



黑龙江省东部晚三叠世—中侏罗世硅质岩地球化学特征及形成环境

孙 雷¹, 曾 振^{2,3}, 崔维龙⁴, 王晓杰², 赵青年², 郝振群², 李 寒², 张宏泽², 周 江²

1. 中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034; 2. 航天建筑设计研究院有限公司, 北京 100162;
3. 吉林大学 地球科学学院, 吉林 长春 130061; 4. 中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029

摘 要: 黑龙江省东部那丹哈达增生杂岩主要由晚三叠世—中侏罗世含放射虫硅质岩组成, 并夹有镁铁—超镁铁质杂岩和晚古生代浅海沉积岩。对黑龙江省东部石场、勤得利和胜利农场地区硅质岩分析显示, 样品 Al_2O_3 、 TiO_2 、 CaO 、 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TFe}_2\text{O}_3)$ 及 ΣREE 整体上偏低, 具有较高的 SiO_2 含量, 为纯硅质岩。结合 Al-Fe-Mn 三角图和 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值, 表明该地区硅质岩的形成过程与海底热液作用无关。元素判别图解及地球化学特征揭示, 黑龙江东部三个地区的硅质岩形成于大陆坡及边缘海环境。

关键词: 硅质岩; 晚三叠世—中侏罗世; 地球化学特征; 形成环境; 黑龙江省

GEOCHEMISTRY AND FORMATION ENVIRONMENT OF THE LATE TRIASSIC-MIDDLE JURASSIC SILICEOUS ROCKS IN EASTERN HEILONGJIANG PROVINCE

SUN Lei¹, ZENG Zhen^{2,3}, CUI Wei-long⁴, WANG Xiao-jie², ZHAO Qing-nian²,
HAO Zhen-qun², LI Han², ZHANG Hong-ze², ZHOU Jiang²

1. Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China; 2. China Aerospace Architecture Design and Research Institute Co., Ltd., Beijing 100162, China; 3. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China; 4. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

Abstract: The Nadanhada accretionary complex in eastern Heilongjiang Province is mainly composed of the Late Triassic-Middle Jurassic radiolarian siliceous rocks intercalated with the mafic-ultramafic complex and Late Paleozoic shallow sea sedimentary rocks. The analysis results of siliceous rocks from Shichang, Qindeli and Shengli Farm areas in eastern Heilongjiang Province show that the samples, characterized by generally low Al_2O_3 , TiO_2 , CaO and ΣREE contents and low $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TFe}_2\text{O}_3)$ ratio and high SiO_2 content, are pure siliceous rocks. Combined with the Al-Fe-Mn triangle diagram and $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ ratio, it is indicated that the formation of siliceous rocks has nothing to do with seafloor hydrothermal process. The element discrimination diagram and geochemical characteristics reveal the siliceous rocks in the above three areas were formed in continental slope and marginal sea environment.

Key words: siliceous rock; Late Triassic-Middle Jurassic; geochemical characteristic; formation environment; Heilongjiang Province

收稿日期: 2019-05-08; 修回日期: 2021-04-13. 编辑: 张哲.

基金项目: 中国地质调查局项目“黑龙江省东部隐伏盆地页岩气地质条件综合调查”(1212011120973); “松辽盆地北部及外围石炭—二叠系油气地质调查”(DD20190097).

作者简介: 孙雷(1988—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事油气基础地质调查研究工作, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail//sunlei2326@126.com

通信作者: 曾振(1989—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事基础地质调查研究及工程地质工作, 通信地址 北京市丰台区看丹路 4 号院, E-mail//23911989@qq.com

0 引言

中国东北地区及其邻区大地构造位置上属于中亚造山带的东段,由多个微陆块拼贴而成^[1-4],自西向东依次为额尔古纳-兴安地块、松辽地块、佳木斯-兴凯地块及那丹哈达地体(或增生杂岩带)(图1)。古生代期间,该区域经历了古亚洲洋构造体系的演化^[5-6],并在晚二叠世—早三叠世古亚洲洋最终闭合,多个微陆块完成碰撞拼合。中国学者对这一更大的拼合板块有“黑龙江板块”^[7-8]及“佳蒙地块”^[9]等称谓,俄罗斯学者多称之为“阿穆尔微大陆或超地体”^[10],表现以侧向增生为特征的陆壳增生方式^[6,11-13]。因此,该区域构造形式十分复杂,表现为一个复合式构造区域,并在东北地区最东侧大陆边缘形成了一条近南北向展布的俯冲杂岩增生带^[14-17]。研究区位于东北地区东缘那丹哈达增生杂岩带上,南以密山-伊曼断裂为界与主体位于俄罗斯境内的兴凯地块相邻,西以跃进山断裂^[18]或同江-密山断裂^[19]为界与佳木斯地块毗邻,东隔乌苏里江与俄罗斯境内巨大的锡霍特-阿林增生杂岩带相连,为典型古太平洋板块俯冲-增生的产物^[20-21],是研究古太平洋板块向欧亚大陆之下俯冲演化过程的天然实验室。

黑龙江东部那丹哈达增生杂岩中发育大量硅质岩,张庆龙等最早对其进行了报道,并对那丹哈达增生杂岩中放射虫化石与日本美津浓地体中放射虫化石进行详细对比^[18,22];俄罗斯学者 G. I. Buryi 以该地区硅质岩中的牙形刺为研究对象,确定硅质岩的地质时代^[23];李朋武等对那丹哈达与日本美津浓地区的同时代硅质岩进行详细的古地磁对比^[24];马金萍等曾对黑龙江东部晚三叠世—早侏罗世放射虫硅质岩的特征及油气远景进行论述,但相对缺少对黑龙江省东部硅质岩的地球化学研究^[25]。基于此,作者在前人研究基础上,对黑龙江省东部石场、勤得利和胜利农场地区进行系统采样(图1b),野外地质调查与室内综合研究相结合,通过系统对比和总结研究区硅质岩的主量、稀土元素特征,对其成因和形成环境进行探讨,以期为该地区中生代时期的构造动力学背景研究提供依据。

