

山东原瞳金矿区煌斑岩的 地球化学特征及其地质意义

陈松岭^{1,2}, 杨柳^{1,2}, 邹海洋^{1,2}, 杨牧^{1,2}

(1. 中南大学 有色金属成矿预测教育部重点实验室, 长沙 410083;
2. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083)

摘要: 为了解山东招远原瞳金矿区煌斑岩成因及其形成环境, 开展了岩石地球化学研究。结果表明: 矿区内煌斑岩 SiO_2 含量为 49.29%~52.71%(质量分数)、 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值范围为 1.17~2.91, 属钾质钙碱性系列; 岩石稀土元素分配型式右倾, 具弱负铕异常; Ti、Mn、Cu 和 Zn 等过渡元素富集, Cr 和 Ni 相对亏损。结合煌斑岩 K-Ar 全岩年龄(102.29~119.34 Ma), 认为本区煌斑岩来源于富集地幔, 与早期苏鲁洋板块消减俯冲及太平洋洋壳熔融产生的富集流体均关系密切, 其形成与华北克拉通中生代构造体制转折和岩石圈减薄事件有关, 是胶东中生代大规模岩浆活动的一部分。

关键词: 原瞳; 煌斑岩; 地球化学; 俯冲作用

中图分类号: P588.13

文献标志码: A

Geochemical characteristics and genesis of lamprophyres in Yuantuan gold ore district, Shandong Province, China

CHEN Song-ling^{1,2}, YANG Liu^{1,2}, ZOU Hai-yang^{1,2}, YANG Mu^{1,2}

(1. Key Laboratory of Metallogenesis Prediction of Nonferrous Metals, Ministry of Education,
Central South University, Changsha 410083, China;

2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: To investigate the genesis and forming environment of lamprophyres in Yuantuan gold ore district, the petrogeochemical study was carried out. The results show that the mass fraction of SiO_2 changes from 49.29% to 52.71%, the ratio of K_2O to Na_2O changes from 1.17 to 2.91, belonging to potassium calc-alkaline series. The distribution of REE of samples is right deviation, with slightly negative Eu anomalies. The lamprophyres are characterized by enrichment in transitional elements, such as Ti, Mn, Cu, Zn and depletion in Cr and Ni. Combined with the age of the lamprophyres by K-Ar dating method (102.29–119.34 Ma), it is concluded that the lamprophyres of Yuantuan gold ore district originate from enriched mantle, closely associate with the fluid from early subduction of Sulu Ocean and melting of the Pacific Ocean Crust, and Mesozoic tectonic transition in North China craton and lithospheric thinning events, and it is part of large-scale Mesozoic magma activity of Jiaodong.

Key words: Yuantuan; lamprophyres; geochemistry; subduction

煌斑岩与壳幔相互作用及深部地幔部分熔融作用有成因联系^[1], 可反映深部构造岩浆作用、源区地球化学性质及相应的成矿作用^[2]。胶东金矿集区中生代晚期煌斑岩岩脉发育, 并与金成矿时空关系密切^[3-4],

深受地质研究者重视。前人研究显示本区煌斑岩与富集地幔和板块俯冲作用联系密切^[3, 5], 但胶东金矿集区中生代先后发生苏鲁洋板块消减俯冲、华北和扬子板块陆陆碰撞及伊泽奈崎洋俯冲, 区内煌斑岩成因及构

造背景目前尚存分歧^[5]。原瞳金矿区位于山东招远市北东, 矿区内煌斑岩发育并与金成矿空间关系紧密, 本文作者以原瞳金矿区煌斑岩为对象, 开展岩石学和岩石地球化学研究, 结合 K-Ar 法年代学约束, 在前人研究的基础上, 探讨区内煌斑岩成因及其形成环境。

1 区域地质背景

胶东矿集区地处华北地台东缘, 西边系郯庐断裂, 北部是秦皇岛—威海断裂, 南面以五莲—荣城断裂毗邻于著名的大别—苏鲁超高压变质带。本区既处于华北板块与扬子板块的大陆深俯冲带边缘, 又位于古太平洋板块向欧亚大陆俯冲的前缘, 在中生代先后经历了华北板块与扬子板块的碰撞造山运动、古太平洋板块向欧亚板块下的俯冲运动、中国东部岩石圈增厚—减薄等多次地质事件^[6-8]。区内主要出露晚太古宙胶东群、古元古代荆山群和粉子山群中高级岩变质岩以及白垩系陆相中酸性火山岩建造、新生代河湖相冲积物。区内中生代岩浆活动强烈, 以发育中酸性深成岩体为主, 并伴有大量中基性脉岩发育^[8]。

