载体。我们知道,海水是富Cl的,洋壳中的玄武岩在俯冲进入地幔之前,通常会发生海水蚀变作用,来自海水中的 H_2O 和Cl将占据洋壳中含水蚀变矿物(绿泥石、黝帘石等)的羟基位置而随俯冲板片一起进入地幔,随着俯冲深度增加,玄武质洋壳将从绿片岩相变质为角闪岩相,这些含水蚀变矿物中的 H_2O 和Cl将转移进入角闪石中。在随后的角闪岩相向榴辉岩相转变过程中,角闪石的分解和洋壳的熔融,将导致挥发份 H_2O 和Cl以及成矿元素进入埃达克岩岩浆。

6.2 洋壳熔融过程中角闪石分解产生富含挥发份和成矿元素的埃达克岩岩浆

在俯冲带,板片熔融形成埃达克岩岩浆发生在70~90km深度(Defant & Drummond,1990),这正好位于角闪岩相向榴辉岩相转变的压力范围,角闪石的分解释放大量的 H_2O 将大大降低MORB的固相线温度,导致洋壳熔融产生富含成矿元素和挥发份的埃达克岩岩浆。Kay & Mpodozis(2001)研究中安第斯新生代火成岩的地球化学与大规模Cu、Au矿化的耦合关系。他们发现,岩浆的中、重稀土比值Sm/Yb的明显变化具有源区变迁乃至成矿指示意义。该区从成矿前、成矿期到成矿后,岩浆的Sm/Yb依次逐渐增大,反映出岩浆源区性质的变化和源区压力逐渐增高。成矿前以钙碱性弧岩浆活动为特征,具有正常的消减带地幔楔衍生岩浆的地球化学特点(Sm/Yb = 1~3);成矿期为大规模埃达克岩岩浆活动,指示源区残留固相从角闪石向右石榴子石转变的特点(Sm/Yb = 3~5);成矿后为本区岩浆活动的结束期,以发育少量埃达克岩岩浆为特点,重稀土更为亏损(Sm/Yb = 5.5~9.5),反映其残留固相以富含石榴子石为特征。Kay & Mpodozis指出,并非所有具埃达克岩特点的岩浆都会发生矿化,正如中安第斯地区所表现的那样,大规模矿化开始之前这里也有一些埃达克岩浆侵位(可能指示角闪岩刚开始小规模分解),但没有明显矿化的记录;而该地区最后阶段的埃达克岩浆(Sm/Yb比值>5.5指示以石榴子石为主导的“干的”残留固相组合)也无明显矿化。大规模矿化作用与强烈的埃达克岩浆活动是耦合的,二者仅仅发生在部分熔融过程中角闪石向残留石榴子石大规模转变的阶段。因为这个时期会有大量的源区角闪石分解,使生成的岩浆富含成矿所需要的大量水流体和挥发份,产生的埃达克岩浆成为潜在的富挥发份成矿母岩浆。

6.3 高氧逸度条件是埃达克岩浆Cu、Au成矿的关键制约因素

Cu是亲硫元素,在火成岩中主要形成含铜硫化物,也有部分赋存于铁镁矿物之中(Speer,1984;Hendry,1981)。

Au为亲硫和亲铁元素,在火成岩中,主要分布于硫化物内,铁钛氧化物和铁镁矿物次之(Boyle,1979;Bornhorst,1986)。因此,是否形成Cu和Au富集的岩浆,部分熔融和埃达克岩浆穿过地幔和地壳到达浅部的整个过程中硫化物是否饱和或稳定起决定作用。

硫化物饱和与否的关键控制因素是氧逸度(f_{O_2}),高的 f_{O_2} 是岩浆不产生硫化物过饱和的决定因素(如Richards,1995)。在高 f_{O_2} 条件下,硫化物是不稳定的,硫将以 SO_4^{2-} 和 SO_2 的形式溶解在硅酸盐熔体中(Burnham,1980),在这种条件下,亲硫元素Cu和Au在部分熔融和岩浆结晶过程中的行为类似于不相容元素,逐步于熔体相中富集。因此,要形成Cu、Au高度富集的岩浆,部分熔融和岩浆运移过程中保持高 f_{O_2} (抑制硫化物饱和)是关键。