1 地质背景与岩石特征

那丹哈达增生杂岩位于黑龙江省东部,主要由一套具有洋壳组合特点的晚三叠世—中侏罗世超镁铁质

岩、镁铁质堆晶岩、枕状玄武岩、硅质岩及泥质硅质岩组成,其中含有晚古生代灰岩岩块。这套杂岩作为俄罗斯境内巨大的锡霍特-阿林中生代增生杂岩带的一部分,总体上呈近南北走向,向西突出的弧状展布。生物地层学及古地磁学研究普遍认为,该杂岩是一个在中—晚侏罗世初由低纬度快速迁移到佳木斯地块东缘的外来地体^[18,20,22,26-29]。本区出露地层以中生界和新生界为主:主要发育中—上三叠统十八垧地组($T_{2-3}s$),上三叠统大坝北山组(T_3d)、大佳河组(T_3dj),上三叠统一侏罗统大岭桥组(T_3-J_1d)和下侏罗统永福桥组(J_1y)。它们之间均为整合接触,其中大佳河组地层主要为大面积硅质岩,局部夹泥岩或粉砂岩、透镜状灰岩,含丰富的牙形刺及放射虫化石,厚度大于1060 m。区内构造活动、岩浆活动及变质变形样式都十分复杂,具有复杂的发展演化历史。

石场地区硅质岩($46^{\circ}51'20''N, 133^{\circ}20'13''E$)呈黄白色,中薄层—层状构造,层厚6~15 cm,夹薄层泥岩,部分硅质岩中含有少量放射虫,发育典型尖棱褶皱,褶皱轴面近直立,部分地区褶皱轴面近水平,枢纽呈近南北向(图2a、b、c)。勤得利地区硅质岩($47^{\circ}59'54''N, 133^{\circ}11'2''E$)呈灰黑色,中薄层—层状构造,层厚5~12 cm,水平层理明显发育,夹薄层泥岩(图2d)。胜利农场地区存在两种颜色的硅质岩($47^{\circ}29'54''N, 133^{\circ}53'39''E$),其一为灰白色,其二为紫红色,硅质岩中未发现放射虫,两种硅质岩均为中薄层—层状构造,层厚6~12 cm,水平层理明显发育,夹薄层泥岩(图2e、f)。

2 样品采集与分析方法

在黑龙江省东部地区采集了16件样品,样品的主量、微量和稀土元素测试均由澳实分析检测(广州)有限公司完成。主量元素由荷兰 PANalytical 生产的 Axios 仪器利用熔片 X 射线荧光光谱法(XRF)测定,并采用等离子光谱和化学法测定进行互相检测。微量元素和稀土元素采用美国 Perkin Elmer 公司生产的 Elan 9000 型电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)测定。主量元素分析精度优于5%,微量和稀土元素分析精度优于10%。

3 分析结果

黑龙江省东部三个地区的16件硅质岩样品的主

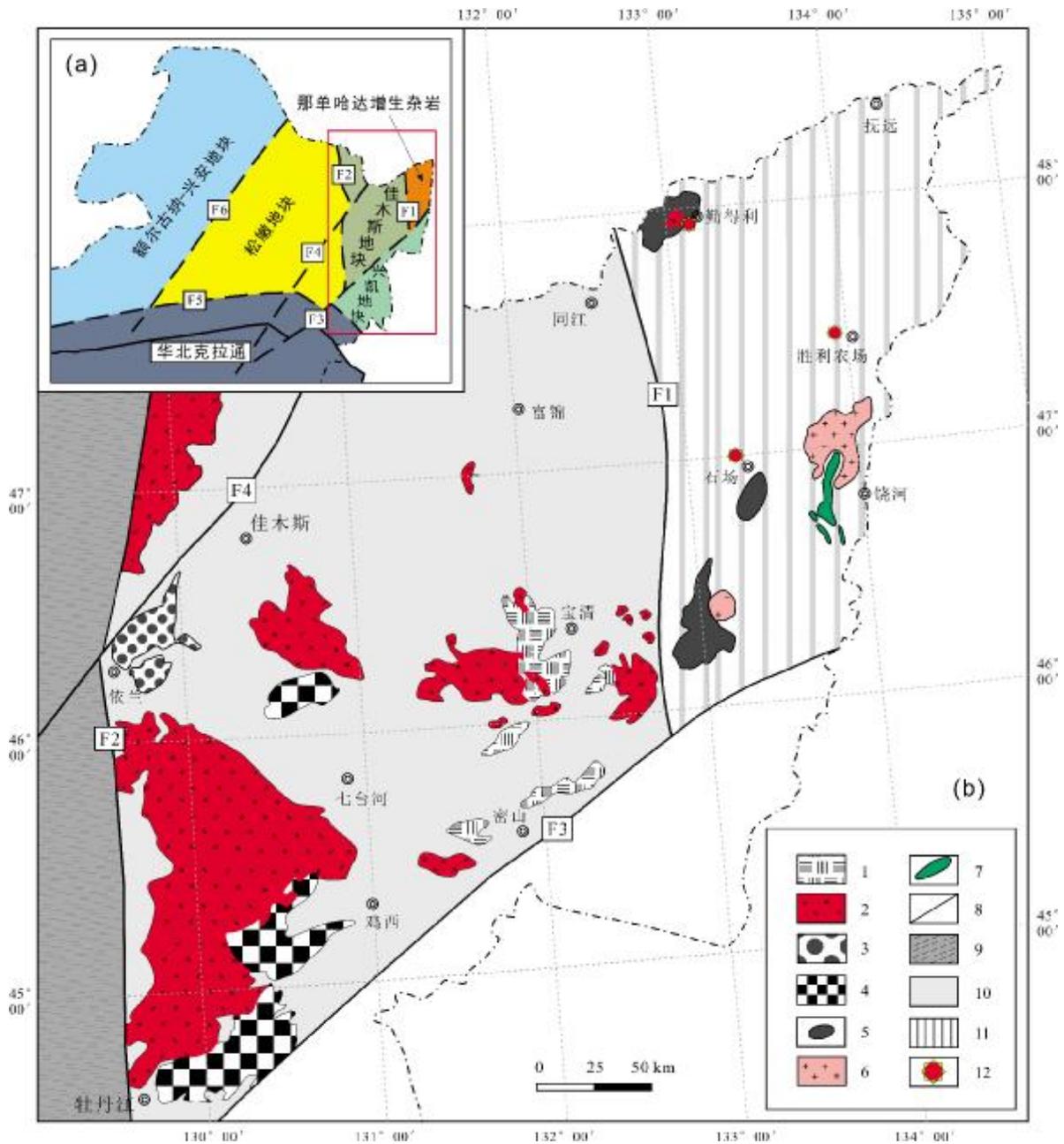


图 1 研究区大地构造位置及区域地质简图

(据文献[3, 8])