原瞳金矿区位于胶东金矿集区招莱金成矿带中部, 地表多为第四系浮土所覆盖, 出露玲珑花岗岩及多种中基性脉岩(见图 1)。矿体产于玲珑混合花岗岩与深部隐伏郭家岭花岗闪长岩的内接触带, 受次级断裂构造控制。矿区煌斑岩脉发育, 主要包括云煌岩、闪辉正煌岩、角闪正煌岩、辉石正煌岩和闪斜煌斑岩等。现场观察依据穿插关系, 可划分为成矿期前、成矿期和成矿期后 3 个期次, 多数早期及成矿期的煌斑岩脉呈北东—北北东向产出, 常见与矿化蚀变带同时出现在同一构造带中, 少数呈近南北向产出, 晚期的煌斑岩脉往往沿北东东向断裂产出; 早期煌斑岩脉片理化发育且片理中往往有黄铁石英微细脉充填形成含金矿体, 成矿期煌斑岩脉也常具有较弱的矿化现象。后期煌斑岩脉蚀变不发育, 常切断含矿的石英脉。在本研究中, 样品采自与金矿体空间关系密切的早期及成矿期煌斑岩脉, 岩性为云煌岩及角闪正煌岩。

2 地球化学特征

2.1 分析方法

研究区煌斑岩的主要元素分析在国土资源部武汉矿产资源监督检测中心完成, 微量元素分析及稀土元

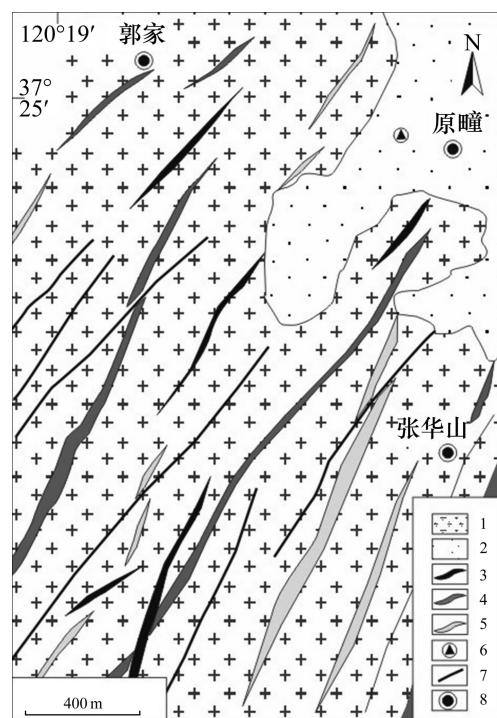


图 1 山东原瞳金矿区地质简图: 1—元古代玲珑花岗岩; 2—第四系; 3—煌斑岩类岩脉; 4—正长斑岩类岩脉; 5—闪长玢岩类岩脉; 6—金矿; 7—断裂带; 8—村镇

Fig. 1 Geological sketch map of Yuantuan gold deposit: 1—Proterozoic Linglong granite; 2—Quaternary; 3—Lamprophyre dyke; 4—Orthopyhyre dyke; 5—Diorite porphyries dyke; 6—Gold deposit; 7—Fault belt; 8—Town

素分析在中南大学地学与环境工程学院地质研究所 ICP-MS 分析室完成。

2.2 结果

原瞳金矿区煌斑岩地球化学分析结果及相应特征指数见表 1~3。在样品主量元素中, SiO_2 含量为 49.29%~55.80%, $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 含量为 4.03%~7.14%, 岩石里特曼指数 σ 为 2.47~5.80; 利用 ROCK 提出的煌斑岩分类方案^[9]($w(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})-w(\text{SiO}_2)$)图解(见图 2), 多数样品落入钙碱性煌斑岩范围。样品稀土特征相似, 轻稀土富集、REE 模式右倾(见图 3), 具弱负 Eu 异常(0.72~0.88), 可排除矿区煌斑岩起源于正常厚度的陆壳内或双倍陆壳中、上部的可能^[10]。在微量元素方面, 过渡元素蛛网图(见图 4)显示, 样品 Ti、Mn、Cu 和 Zn 等过渡元素富集, Cr 和 Ni 相对亏损, 均呈大致相同的 W 形, 类似地幔派生岩石过渡元素蛛网图的特征, 而 Cr 和 Ni 落在原生岩浆标准范围内($w(\text{Cr})=200 \times 10^{-6} \sim 500 \times 10^{-6}$, $w(\text{Ni})=90 \times 10^{-6} \sim 700 \times 10^{-6}$)^[11], 表明煌斑岩母岩浆来自上地幔源区^[2]。