埃达克岩浆由洋壳部分熔融产生,并经历了与地幔楔橄榄岩的相互作用。最近的研究表明,埃达克岩浆以高氧逸度为特征(Oyarzun *et al.*,2001;张旗等,2004)。Mungall *et al.*(2002)和王强等(2003,2004)强调斑岩铜矿成矿与板片熔体的高氧逸度有关,他们认为板片熔体可能携带了大量的 Fe_2O_3 ,而富 Fe_2O_3 的熔体进入地幔楔将导致地幔通道中氧逸度增高,使地幔中的金属硫化物被氧化,从而有利于地幔中的亲硫元素Cu、Au等进入熔体(Mungall *et al.*,2002;王强等,2003,2004;候增谦等,2003)。

6.4 挥发份的出溶及大规模富含Cu、Au成矿流体的形成

挥发分Cl在高温高压下是Cu、Au等金属元素的强烈配合剂,它们将与Cu和Au形成稳定配合物随岩浆一起迁移。高氧逸度的,富集成矿元素Cu、Au以及挥发组份 H_2O 、Cl、S等的埃达克岩浆快速上升到浅位环境时,压力的快速释放将引起大规模 H_2O 流体的出溶或产生去气作用,Cu和Au的挥发分配合物将强烈分配进入流体相形成含矿流体。支持含矿富挥发份流体出溶的主要依据有:(1)现代活火山喷气排放出大量的 H_2O 、Cl、F、S、 CO_2 和Cu、Au(Hendenquist,1994;Lowenstern,1993;Le Cloarec,1992;Goff,1994);(2)常常发育含Cu硫化物子晶的高盐度流体包裹体和流体熔融包裹体(Lowenstern,1993;Heinrich,1992;Sawkins,1981);(3)流体/熔体分配实验表明,Cu强烈分配进入含Cl流体相(Candela,1984;Williams *et al.*,1995)。Au的高温(500℃以上)溶解度实验表明,Au强烈浓集于高Cl含量的流体相中(Benning,1996;Gammons,1997),显示Au可能具有与Cu相似的含Cl流体/熔体分配特点。

综上所述,埃达克岩有别于其他中酸性岩的独特性造就了其有利的成矿条件,这些有利条件包括:(1)高丰度成矿元素和挥发份的源区-洋壳;(2)独特的形成条件和成岩过程-角闪岩相向榴辉岩相转变导致洋壳熔融和富挥发份和成矿元素的埃达克岩浆的产生,埃达克岩浆与地幔楔的相互作用进一步导致成矿元素的富集;(3)高氧逸度条件-部分熔融和埃达克岩浆与地幔楔的相互作用时导致含Cu、Au

硫化物分解(成矿元素的释放)岩浆运移过程中抑制硫化物饱和作用;(4)压力的快速释放和挥发份的出溶,形成大规模富含 Cu、Au 的成矿流体。我们认为,高丰度成矿元素和挥发份的源区以及独特的形成条件和成岩过程等决定埃达克岩成矿潜力或规模,而氧逸度是埃达克岩成矿与否的决定性制约因素。因为 Cu、Au 主要赋存在硫化物中,而氧逸度制约硫化物的稳定性,在低氧逸度条件下,部分熔融以及岩浆结晶和运移过程中硫化物的稳定或结晶作用将导致岩浆中 Cu、Au 含量的减少,形成贫 Cu、Au 岩浆;而在高氧逸度条件下,部分熔融过程中硫化物的分解以及岩浆结晶和运移过程中硫化物的不稳定将使 Cu、Au 在岩浆过程中的行为类似不相容元素,使 Cu、Au 在岩浆不断富集。