Fig. 1 Geotectonic location and regional geological sketch map of the study area

(From References [3, 8])

1—古生代地层 (Paleozoic strata); 2—晚古生代花岗岩 (Late Paleozoic granite); 3—黑龙江杂岩 (Heilongjiang complex); 4—麻山杂岩 (Mashan complex); 5—构造窗 (tectonic window); 6—中生代花岗岩 (Mesozoic granite); 7—超基性岩 (ultrabasic rock); 8—断层 (fault); 9—松辽地块 (Songliao massif); 10—佳木斯地块 (Jiamusi massif); 11—那丹哈达增生杂岩 (Nadanhada accretionary complex); 12—采样位置 (sampling location); F1—同江—密山断裂带 (Tongjiang-Mishan fault zone); F2—嘉荫—牡丹江断裂带 (Jiayin-Mudanjiang fault zone); F3—敦化—密山断裂带 (Dunhua-Mishan fault zone); F4—佳木斯—依兰断裂带 (Jiamusi -Yilan fault zone); F5—西拉木伦—长春—珲春断裂带 (Xar Moron-Changchun-Hunchun fault zone); F6—黑河—嫩江—开鲁断裂带 (Heihe-Nenjiang-Kailu fault zone)



图2 黑龙江省东部硅质岩野外及显微照片

Fig. 2 Field and microscopic photographs of siliceous rocks in eastern Heilongjiang Province

a—石场地区尖棱褶皱的硅质岩(siliceous rock with chevron fold in Shichang area); b—石场地区平卧褶皱的硅质岩(siliceous rock with recumbent fold in Shichang area); c—含放射虫的硅质岩显微照片(micrograph of radiolarian siliceous rock); d—勤得利地区硅质岩(siliceous rock in Qindeli area); e—胜利农场灰白色硅质岩(offwhite siliceous rock in Shengli Farm); f—胜利农场紫红色硅质岩(mauve siliceous rock in Shengli Farm)

量、微量和稀土元素测试结果见表1。

3.1 主量元素

硅质岩是指由化学作用、生物和生物化学作用以及某些火山作用所形成的富含 SiO_2 (一般超过 70%) 的岩石^[30]。石场地区黄白色硅质岩、勤得利地区灰黑色硅质岩、胜利农场灰白色硅质岩和紫红色硅质岩的主量元素特征为 SiO_2 含量最高, 分别为 94.39%~95.95%、95.42%~96.76% 和 94.76%~96.48%、94.82%~95.77%, 平均为 95.11%、95.53%、95.62% 和 95.16%; Al_2O_3 含量平均为 1.71%、1.74%、1.98% 和 1.83%; TFe_2O_3 平均为 1.13%、0.78%、0.62% 和 0.94%; Na_2O 平均为 0.04%、0.14%、0.02% 和 0.01%; TiO_2 平均为 0.06%、0.07%、0.09% 和 0.08%。石场地区、勤得利地区以及胜利农场地区的硅质岩普遍具有较高的 SiO_2 含量, 属于纯硅质岩范围(SiO_2 为 91.00%~99.80%)^[31]。

3.2 稀土元素

由黑龙江省东部那丹哈达增生杂岩中硅质岩的北美页岩标准化稀土元素分配曲线(图3)所示, 勤得利、石场以及胜利农场的硅质岩呈近于平坦型的分配曲线。

石场地区黄白色硅质岩、勤得利地区灰黑色硅质

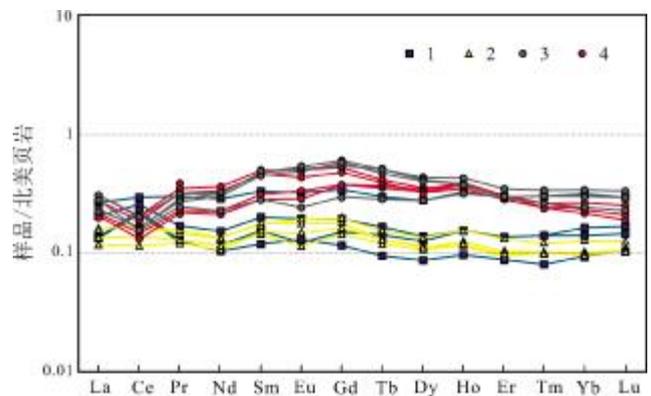


图3 黑龙江省东部硅质岩北美页岩标准化稀土元素分配模式图
(北美页岩标准化值据文献[32])

Fig. 3 NASC-normalized partition REE patterns of siliceous rocks in eastern Heilongjiang Province
(NASC-normalized value from Reference [32])

1—石场地区硅质岩(siliceous rock in Shichang area); 2—勤得利地区硅质岩(siliceous rock in Qindeli area); 3—胜利农场灰白色硅质岩(offwhite siliceous rock in Shengli Farm); 4—胜利农场紫红色硅质岩(mauve siliceous rock in Shengli Farm)

岩、胜利农场灰白色硅质岩和紫红色硅质岩的 ΣREE 含量平均为 24.06×10^{-6} 、 35.55×10^{-6} 、 43.34×10^{-6} 和 40.94×10^{-6} ; ΣLREE 含量平均为 21.47×10^{-6} 、 32.00×10^{-6} 、

表 1 黑龙江省东部硅质岩样品地球化学分析结果

Table 1 Contents of major, trace and rare earth elements in the siliceous rocks in eastern Heilongjiang Province