表1 烜斑岩主量元素含量

Table 1 Major element components for lamporphryes

样品号	w/%												
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	CO ₂	H ₂ O
J1-1	49.29	0.93	13.34	3.04	4.55	0.13	7.86	8.41	1.89	2.48	0.45	3.71	3.41
D35	55.80	0.69	13.18	2.08	3.32	0.10	5.20	7.09	2.59	3.03	0.36	4.49	1.61
Y23-3	51.79	1.06	15.03	2.61	4.23	0.11	4.84	6.81	2.60	4.54	0.81	2.47	2.14
Y23-5	52.12	0.96	14.38	2.60	4.32	0.11	5.33	6.70	2.55	3.72	0.73	3.15	2.74
J7-1	50.85	0.77	10.77	2.82	5.12	0.12	8.74	9.84	1.55	4.51	0.80	1.58	1.95
J25-3	52.71	0.73	12.19	2.57	5.07	0.13	6.97	6.93	1.83	4.47	0.75	2.35	2.35

分析单位：国土资源部武汉矿产资源监督检测中心。

表2 烜斑岩稀土元素含量及相关参数

Table 2 REE contents and norms of lamprophyres

样品号	J1-1	D35	Y23-3	Y33-3	Y23-5	J7-1	J25-3
岩性	早期煌斑岩	早期煌斑岩	煌斑岩	煌斑岩	煌斑岩	晚期煌斑岩	闪云煌岩
w(La)/10 ⁻⁶	70.04	75.25	88.12	83.66	92.54	52.18	69.77
w(Ce)/10 ⁻⁶	127.60	125.50	181.10	147.60	172.00	95.90	131.50
w(Pr)/10 ⁻⁶	13.47	14.59	20.65	18.72	19.13	12.45	14.73
w(Nd)/10 ⁻⁶	47.41	49.57	72.78	67.12	67.17	47.45	54.04
w(Sm)/10 ⁻⁶	8.98	7.80	13.78	11.05	12.85	9.26	11.86
w(Eu)/10 ⁻⁶	1.85	1.93	3.12	2.87	2.92	2.02	2.51
w(Gd)/10 ⁻⁶	5.76	7.19	8.62	9.28	8.03	7.85	7.55
w(Tb)/10 ⁻⁶	0.90	0.84	1.25	1.10	1.19	1.10	1.21
w(Dy)/10 ⁻⁶	4.36	3.39	5.30	4.08	5.17	4.28	5.34
w(Ho)/10 ⁻⁶	0.90	0.77	0.96	0.84	0.96	0.89	0.96
w(Er)/10 ⁻⁶	2.21	1.81	2.18	1.85	2.21	1.81	2.12
w(Tm)/10 ⁻⁶	0.39	0.32	0.35	0.28	0.36	0.29	0.34
w(Yb)/10 ⁻⁶	1.94	1.98	1.61	1.53	1.79	1.55	1.67
w(Lu)/10 ⁻⁶	0.39	0.32	0.31	0.25	0.35	0.24	0.33
ΣREE/10 ⁻⁶	286.20	291.26	400.13	350.23	386.67	237.27	303.93
LREE/10 ⁻⁶	269.35	274.64	379.55	331.02	366.61	219.26	284.41
HREE/10 ⁻⁶	16.85	16.62	20.58	19.21	20.06	18.01	19.52
LREE/HREE	15.99	16.52	18.44	17.23	18.28	12.17	14.57
δ(Eu)	0.79	0.79	0.88	0.87	0.88	0.72	0.81
δ(Ce)	1.00	0.91	1.02	0.90	0.98	0.91	0.99
(La/Yb) _N	24.34	25.62	36.90	36.86	34.85	22.70	28.17