7 结语和建议

东天山英云闪长质和奥长花岗岩具有与埃达克岩一致的高 Na、Al 和 Sr,低 Y 和 HREE 以及高 Sr/Y 等特点,这些岩石的 Nd 和 Sr 同位素组成与 MORB 以及洋壳熔融产生的埃达克岩 Nd 和 Sr 同位素组成接近,大部分埃达克质岩形成于晚古生代的岛弧背景,我们认为它们(除三岔口外)可能是俯冲洋壳熔融的产物。俯冲洋壳熔融产生埃达克质岩石的源区含有高丰度的 Cu、Au 和挥发份 H₂O、Cl 等,其岩浆可能在角闪岩相向榴辉岩相转变时产生,此时角闪石大规模分解有利于产生含丰富挥发份和成矿元素的埃达克质岩浆;这些岩石高 Mg[#]和 Ni 含量也表明其经历了与地幔楔橄榄岩的相互作用,暗示良好的成矿条件和成矿潜力。土屋-延东大型-超大型斑岩铜金矿的发现和突破使得国内许多部门将东天山地区作为寻找斑岩铜矿的重要靶区,本文新发现的埃达克质岩石为在该区进一步寻找相关的矿床提供了有用的线索。

应当指出,由于经费和野外工作条件限制,我们不可能在东天山调查所有中酸性小岩体,因此东天山地区肯定还有着更多的埃达克岩有待发现和研究。我们建议加强该区与埃达克岩有关的找矿工作,特别是应加强已有矿化区内埃达克岩的工作,有望发展为大型和超大型矿床。我们也建议开展该区埃达克岩与 Cu、Au 成矿关系的基础研究,如开展岩体中副矿物硫化物 Cu、Au 分析以及暗色矿物角闪石和黑云母中 Cu、Au、Cl、F 含量和氧逸度(Fe³⁺/Fe³⁺ + Fe²⁺ 比值)研究,尤其是斑晶角闪石和黑云母往往形成于岩浆流体出溶和去气作用发生之前,它们能指示其母岩浆的初始 Cu、Au 丰度和 Cl、F 含量及氧化还原状态,在很大程度上,可以作为评价岩体成矿潜力的示踪矿物。

References

Atherton M P and Petford N. 1993. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust. *Nature* 362, 144 - 146
 Benning L G. 1996. Hydrosulfide complexing of gold (I) in hydrothermal solutions from 150 to 500°C and 500 to 1500 bars.