样品	石场地区黄白色硅质岩					勤得利地区灰黑色硅质岩					胜利农场灰白色硅质岩					胜利农场紫红色硅质岩				
	Y01	Y02	Y03	Y04	平均值	Y05	Y06	Y07	Y08	平均值	Y09	Y10	Y11	Y12	平均值	Y13	Y14	Y15	Y16	平均值
SiO ₂	95.24	94.39	94.87	95.95	95.11	95.42	96.08	95.51	96.72	95.93	95.71	96.48	95.52	94.76	95.62	95.08	94.97	94.82	95.77	95.16
Al ₂ O ₃	2.07	1.76	1.62	1.40	1.71	1.92	1.70	1.91	1.42	1.74	1.66	1.83	2.25	2.17	1.98	1.68	1.72	1.97	1.96	1.83
TFe ₂ O ₃	0.79	1.62	1.14	0.95	1.13	1.07	0.67	0.72	0.64	0.78	0.84	0.57	0.47	0.61	0.62	0.92	0.94	0.97	0.93	0.94
MgO	0.18	0.14	0.18	0.09	0.15	0.21	0.18	0.24	0.10	0.18	0.12	0.15	0.14	0.16	0.14	0.19	0.20	0.24	0.23	0.22
CaO	0.03	0.02	0.03	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.03	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	*	0.01	0.01	0.01
Na ₂ O	0.05	0.05	0.04	0.03	0.04	0.05	0.09	0.12	0.28	0.14	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	*	0.01	0.01	0.02	0.01
K ₂ O	0.57	0.44	0.42	0.38	0.45	0.59	0.47	0.56	0.27	0.47	0.37	0.42	0.40	0.42	0.40	0.62	0.62	0.64	0.63	0.63
TiO ₂	0.07	0.06	0.05	0.05	0.06	0.08	0.06	0.08	0.05	0.07	0.09	0.08	0.10	0.09	0.09	0.07	0.07	0.08	0.08	0.08
P ₂ O ₅	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.06	0.02	0.05	0.05	0.05	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03
MnO	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	*	*	0.01	*	*	0.01	0.01	0.01
Total	99.03	98.51	98.39	98.88	98.70	99.37	99.29	99.21	99.52	99.35	98.91	99.61	98.95	98.28	98.94	98.59	98.55	98.78	99.67	98.90
MnO/TiO ₂	0.14	0.17	0.40	0.20	0.23	0.13	0.17	0.25	0.20	0.19	0.11	0.13	-	-	0.12	-	-	0.13	0.13	0.13
K ₂ O/Na ₂ O	11.40	8.80	10.50	12.67	10.84	11.80	5.22	4.67	0.96	5.66	18.50	21.00	40.00	42.00	30.38	-	62.00	64.00	31.50	52.50
TFe ₂ O ₃ /TiO ₂	11.29	27.00	22.80	19.00	20.02	13.38	11.17	9.00	12.80	11.59	9.33	7.13	4.70	6.78	6.99	13.14	13.43	12.13	11.63	12.58
Al/(Al+Fe)	0.72	0.52	0.59	0.60	0.61	0.64	0.72	0.73	0.69	0.70	0.66	0.76	0.83	0.78	0.76	0.65	0.65	0.67	0.68	0.66
La	5.20	5.10	4.30	3.80	4.60	6.50	4.30	8.50	4.20	5.88	9.70	8.90	7.40	7.50	8.38	6.60	6.80	9.70	8.80	7.98
Ce	12.00	12.00	10.10	8.40	10.63	18.60	16.40	21.20	15.60	17.95	14.80	11.40	12.00	11.60	12.45	9.60	10.40	14.60	13.30	11.98
Pr	1.22	1.14	1.01	0.96	1.08	1.34	1.01	2.37	0.96	1.42	2.51	1.94	2.18	2.28	2.23	1.73	1.77	2.74	2.53	2.19
Nd	4.50	4.40	3.80	3.50	4.05	5.00	3.80	9.30	3.40	5.38	10.50	7.40	9.90	10.50	9.58	6.90	7.40	11.80	10.80	9.23
Sm	0.98	1.00	0.82	0.86	0.92	1.14	0.87	1.87	0.67	1.14	2.70	1.59	2.62	2.71	2.41	1.60	1.78	2.81	2.64	2.21
Eu	0.24	0.22	0.14	0.18	0.20	0.24	0.15	0.40	0.16	0.24	0.62	0.30	0.61	0.66	0.55	0.35	0.41	0.62	0.54	0.48
Gd	1.00	0.91	0.75	0.84	0.88	1.01	0.78	1.77	0.60	1.04	2.80	1.54	3.05	3.12	2.63	1.95	1.95	2.72	2.47	2.27
Tb	0.13	0.11	0.10	0.11	0.11	0.14	0.12	0.25	0.08	0.15	0.42	0.24	0.40	0.43	0.37	0.31	0.30	0.35	0.33	0.32
Dy	0.79	0.64	0.62	0.66	0.68	0.80	0.72	1.61	0.50	0.91	2.46	1.59	2.36	2.39	2.20	1.97	1.89	2.02	1.86	1.94
Ho	0.16	0.13	0.12	0.12	0.13	0.16	0.16	0.34	0.10	0.19	0.44	0.33	0.40	0.40	0.39	0.40	0.39	0.38	0.36	0.38
Er	0.45	0.35	0.33	0.32	0.36	0.46	0.46	1.01	0.30	0.56	1.16	1.00	0.99	0.97	1.03	1.01	1.03	1.00	0.95	1.00
Tm	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.07	0.07	0.15	0.04	0.08	0.17	0.15	0.13	0.13	0.15	0.12	0.13	0.13	0.12	0.13
Yb	0.39	0.31	0.30	0.30	0.33	0.50	0.43	0.97	0.29	0.55	1.05	0.91	0.75	0.75	0.87	0.67	0.72	0.82	0.75	0.74
Lu	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.08	0.07	0.14	0.05	0.09	0.16	0.14	0.11	0.11	0.13	0.09	0.10	0.12	0.11	0.11
U	0.65	0.53	0.59	0.49	0.57	2.05	2.71	2.37	1.93	2.27	1.09	0.71	0.82	0.72	0.84	0.25	0.26	0.28	0.27	0.27
Th	1.25	1.22	1.07	0.84	1.10	1.44	1.03	1.26	0.78	1.13	1.70	1.61	1.78	1.52	1.65	1.44	1.40	1.72	1.67	1.56
U/Th	0.52	0.43	0.55	0.58	0.52	1.42	2.63	1.88	2.47	2.10	0.64	0.44	0.46	0.47	0.50	0.17	0.19	0.16	0.16	0.17
(La/Yb) _N	1.29	1.59	1.39	1.23	1.38	1.26	0.97	0.85	1.40	1.12	0.89	0.95	0.96	0.97	0.94	0.95	0.91	1.15	1.14	1.04
(La/Ce) _N	1.13	1.11	1.11	1.18	1.13	0.91	0.68	1.05	0.70	0.84	1.71	2.03	1.61	1.69	1.76	1.79	1.70	1.73	1.72	1.74
δCe	1.04	1.08	1.06	0.96	1.04	1.37	1.71	1.03	1.69	1.45	0.65	0.60	0.65	0.61	0.63	0.62	0.65	0.62	0.61	0.63
δEu	1.06	1.01	0.78	0.93	0.95	0.98	0.80	0.97	1.11	0.97	0.99	0.84	0.94	0.99	0.94	0.86	0.96	0.98	0.93	0.93
ΣREE	27.18	26.41	22.49	20.15	24.06	36.04	29.34	49.88	26.95	35.55	49.49	37.43	42.90	43.55	43.34	33.30	35.07	49.81	45.56	40.94
ΣLREE	24.14	23.86	20.17	17.70	21.47	32.82	26.53	43.64	24.99	32.00	40.83	31.53	34.71	35.25	35.58	26.78	28.56	42.27	38.61	34.06
ΣHREE	3.04	2.55	2.32	2.45	2.59	3.22	2.81	6.24	1.96	3.56	8.66	5.90	8.19	8.30	7.76	6.52	6.51	7.54	6.95	6.88
L/H	7.94	9.36	8.69	7.22	8.30	10.19	9.44	6.99	12.75	9.84	4.71	5.34	4.24	4.25	4.64	4.11	4.39	5.61	5.56	4.91