分析单位：中南大学地学与环境工程学院地质研究所 ICP-MS 分析室。

表3 烜斑岩微量元素含量

Table 3 Trace element contents of lamporphryes

样品号	w/10 ⁻⁶															
	Cu	Pb	Mn	Cr	Ni	Mo	Sn	V	Ag	Ti	Zn	Co	B	Ba	As	Bi
J1-1	34.1	77.2	1 006	316.0	145.0	0.87	2.0	163.0	0.180	2 813.12	136	40.0	4.0	1 276	0.48	0.08
Y23-3	22.2	18.6	701	140.2	60.8	0.65	1.1	94.8	0.094	2 401.24	80	20.0	3.5	1 158	0.45	0.11
Y23-5	23.1	14.1	702	212.3	101.3	0.96	1.9	150.5	0.075	3 445.41	79	27.2	3.7	1 184	0.29	0.08
J7-1	7.7	23.4	826	479.6	177.0	1.81	2.3	217.0	0.115	3 213.08	92	39.7	3.8	828	0.28	0.11
J25-3	38.0	48.1	1 035	370.9	197.1	1.09	2.3	151.8	0.223	2 699.34	136	34.3	3.6	1 173	0.51	0.13

分析单位：中南大学地学与环境工程学院地质研究所 ICP-MS 分析室。

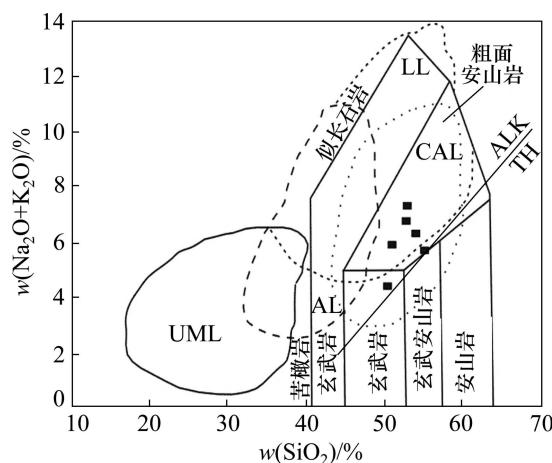


图2 煌斑岩的 $w(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ — $w(\text{SiO}_2)$ 图^[9]: CAL—钙碱性煌斑岩; AL—碱性煌斑; UML—超铁镁煌斑岩; LL—钾镁煌斑岩; ALK—碱性岩; TH—拉斑玄武岩

Fig. 2 $w(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ — $w(\text{SiO}_2)$ diagram of lamprophyres^[9]

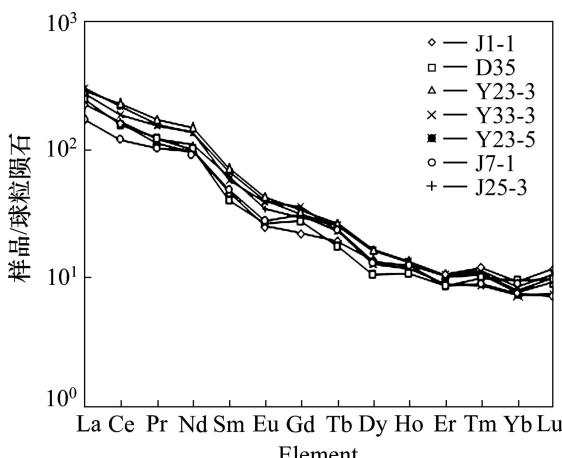


图3 煌斑岩稀土元素球粒陨石标准化配分曲线^[12]

Fig. 3 Chondrite-normalized REE patterns for lamprophyres^[12]

3 K-Ar 年龄

3.1 分析方法

Ar 同位素稀释法 K-Ar 测年测试单位为桂林矿产地质研究院测试中心。2 个样品采自原瞳矿区内煌斑岩脉, 其测试条件为稀释剂比例 $^{40}\text{Ar}/^{38}\text{Ar}=0.000\ 145\ 4$, $^{36}\text{Ar}/^{38}\text{Ar}=0.000\ 024\ 1$, 稀释剂总值为 7.952×10^{-11} mol, 稀释剂分号为 0; 采用衰变常数 $^{40}\text{K}/\text{K}=0.001\ 167$, $K_e=0.581\ 1 \times 10^{-10}\text{ a}^{-1}$, $K_\beta=4.962 \times 10^{-10}\text{ a}^{-1}$ 。