Geochimica et Cosmochimica Acta, 60 1849 - 1872
 Bomhorst T J. 1986. Partitioning of gold in young calc-alkaline volcanic rocks from Guatemala. *J. Geol.* 94 412 - 418
 Boyle R W. 1979. The geochemistry of gold and its deposits. *Geol. Surv. Can. Bull.* 208
 Burnham C W. 1980. Late-stage processes of felsic magmatism: Society of Mining Geologists of Japan Special Issue. 8 1 - 11
 Candela P A. 1984. The partitioning of copper and molybdenum between silicate melts and aqueous fluids. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48 373 - 380
 Defant M J, Xu J F, Kepezhinskas P, Wang Q, Zhang Q and Xiao L. 2002. Adakites - some variations on a theme. *Acta Petrologica Sinica*, 18, 129 - 142
 Defant M J and Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature* 347, 662 - 665
 Drummond M S, Defant M J and Kepezhinskas P. 1996. Petrogenesis of slab-derived trondhjemite-tonalite-dacite/adakite magmas. *Transactions of the Royal society of Edinburgh, Earth Sciences* 87, 205 - 215
 Feeley T C and Hacker M D. 1995. Intracrustal derivation of Na-rich andesite and dacite magmas: an example from Volcan Ollag e. *Andean Central Volcanic Zone. J. Geol.* 103, 213 - 225
 Gammons C H. 1997. Chemical mobility of gold in porphyry-epithermal environment. *Econ. Geol.* 92 45 - 59
 Goff F. 1994. Gold degassing and deposition at Galeras Volcano Columbia. *GAS Today*, 4(101) 241 - 247
 Heinrich C A. 1992. Segregation of ore metals between magmatic brine and vapour: A fluid inclusion study using PIXE microanalysis. *Economic Geology*, 87 1566 - 1583
 Hendenquist J W. 1994. The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits. *Nature*, 370: 519 - 527
 Hofmann A W. 1988. Chemical differentiation of the Earth: the relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 90: 297 - 314
 Hou Z Q, Gao Y F, Meng X J, Qu X M and Huang W. 2004. Genesis of adakitic porphyry and tectonic controls on the Gangdese Miocene porphyry copper belt in the Tibetan orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 239 - 248 (in Chinese with English abstract)
 Ji J S, Tao H X and Zeng Z. 1994. Geology and mineralization of Kanggurtag gold matelogenic belt, East Tianshan. Beijing: Geological Publishing House, 1 - 325 (in Chinese with English abstract).
 Kay S M and Mpodozis C. 2001. Central Andean ore deposits linked to evolving shallow subduction systems and thickening crust. *GSA Today*, 11(3): 4 - 9
 Le Cloarec J. 1992. Radioactive isotopes and trace elements in gaseous emissions from White island, New Zealand. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 108 19 - 28
 Li J Y, Wang K H, Li W Q, Guo H C, Song B, Wang Y. 2002. Tectonic evolution since the late Paleozoic and mineral prospecting in eastern Tianshan Mountains, NW China. *Xinjiang Geology*, 20(4): 295 - 301 (in Chinese with English abstract).
 Li H Q, Chen F W, Lu Y F, Yang H M, Guo J, Mei Y P. 2004. Zircon SHRIMP U-Pb age and Strontium isotopes of mineralized granitoids in the Sanchakou copper polymetallic deposit, East Tianshan Mountain. *ACTA GEOSCIENTICA SINICA*, 25(2): 191 - 195 (in Chinese with English abstract).
 Liang X R, Wei G J, Li X H and Liu Y. 2002. Rapid and precise measurement for ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd isotopic ratios using a multi-collector inductive coupled plasma mass spectrometer. *Rock and Mineral Analysis*. 21(4) 247 - 251 (in Chinese with English abstract).
 Liu H T, Zhang Q, Liu J M, Ye J, Zeng Q D and Yu C M. 2004. Adakite versus porphyry copper and epithermal gold deposits: a possible metallogenetic specialization of magmatism required in-deep assessment. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 205 - 218 (in Chinese with English abstract).
 Lowenstern J B. 1993. Evidence for a copper-bearing fluid in magma