注: Al/(Al+Fe) 比值为 $Al_2O_3/(Al_2O_3+TFe_2O_3)$ 的值, * 为检测线以下, 实验测试由澳实分析检测(广州)有限公司完成. 含量单位: 主量元素为%, 微量、稀土元素为 10^{-6} .

35.58×10^{-6} 和 34.06×10^{-6} ; Σ HREE 含量平均为 2.59×10^{-6} 、 3.56×10^{-6} 、 7.76×10^{-6} 和 6.88×10^{-6} ; Σ LREE/ Σ HREE 的比值分别介于 7.22~9.36、6.99~12.75、4.24~5.34 和 4.11~5.61, 均富集轻稀土。

石场和勤得利地区具有 Ce 正异常, 石场地区、勤得利地区硅质岩的 δ Ce 分别为 0.96~1.08、1.03~1.71, 平均为 1.04、1.45, 勤得利地区硅质岩的 δ Ce 值明显高于石场地区; 而胜利农场灰白色、紫红色两种硅质岩具有明显的 Ce 负异常, δ Ce 为 0.60~0.65, 平均为 0.63。石场、勤得利和胜利农场三个地区硅质岩的 δ Eu 值没有明显的差别, δ Eu 平均为 0.95、0.97 和 0.94。

4 硅质岩地球化学特征及形成环境

硅质岩的 Fe_2O_3 与洋脊扩张中心的热液有关, 主要赋存于洋中脊附近的富含金属矿物的沉积物中, Al_2O_3 和 TiO_2 与大陆和岛弧物质输入相关, MnO 可以作为来自大洋深部的标志^[33-35], 硅质岩中的 Al、Fe、Ti 等元素在其成岩过程中能够保持稳定。因此, 以上元素可以有效地示踪硅质岩的沉积环境和硅的来源^[31, 35-36]。

石场地区黄白色硅质岩的 $\text{TFe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 比值较高, 为 11.29~27.00, 平均为 20.02; 胜利农场灰白色硅质岩的 $\text{TFe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 比值较低, 为 4.40~9.33, 平均为 6.98; 勤得利地区灰黑色硅质岩和胜利农场紫红色硅质岩的 $\text{TFe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 比值介于二者之间, 分别为 9.00~13.38 和 11.63~13.43, 平均为 11.59 和 12.58。三个地区四组硅质岩的 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TFe}_2\text{O}_3)$ 比值差异不大, 介于 0.52~0.83 之间, 平均为 0.68。胜利农场灰白色硅质岩的 $(\text{La}/\text{Ce})_N$ 值为 1.61~2.03, 平均为 1.76; 紫红色硅质岩的 $(\text{La}/\text{Ce})_N$ 值为 1.70~1.79, 平均为 1.74。二者的 $(\text{La}/\text{Ce})_N$ 值均明显高于石场(1.11~1.18, 平均 1.13)和勤得利地区硅质岩(0.68~1.05, 平均 0.84)。

利用 Al-Fe-Mn 三角图解进行判别^[37-38], 通常所有热液成因硅质岩比值均落于富 Fe 端, 非热液成因硅质岩比值均落于富 Al 端。本文硅质岩样品均落入生物成因区域之上靠近 Al 端元一侧(图 4)。 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值的大小是判断硅质岩是否受海底热液作用影响的指示标志, 四组硅质岩仅有一个样品的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为 0.96, 其余样品 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为 4.67~64, 明显不同于海底热液作用所形成的硅质岩($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} < 1$)^[39]。因此, 该地区硅质岩未遭受海底热液作用, 而是直接受生物

作用和陆源影响成因的硅质岩, 这与样品中含有一定数量的放射虫化石的现象一致。

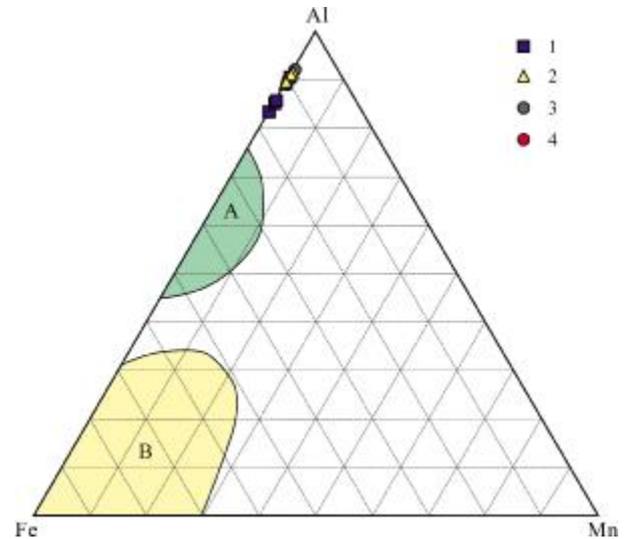


图 4 黑龙江省东部地区硅质岩 Al-Fe-Mn 判别图解
(据文献[37-38])

Fig. 4 The Al-Fe-Mn discrimination diagram of siliceous rocks in eastern Heilongjiang Province
(After References [37-38])

A—生物成因硅质岩区 (biogenic siliceous rocks area); B—热液成因硅质岩区 (hydrothermal siliceous rock area); 1—石场地区硅质岩 (siliceous rock in Shichang area); 2—勤得利地区硅质岩 (siliceous rock in Qindeli area); 3—胜利农场灰白色硅质岩 (offwhite siliceous rock in Shengli Farm); 4—胜利农场紫红色硅质岩 (mauve siliceous rock in Shengli Farm)