3.2 结果

K-Ar 全岩测年结果见表 4。矿区煌斑岩脉(Y8-1、Y33-2)的年龄在 $(104.38 \pm 2.09) \sim (117.00 \pm 2.34)$ Ma 之间

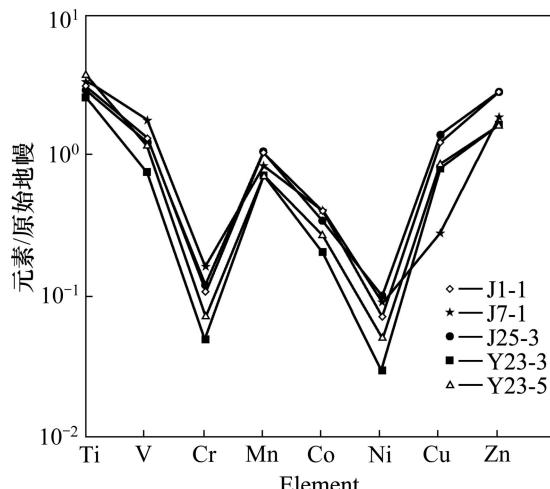


图4 原瞳矿区煌斑岩过渡元素蛛网图(原始地幔值引自文献[13])

Fig. 4 Spidergram of transitional elements for lamprophyre in the Yuantuan area (primitive mantle values from Ref. [13])

表4 原瞳矿区煌斑岩 K-Ar 年龄结果

Table 4 K-Ar ages of lamprophyres in Yuantuan area

岩性	$\text{K}/\%$	$^{40}\text{K}/(10^{-9}\text{mol}\cdot\text{g}^{-1})$	$^{40}\text{Ar}^{\text{放}}/(10^{-9}\text{mol}\cdot\text{g}^{-1})$	$^{40}\text{Ar}^{\text{放}}/\text{总}$	年龄/Ma
闪斜煌斑岩	1.88	56.112	0.394 1	0.915 4	117.00 ± 2.34
云煌岩	3.53	105.358	0.657 82	0.904 8	104.38 ± 2.09

分析单位: 桂林矿产地质研究院测试中心。

$(102.29 \sim 119.34)$ Ma, 与胶东地区前人煌斑岩脉年龄研究结果($(89.30 \pm 1.77) \sim (169.5 \pm 3.7)$ Ma)相近^[5], 说明两者均系区内燕山中、晚期大规模岩浆活动的一部分。

4 讨论

从区域上看, 原瞳金矿区煌斑岩脉属于胶东金矿集中普遍出现的燕山期煌斑岩脉群的一部分, 该类煌斑岩地球化学特征继承了源区特点、源于富集地幔, 显示与中生代富集地幔和板块俯冲作用有密切联系^[1, 5, 14]。

胶东矿集区同位素定年研究成果显示, 区内中生代岩浆活动进行至早白垩世(135~95 Ma), 富集地幔来源的高钾基性-中性脉岩大量发育, 持续到晚白垩世(95~65 Ma)^[15~16]。原瞳金矿区煌斑岩年龄为 $(117.00 \pm 2.34) \sim (104.38 \pm 2.09)$ Ma, 显示煌斑岩类与区内富集地幔来源的高钾基性-中性脉岩同系中生代岩浆活动的一

部分, 处于相同的形成环境。

胶东地区既处于与扬子板块向华北板块大陆深俯冲边缘, 又位于古太平洋板块向欧亚大陆俯冲的前缘, 先后发生的鲁洋板块的消减俯冲、扬子与华北克拉通的碰撞、古太平洋板块向欧亚大陆板块俯冲, 导致区内煌斑岩来源认识的分歧。

有研究者提出哀牢山断裂带新生代(40~28 Ma)煌斑岩与印度—欧亚洲大陆碰撞(70~50 Ma)有关, 与中、晚三叠世古特提斯洋洋壳消减俯冲联系密切^[10, 17]。据此可推测高钾脉岩活动滞后大陆碰撞约 42~10 Ma, 洋壳消减俯冲导致富集流体交代地幔影响可持续 200 Ma, 因此, 不排除苏鲁洋板块消减俯冲对地幔的影响可能延续到白垩纪。