- erupted at the valley of ten thousand smokes, Alaska. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 114: 409–421
- Ma R S, Shu L S, Sun J Q. 1997. Tectonic evolution and metallogeny of eastern Tianshan mountains. Beijing: Geological Publishing House, 1–202 (in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Yang J M, Han C M. 2002. Metallogenic system and dynamic mode of Cu-Au and polymetallic ore deposits in eastern Tianshan. *Earth Sciences*, 27(4): 413–424 (in Chinese with English abstract).
- Martin H. 1999. Adakitic magmas: modern analogues of Archean granitoids. *Lithos* 46, 411–429
- Mungall J E. 2002. Roasting the mantle: slab melting and the genesis of major Au and Au-rich Cu deposits. *Geology*, 30: 915–918
- Oyarzun R, Marquez A, Lillo J, Lopez I, Rivera S, 2001. Giant versus small porphyry copper deposits of Cenozoic age in northern Chile: adakitic versus normal calc-alkaline magmatism. *Mineralium Deposita*, 36: 794–798
- Qin K Z, Fang T H, Wang S L. 2002. Plate tectonics division, evolution and metallogenic settings in eastern Tianshan Mountains, NW China. *Xinjiang Geology*, 20(4): 302–308 (in Chinese with English abstract).
- Qu X M, Hou Z Q, Li Y G. 2002. Ore-bearing adakites found in the Gangdese collision-orogenic belts. *Mineral Deposits*, 21 (suppl.): 215–218 (in Chinese with English abstract).
- Rapp R P and Watson E B. 1995 Dehydration melting of metabasalt at 8–32 kbar: Implications for continental growth and crust-mantle recycling. *J. Petrol.* 36, 891–931
- Rapp R P, Shimizu M D, Norman G S and Applegate G S. 1999. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: experimental constraints at 3.8 GPa. *Chem. Geol.* 160, 335–356
- Richards J. 1995. Alkalic-type epithermal gold deposits-A reviews. *Mineralogical Association of Canada Short Course Series*, p367–400
- Rui Z Y, Liu Y L, Wang L S and Wang Y T. 2002. The eastern Tianshan porphyry copper belt in Xinjiang and its tectonic framework. *Acta Geologica Sinica*, 76(1): 83–94 (in Chinese with English abstract).
- Rui Z Y, Zhang L S, Chen Z Y, Wang L S, Liu Y L and Wang Y T. 2004. Approach on source rock or source region of porphyry copper deposits. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 229–238 (in Chinese with English abstract)
- Sajona F G, Maury R C. 1998. Association of adakites with gold and copper mineralization in the Philippines. *CR ACAD SCI II A*, 325(1): 27–34
- Sawkins F J. 1981. High copper contents of fluid inclusions in quartz from northern Sonora: implications for ore genesis theory. *Geology*, 9: 37–40
- Sen C and Dunn T. 1994. Dehydration melting of a basaltic composition amphibolite at 1.5 and 2.0 GPa: implications for the origin of adakites. *Contrib. Mineral. Petrol.* 117, 394–409
- Thieblemont D, Stern G, Lescuyer J L. 1997. Epithermal and porphyry deposits: the adakit connection. *CR ACAD SCI II A*, 325(2): 103–109
- Wang F T, Feng J, Hu J W. 2001. The characteristics and significance of Tuwu large-type porphyry copper deposit in Xinjiang. *Chinese Geology*, 28(1): 36–39 (in Chinese with English abstract).
- Wang Q (a), Xu J F, Zhao Z H, Xiong X L, Bao Z W. 2003. Petrogenesis of the Mesozoic intrusive rocks in the Tongling Area, Anhui Province, China and constraint to Geodynamics process. *Science in China, Series D*, 46(8): 801–815
- Wang Q (b), Zhao Z H, Xu J F, Li X H, Bao Z W, Xiong X L. 2003. Liu Yimao, Petrology and metallogenesis of the Yanshanian adakite-like rocks in the Eastern Yangtze Block, Sciences in China, Series D, 46(Suppl): 164–176
- Wang Q (c), Zhao Z H, Bai Z H, Bao Z W, Xu J F, Xiong X L, Mei H J, Wang Y X. 2003. Carboniferous adakites and Nb-enriched arc basaltic rocks association in the Alataw Mountains, north Xinjiang: interactions between slab melt and mantle peridotite and implications for crustal growth. *Chinese Science Bulletin*, 48(19): 2108–2115
- Wang Q (d), Xu J F, Zhao Z H, 2003. Intermediate-acid igneous rocks strongly depleted in heavy rare earth elements (or adakitic rocks) and copper-gold metallogenesis. *Earth Science Frontiers*, 10(4): 561–572 (in Chinese with English abstract).
- Wang Q (e), Zhao Z H, Xu J F, Bai Z H, Wang J X, Liu C X. 2004. The geochemical comparison between the Tongshankou and Yinzu adakitic intrusive rocks in southeastern Hubei: (delaminated) lower crustal melting and the genesis of porphyry copper deposit. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 351–360 (in Chinese with English abstract).