元素 Th 和 U 在沉积物中的含量取决于沉积环境的氧化环境, 其中 Th 不受水体氧化还原条件影响, 常以不溶的 Th^{4+} 形式存在, 而 U 在强还原条件下以不溶的 U^{4+} 形式存在, 导致沉积物中 U 富集。石场地区硅质岩 U/Th 值为 0.43~0.58, 平均为 0.52; 胜利农场地区灰白色硅质岩 U/Th 值为 0.44~0.64, 平均为 0.50; 胜利农场地区紫红色硅质岩 U/Th 值为 0.16~0.19, 平均为 0.17。三者的 U/Th 值小于 0.75, 反映石场和胜利农场硅质岩形成于富氧环境。而勤得利地区硅质岩的 U/Th 值大于 1.25, 为 1.42~2.63, 平均为 2.10, 反映勤得利硅质岩形成于厌氧环境^[40]。

硅质岩中 Mn 元素常常被认为是来自大洋深部的标志元素, Sugisaki 等^[41]曾指出, MnO/TiO_2 比值可以作为判断硅质岩沉积物距离大洋盆地远近的指示标志, 开阔大洋环境形成的硅质岩的 MnO/TiO_2 介于 0.5~3.5

之间,距大陆较近的大陆坡及边缘海沉积的硅质岩的 MnO/TiO_2 小于 0.5。石场、勤得利和胜利农场地区的硅质岩 MnO/TiO_2 分别为 0.14~0.40、0.13~0.25 和 0.11~0.13,表明研究区硅质岩形成于距大陆较近的大陆坡和边缘海沉积环境。

研究认为,大陆边缘 $(La/Yb)_N$ 平均值为 1.1~1.4,洋中脊附近 $(La/Yb)_N$ 平均值为 0.3 左右,深海平原硅质岩 $(La/Yb)_N$ 介于二者之间^[42]。石场、勤得利和胜利农场地区硅质岩的 $(La/Yb)_N$ 分别为 1.23~1.59、0.85~1.40 和 0.89~1.15(表 1),说明黑龙江省东部三个地区的硅质岩形成于大陆边缘环境。

在环境判别图(图 5)中,大部分硅质样品落入“大

陆边缘”和“远洋盆地”或附近区域内。综上所述,黑龙江东部那丹哈达增生杂岩中四组硅质岩可能形成于大陆坡及边缘海环境。

5 结论

(1)黑龙江省东部石场地区黄白色硅质岩、勤得利地区灰黑色硅质岩、胜利农场灰白色硅质岩和紫红色硅质岩的主量元素中 SiO_2 含量最高,分别为 94.39%~95.95%、95.42%~96.76%、94.76%~96.48% 和 94.82%~95.77%,其次为 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 K_2O ,均普遍具有较高的 SiO_2 ,属于纯硅质岩;稀土元素分配曲线基本一致,呈近于平坦型的分配曲线,富集轻稀土。

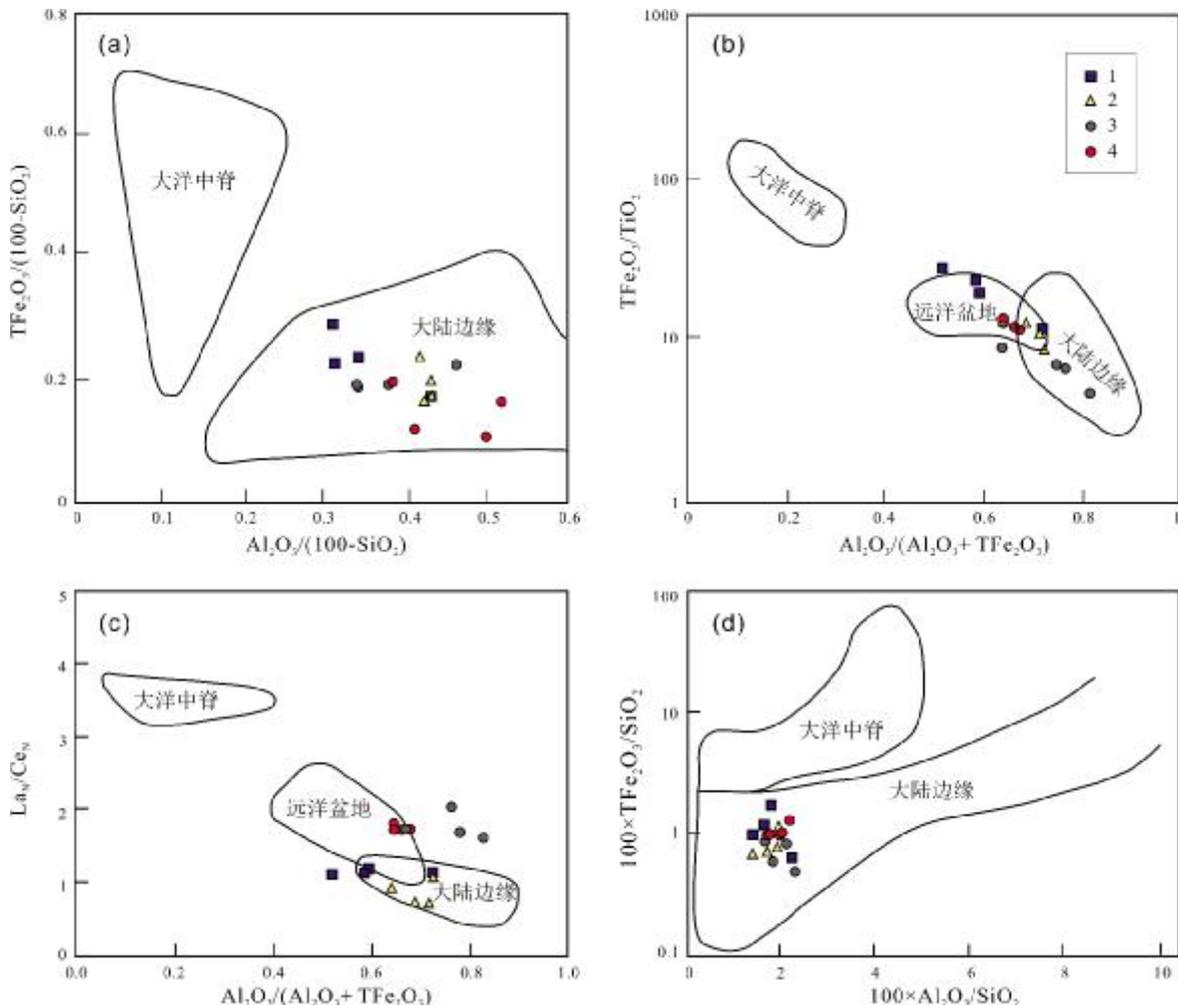


图 5 黑龙江省东部硅质岩形成环境判别图

(据文献[35, 43])