华北板块东部晚侏罗世开始形成的北北东向盆岭格局, 呈环太平洋构造域特征^[18], 而辽东半岛富集地幔来源的煌斑岩脉大量发育, 多为北北东向展布, 岩石中 SHRIMP 钨石 U-Pb 年龄为(155±4) Ma, 显示最早在晚侏罗世, 华北板块东缘即有煌斑岩类发育, 并与太平洋板块俯冲有密切的成因关系^[19]。

综上所述, 可推测消减俯冲的苏鲁洋板块及太平洋洋洋壳熔融产生的富集流体均参与了富集地幔的形成, 胶东地区煌斑岩脉群作为中生代大规模岩浆活动的一部分, 应为中生代构造转折和岩石圈减薄这一陆内动力学过程的直接响应。受上述事件的驱动, 侏罗纪晚期(160~135 Ma), 区内首先表现为强烈的花岗质岩浆活动, 生成玲珑、昆嵛山和深家河等壳源二长花岗岩, 反映华北东部当时厚大陆壳特别是下地壳物质发生剧烈的重组和重熔^[20], 进入白垩纪(130~65 Ma), 岩石圈持续减薄及地幔上隆导致深源的花岗闪长质岩浆及部分幔源岩浆上侵^[20~21], 同时地壳浅表层次构造响应深部构造活动, 北北东和北东向断陷盆地和脆性断裂发育, 为煌斑岩等高钾中基性岩脉群的生成提供了上侵通道和就位空间^[22]。因此, 包括煌斑岩, 胶东矿集区内中生代中基性脉岩群是中生代岩浆活动的一部分, 与区域内中生代构造体制转折及岩石圈减薄作用有关。

5 结论

1) K-Ar 法测年结果表明, 本次获得的年龄范围为(104.38±2.09)~(117.00±2.34) Ma, 为晚中生代岩浆作用的产物。

2) 地球化学特征表明, 煌斑岩以钙碱性煌斑岩为

主, SiO_2 含量变化大, TiO_2 含量偏低, 富集轻稀土元素及大离子亲石元素, 相对亏损高场强元素, 显示其来源于富集地幔, 与中生代富集地幔和板块俯冲作用有密切联系。

3) 本区煌斑岩作为中生代大规模岩浆活动的一部分, 其形成与中生代构造体制转折和岩石圈减薄事件有关。

REFERENCES

- [1] 谭俊, 魏俊浩, 杨春福, 冯波, 谭文娟, 郭大招. 胶东郭城地区脉岩类岩石地球化学特征及成岩构造背景[J]. 地质学报, 2006, 80(8): 1177~1188.
TAN Jun, WEI Jun-hao, YANG Chun-fu, FENG Bo, TAN Wen-juan, GUO Da-zhao. Geochemistry and tectonic setting of dikes in the Guocheng Area, Jiaodong peninsula[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(8): 1177~1188.
- [2] 刘畅, 赵泽辉, 郭召杰. 甘肃北山地区煌斑岩的年代学和地球化学及其壳幔作用过程讨论[J]. 岩石学报, 2006, 22(5): 1294~1306.
LIU Chang, ZHAO Ze-hui, GUO Zhao-jie. Chronology and geochemistry of lamprophyre dykes from Beishan area, Gansu Province and implications for the crust-mantle interaction[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(5): 1294~1306.
- [3] 孙景贵, 胡受奚, 凌洪飞. 胶东金矿区高钾-钾质脉岩地球化学与俯冲-壳幔作用研究[J]. 岩石学报, 2000, 16(3): 401~412.
SUN Jing-gui, HU Shou-xi, LING Hong-fei. Study on the geochemistry and subduction-crust mantle interaction of the high potassium-potassium dike rocks in gold deposits concentration zone of east Shandong, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2000, 16(3): 401~412.
- [4] 刘辅臣, 卢作祥, 范永香, 孔庆存, 宫润潭. 玲珑金矿中基性脉岩与矿化关系探讨[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 1984, 20(4): 37~45.
LIU Fu-chen, LU Zuo-xiang, FAN Yong-xiang, KONG Qing-cun, GONG Run-tan. Study on the relationship between intermediate-basic dykes of Linglong gold deposits and mineralization[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 1984, 20(4): 37~45.
- [5] 刘燊, 胡瑞忠, 赵军红, 冯彩霞, 钟宏, 曹建劲, 史丹妮. 胶北晚中生代煌斑岩的岩石地球化学特征及其成因研究[J]. 岩石学报, 2005, 21(3): 947~958.
LIU Shen, HU Rui-zhong, ZHAO Jun-hong, FENG Cai-xia, ZHONG Hong, CAO Jian-jin, SHI Dan-ni. Geochemical characteristics and petrogenetic investigation of the Late Mesozoic lamprophyres of Jiaobei, Shandong Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21(3): 947~958.
- [6] 邓军, 杨立强, 葛良胜, 王庆飞, 张静, 高帮飞, 周应华,