- Williams TJ and Candela P A. 1995. The partitioning of copper between silicate melts and two-phase aqueous fluids: an experimental investigation at 1 kbars, 800°C and 0.5 kbar, 850°C. *Contrib. Mineral. Petrol.* 121: 388–399
- Wu F Y, Ge W C and Sun Y D. 2002. The definition, discrimination of adakites and their geological role. In: Xiao *et al.* (eds.) *The ways of investigation on granitoids*. Beijing: Geological Publishing House, 172–191 (in Chinese with English abstract).
- Xiong X L, Li X H, Xu J F, Li W X, Zhao Z H, Wang Q. 2003. Extremely high-Na adakite-like magmas derived from alkali-rich basaltic underplate: The Zhantang andesites in the Huichang Basin of SE China. *Geochemical Journal*, 37: 233–252
- Xiong X L, Zhao Z H, 2001a. Adakite-type sodium-rich rocks in Awulale Mountain of west Tianshan: Significance for the vertical growth of continental crust, *Chinese Science Bulletin* 46(7): 811–817
- Xiong X L, Zhao Z H, Bai Z H, Mei H J, Xu J F and Wang Q. 2001b. Origin of Awulale adakitic sodium-rich rocks in western Tianshan: Constraints for Nd and Sr isotopic compositions. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4): 514–522 (in Chinese with English abstract)
- Xiong X L, Shi M Q, Chen F R. 2001c. Biotite as a tracer of Cu and Au mineralization in hypergene-subvolcanic plutons. *Mineral Deposits*, 17(4): 514–522 (in Chinese with English abstract).
- Xiong X L, Adam J and Green T H. 2005. Rutile stability and rutile/melt HFSE partitioning during partial melting of hydrous basalt: Implications for TTTG genesis. *Chemical Geology*, 218: 339–359
- Xu J F, Shinjo R, Defant M J, Wang Q and Rapp R P. 2002. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rock in the Ningzhen area of east China: Partial melting of delaminated lower continental crust? *Geology* 30(12): 1111–1114
- Xu J F, Wang Q and Yu X Y. 2000. Geochemistry of high-Mg andesites and adakitic andesite from the Sanchazi block of the Mian-Lue ophiolitic m. lange in the Qingling Mountains, central China: Evidence of partial melting of the subducted Paleo-Tethyan crust. *Geochem. J.* 34, 359–377
- Zhai M G. 2004. Adakite and related granitoids from partial melting of continental lower crust. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 193–194 (in Chinese with English abstract)
- Zhang L C, Qin K Z, Ying J F, Xia B and Shu J S. 2004. The relationship between ore-forming processes and adakitic rock in Tuwu-Yandong porphyry copper metallogenic belt, eastern Tianshan Mountains. *Acta Petrologica*, 20(2): 259–268 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Q, Qin K Z, Wang Y L, Zhang F Q, Liu H T and Wang Y. 2004. Study on adakite broadened to challenge the Cu and Au exploration in China. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 195–204 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Wang Y, Qian Q, Yang J H, Wang Y L, Zhao T P, Guo G J. 2001. The characteristics and tectonic-metallogenetic significance of the adakites in Yanshan Period from eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2): 236–244 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Wang Y and Wang Y L. 2003. On the relationship between adakite and its tectonic setting. *Geotectonica et metamogonia* 27, 101–108 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Q, Wang Y, Liu W, Wang Y L. 2002. Adakite: Its characteristics and implications. *Geological Bulletin of China*. 21, 431–435 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 侯增谦, 高永丰, 孟祥金, 曲小明, 黄卫. 2004. 西藏冈底斯中新世斑岩铜矿带: 埃达克质斑岩成因和构造控制. 岩石学报, 20(2): 239-248
- 姬生, 陶洪祥, 曾章仁, 杨兴科, 张连昌. 1994. 东天山康古尔金矿带地质与成矿. 北京: 地质出版社. 1-325
- 李华芹, 陈富文, 路远发, 杨红梅, 郭敬, 梅玉萍. 2004. 东天山三岔口铜矿区矿化岩体 SHRIMP U-Pb 年代学及锶同位素地球化学特征研究. 25(2): 191-195
- 李锦轶, 王克卓, 李文铅, 郭华春, 宋彪, 王瑜. 2002. 东天山晚古生代以来大地构造与矿产勘查. 新疆地质, 20(4): 295-301
- 梁细荣, 韦刚健, 李献华, 刘颖. 2002. 多收集器等离子体质谱快速精确测定钨同位素比值. 岩矿测试, 21(4): 247-251
- 刘红涛, 张旗, 刘建明, 叶杰, 曾庆栋, 于昌明. 2004. 埃达克岩与铜金成矿作用: 有待深入研究的岩浆成矿关系. 岩石学报, 20(2): 205-218
- 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
- 毛景文, 杨建民, 韩春明. 2002. 东天山铜金多金属矿床成矿系统和成矿地球动力学模型. 地球科学, 27(4): 413-424
- 秦克章, 方同辉, 王书来. 2002. 东天山板块构造分区、演化与成矿地质背景研究. 新疆地质, 20(4): 302-308
- 曲小明, 侯增谦, 李佑国. 2002. 冈底斯碰撞造山带中发现埃达克岩. 矿床地质, 21(增刊): 215-218
- 芮宗瑶, 刘玉琳, 王龙生, 王义天. 2002. 新疆东天山斑岩铜矿带及其大地构造意义. 地质学报, 76(1): 83-94
- 芮宗瑶, 张立生, 陈振宇, 王龙生, 刘玉琳, 王义天. 2004. 斑岩铜矿的源岩或源区探讨. 岩石学报, 20(2): 229-238