Fig. 5 The discrimination diagram for formation environment of siliceous rocks in eastern Heilongjiang Province

(After References [35, 43])

1—石场地区硅质岩(siliceous rock in Shichang area); 2—勤得利地区硅质岩(siliceous rock in Qindeli area); 3—胜利农场灰白色硅质岩(offwhite siliceous rock in Shengli Farm); 4—胜利农场紫红色硅质岩(mauve siliceous rock in Shengli Farm)

(2)通过主量与微量元素地球化学特征分析,黑龙江省东部石场、勤得利和胜利农场地区的硅质岩形成于大陆坡及边缘海环境.

参考文献(References):

- [1]吴福元,曹林.东北亚地区的若干重要基础地质问题[J].世界地质,1999,18(2):1-13.
Wu F Y, Cao L. Some important problems of geology in northeastern Asia[J]. World Geology, 1999, 18(2): 1-13.
- [2]吴福元, Wilde S, 孙德有.佳木斯地块片麻状花岗岩的锆石离子探针 U-Pb 年龄[J].岩石学报,2001,17(3):443-452.
Wu F Y, Wilde S, Sun D Y. Zircon SHRIMP U-Pb ages of gneissic granites in Jiamusi massif, northeastern China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17(3): 443-452.
- [3]Wilde S A, Zhang X Z, Wu F Y. Extension of a newly identified 500 Ma metamorphic terrane in North East China: Further U-Pb SHRIMP dating of the Mashan complex, Heilongjiang Province, China [J]. Tectonophysics, 2000, 328(1/2): 115-130.
- [4]Wilde S A, Wu F Y, Zhang X Z. Late Pan-African magmatism in northeastern China: SHRIMP U-Pb zircon evidence from granitoids in the Jiamusi massif[J]. Precambrian Research, 2003, 122(1/4): 311-327.
- [5]Sengor A M C, Natal'in B A. Paleotectonics of Asia: Fragments of a synthesis [M]//Yin A, Harrison M. The tectonic evolution of Asia. Cambridge: Cambridge University Press, 1996: 486-640.
- [6]Li J Y. Permian geodynamic setting of Northeast China and adjacent regions: Closure of the Paleo-Asian Ocean and subduction of the Paleo-Pacific Plate [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2006, 26(3/4): 207-224.
- [7]张贻侠,孙运生,张兴洲,等.中国满洲里-绥芬河地学断面[M].北京:地质出版社,1998:1-34.
Zhang Y X, Sun Y S, Zhang X Z, et al. The Manzhouli-Suifenhe geoscience section, China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998: 1-34. (in Chinese)
- [8]Zhang X Z, Guo Y, Zhou J B, et al. Late Paleozoic-Early Mesozoic tectonic evolution in the east margin of the Jiamusi massif, eastern Northeastern China [J]. Russian Journal of Pacific Geology, 2015, 9(1): 1-10.
- [9]王成文,金巍,张兴洲,等.东北及邻区晚古生代大地构造属性新认识[J].地层学杂志,2008,32(2):119-136.
Wang C W, Jin W, Zhang X Z, et al. New understanding of the Late Paleozoic tectonics in Northeastern China and adjacent areas [J]. Journal of Stratigraphy, 2008, 32(2): 119-136.
- [10]Khanchuk A I. Pre-Neogene tectonics of the Sea-of-Japan region: a view from the Russian side [J]. Earth Science, 2001, 55(5): 275-291.
- [11]Sengor A M C, Natal'in B A, Burtman V S. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia [J]. Nature, 1993, 364(6435): 299-307.
- [12]Xiao W J, Windley B F, Hao J, et al. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt [J]. Tectonics, 2003, 22(6): 1069.
- [13]Windley B F, Alexeiev D, Xiao W J, et al. Tectonic models for accretion of the Central Asian orogenic belt [J]. Journal of the Geological Society, 2007, 164(1): 31-47.
- [14]Faure M, Natal'in B. The geodynamic evolution of the eastern Eurasian margin in Mesozoic times [J]. Tectonophysics, 1992, 208(4): 397-411.
- [15]Natal'in B. History and modes of Mesozoic accretion in southeastern Russia [J]. Island Arc, 1993, 2(1): 15-34.
- [16]曾振,张兴洲,周建波,等.跃进山杂岩中二叠纪变玄武岩的锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其地质意义 [J]. 大地构造与成矿学, 2018, 42(2): 365-378.
Zeng Z, Zhang X Z, Zhou J B, et al. Geochemistry and zircon U-Pb age of Permian metabasalts in the Yuejinshan complexes and its tectonic implications [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2018, 42(2): 365-378.
- [17]崔维龙.佳木斯地块东缘二叠纪俯冲洋壳的发现及意义[D].长春:吉林大学,2018.
Cui W L. The discovery and significance of Permian subducting oceanic crust on the eastern margin of Jiamusi massif, NE China [D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [18]张庆龙,水谷伸治郎,小嶋智,等.黑龙江省那丹哈达地体构造初探[J].地质论评,1989,35(1):67-71.
Zhang Q L, Shinjino M, Satoru K, et al. The Nadanhada terrane in Heilongjiang Province [J]. Geological Review, 1989, 35(1): 67-71.
- [19]黑龙江省地质矿产局.黑龙江省区域地质志[M].北京:地质出版社,1993:1-619.
Bureau of Geology and Mineral Resources of Heilongjiang Province. Regional geology of Heilongjiang Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993: 1-619. (in Chinese)
- [20]Kojima S. Mesozoic terrane accretion in Northeast China, Sikhotealin and Japan regions [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1989, 69: 213-232.
- [21]Mizutani S, Kojima S. Mesozoic radiolarian biostratigraphy of Japan and collage tectonics along the eastern continental margin of Asia [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1992, 96(1/2): 3-22.
- [22]张庆龙,水谷伸治郎,小嶋智.放射虫化石及地体对比研究 [J].古生物学报,1997,36(2):245-252.
Zhang Q L, Shinjino M, Satoru K. Radiolaria and correlation study of terranes [J]. Acta Palaeontologica Sinica, 1997, 36(2): 245-252.
- [23]布锐 G I. 东北那达哈达岭硅质岩中的三叠纪牙形刺 [J]. 微体古生

- 物学报, 1996, 13(2): 207-214.
- Buryi G I. Triassic conodonts from the cherts of Nadanhada range, northeast China[J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 1996, 13(2): 207-214.
- [24]李朋武, 张世红, 申宁华. 黑龙江省那丹哈达与日本美浓地区古地磁结果对比及意义[J]. *长春地质学院学报*, 1997, 27(1): 62-66.
- Li P W, Zhang S H, Shen N H. The contrast of paleomagnetic results between Nadanhada area, Heilongjiang province and Mino area, Japan, and its significance[J]. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, 1997, 27(1): 62-66.
- [25]马金萍, 张婷婷, 薛林福. 黑龙江东部晚三叠世—早侏罗世放射虫硅质岩特征及油气远景[J]. *地质与资源*, 2008, 17(4): 312-313, 317.
- Ma J P, Zhang T T, Xue L F. Characteristics of the T₃-J₁ radiolarian chert and potential for hydrocarbon in eastern Heilongjiang Province [J]. *Geology and Resources*, 2008, 17(4): 312-313, 317.
- [26]水谷伸治郎, 邵济安, 张庆龙. 那丹哈达地体与东亚大陆边缘中生代构造的关系[J]. *地质学报*, 1989(3): 204-216.
- Shinjino M, Shao J A, Zhang Q L. The Nadanhada terrane in relation to Mesozoic tectonics on continental margins of east Asia[J]. *Acta Geological Sinica*, 1989(3): 204-216.
- [27]杨惠心, 李朋武, 禹惠民. 中国东北地区主要地体古地磁学研究[J]. *长春科技大学学报*, 1998, 28(2): 203-205, 212.
- Yang H X, Li P W, Yu H M. Palaeomagnetic study of the main terranes, northeast area, China[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 1998, 28(2): 203-205, 212.
- [28]邵济安, 王成源, 唐克东, 等. 那丹哈达岭地层与地体的关系[J]. *地层学杂志*, 1990, 14(4): 286-291.
- Shao J A, Wang C Y, Tang K D, et al. Relationship between strata and terrane of the Nadanhada range [J]. *Journal of Stratigraphy*, 1990, 14(4): 286-291.
- [29]张世红, 施央申, 孙岩, 等. 黑龙江完达山造山带及其与那丹哈达地体的关系[J]. *南京大学学报(地球科学)*, 1991, 3(3): 287-294.
- Zhang S H, Shi Y S, Sun Y, et al. On the relation between Wandashan orogenic belt and Nadanhada terrane in Heilongjiang province[J]. *Journal of Nanjing University (Earth Sciences)*, 1991, 3(3): 287-294.
- [30]曾允孚, 夏文杰. 沉积岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 1986: 190-199.
- Zeng Y F, Xia W J. *Sedimentary petrology*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1986: 190-199.
- [31]Murray R W, Brink M R B T, Gerlach D C, et al. Rare earth, major, and trace element composition of Monterey and DSDP chert and associated host sediment: Assessing the influence of chemical fractionation during diagenesis [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1992, 56(7): 2657-2671.
- [32]Haskin L A, Haskin M A, Frey F A, et al. Relative and absolute terrestrial abundances of the rare earths[M]//Ahrens L H. *Origin and Distribution of the Elements*. Oxford: Pergamon Press, 1968: 889-912.
- [33]Boström K, Peterson M N A. The origin of aluminum-poor ferromanganous sediments in areas of high heat flow on the East Pacific Rise[J]. *Marine Geology*, 1969, 7(5): 427-447.
- [34]Girty G H, Ridge D L, Knaack C, et al. Provenance and depositional setting of Paleozoic chert and argillite, Sierra Nevada, California[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1996, 66(1): 107-118.
- [35]Murray R W. Chemical criteria to identify the depositional environment of chert: General principles and applications [J]. *Sedimentary Geology*, 1994, 90(3/4): 213-232.
- [36]杨建民, 王登红, 毛景文, 等. 硅质岩岩石化学研究方法及其在“镜铁山式”铁矿床中的应用[J]. *岩石矿物学杂志*, 1999, 18(2): 108-120.
- Yang J M, Wang D H, Mao J W, et al. The petrochemical research method for silicalite and its application to the “Jingtieshan Type” iron deposits[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 1999, 18(2): 108-120.
- [37]Adachi M, Yamamoto K, Sugisaki R. Hydrothermal chert and associated siliceous rocks from the northern Pacific: Their geological significance as indication of ocean ridge activity [J]. *Sedimentary Geology*, 1986, 47(1/2): 125-148.
- [38]Yamamoto K. Geochemical characteristics and depositional environments of cherts and associated rocks in the Franciscan and Shimanto Terranes[J]. *Sedimentary Geology*, 1987, 52(1/2): 65-108.
- [39]张汉文. 秦岭泥盆系的热液沉积岩及其与矿产的关系——概论秦岭泥盆纪的海底热水作用[J]. *中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊*, 1991(31): 15-39.
- Zhang H W. On hydrothermal sedimentary rocks and their relationships with mineral resources in Devonian period of Qinling area, China[J]. *Northwest Geoscience*, 1991(31): 15-39.
- [40]Jones B, Manning D A C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones [J]. *Chemical Geology*, 1994, 111(1/4): 111-129.
- [41]Sugisaki R, Yamamoto K, Adachi M. Triassic bedded cherts in central Japan are not pelagic[J]. *Nature*, 1982, 298(5875): 644-647.
- [42]杨水源, 姚静. 安徽巢湖平顶山中二叠统孤峰组硅质岩的地球化学特征及成因[J]. *高校地质学报*, 2008, 14(1): 39-48.
- Yang S Y, Yao J. Geochemistry and origin of siliceous rocks from the Gufeng Formation of Middle Permian in the Pingdingshan area, Chaohu region, Anhui Province [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2008, 14(1): 39-48.
- [43]Murray R W, Brink M R B T, Gerlach D C, et al. Rare earth, major, and trace elements in chert from the Franciscan complex and Monterey Group, California: Assessing REE sources to fine-grained marine sediment [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991, 55(7): 1875-1895.