- 王福同, 冯京, 胡建卫. 2001. 新疆土屋大型斑岩铜矿床特征及发现意义. 中国地质, 28(1): 36-39
- 王强, 许继峰, 赵振华. 2003. 强烈亏损重稀土元素中酸性侵入岩(或埃达克质岩)与成矿. 地学前缘, 10(4): 561-572
- 王强, 赵振华, 许继峰, 白正华, 王建新, 刘成新. 2004. 鄂东南铜山口、殷祖埃达克质(adakitic)侵入岩的地球化学特征对比(拆沉)下地壳熔融与斑岩铜矿的成. 岩石学报, 20(2): 351-360
- 吴福元, 葛文春, 孙有德. 2002. 埃达克岩的概念、识别标志及其地质意义. 见肖庆辉等: 花岗岩研究思维与方法. 北京: 地质出版社, 172-191
- 熊小林, 石满全, 陈繁荣. 2001. 浅成-次火山岩黑云母 Cu, Au 成矿示踪研究. 矿床地质, 17(4): 514-522
- 熊小林, 赵振华. 2001. 西天山阿吾拉勒埃达克质岩石成因: Nd 和 Sr 同位素组成的限制. 岩石学报, 17(4): 514-522
- 翟明国. 2004. 埃达克岩和大陆下地壳重熔的花岗岩类. 岩石学报, 20(2): 193-194
- 张连昌, 秦克章, 英基丰, 夏斌, 舒建生. 2004. 东天山土屋-延东斑岩铜矿带埃达克岩及其与成矿作用的关系. 岩石学报, 20(2): 259-268
- 张旗, 王焰, 王元龙. 2003. 埃达克岩与构造环境. 大地构造与成矿学, 卷27, 2期, 101-108
- 张旗, 秦克章, 王元龙, 张福勤, 刘红涛, 王焰. 2004. 加强埃达克岩研究, 开创中国 CuAu 找矿的新局面. 岩石学报, 20(2): 195-204
- 张旗, 王焰, 刘伟, 王元龙. 2002. 埃达克岩的特征及其意义. 地质通报, 第21卷第7期, 431-435
- 张旗, 王焰, 钱青, 杨进辉, 王元龙, 赵太平, 郭光军. 2001. 中国东部埃达克岩的特征及其构造成矿意义. 岩石学报, 17(2): 236-244