- 江少卿. 胶东矿集区形成的构造体制研究进展[J]. 自然科学进展, 2006, 16(5): 513–518.
- DENG Jun, YANG Li-qiang, GE Liang-sheng, WANG Qing-fei, ZHANG Jing, GAO Bang-fei, ZHOU Ying-hua, JIANG Shao-qing. Study on the progress of tectonic regime in Jiaodong Gold Ore Concentration Area, Shandong Province[J]. Progress in Natural Science, 2006, 16(5): 513–518.
- [7] 范宏瑞, 胡芳芳, 杨进辉, 沈昆, 翟国明. 胶东中生代构造体制转折过程中流体演化和金的大规模成矿[J]. 岩石学报, 2005, 21(5): 1317–1328.
- FAN Hong-rui, HU Fang-fang, YANG Jin-hui, SHEN Kun, ZHAI Guo-ming. Fluid evolution and large-scale gold metallogeny during Mesozoic tectonic transition in the eastern Shandong Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21(5): 1317–1328.
- [8] 陈衍景, PIRAJNO F, 赖勇, 李超. 胶东矿集区大规模成矿时间和构造环境[J]. 岩石学报, 2004, 20(4): 907–922.
- CHEN Yan-jing, PIRAJNO F, LAI Yong, LI Chao. Metallogenetic time and tectonic setting of the Jiaodong Gold Province, Eastern China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20(4): 907–922.
- [9] ROCK N M S. The nature and origin of lamprophyres: an overview[J]. Geological Society Special Publications, 1987, 30: 191–226.
- [10] 王治华, 郭晓东, 葛良胜, 陈祥, 徐涛, 范俊杰. 云南大坪金矿区煌斑岩的地球化学特征及成因探讨[J]. 岩石矿物学杂志, 2010, 29(4): 355–366.
- WANG Zhi-hua, GUO Xiao-dong, GE Liang-sheng, CHEN Xiang, XU Tao, FAN Jun-jie. Geochemical characteristics and genesis of lamprophyre in the Daping Gold Ore District, Yunnan Province[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2010, 29(4): 355–366.
- [11] ROCK N M S, WRIGHT A E, BOWES D R. Lamprophyres[M]. New York: Van Nonstrand Reinhold, 1991: 1–285.
- [12] BOYNTON W V. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies[C]//HENDERSON P. Rare Earth Element Geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 1984: 63–114.
- [13] TAYLOR S R, MLENNAN S M. The continental crust: Its composition and evolution[M]. Oxford: Blackwells Scientific Press, 1985: 1–312.
- [14] MEEN J K, EGGLER D H, AYEAR J C. Experimental evidence for very low solubility of rare-earth elements in CO₂-rich fluids at mantle condition[J]. Nature, 1989, 340: 301–303.
- [15] 杨立强, 邓军, 葛良胜, 王庆飞, 张静, 高帮飞, 江少卿, 徐浩. 胶东金矿成矿时代和矿床成因研究述评[J]. 自然科学进展, 2006, 16(7): 797–802.
- YANG Li-qiang, DENG Jun, GE Liang-sheng, WANG Qing-fei, ZHANG Jing, GAO Bang-fei, JIANG Shao-qing, XU Hao. Reviews of the metallogenetic epoch and genesis studies in the Jiaodong gold deposits[J]. Progress in Natural Science, 2006,
- 16(7): 797–802.
- [16] 李俊建, 罗镇宽, 刘晓阳, 徐卫东, 骆辉. 胶东中生代花岗岩及大型–超大型金矿床形成的地球动力学环境[J]. 矿床地质, 2005, 24(4): 361–372.
- LI Jun-jian, LUO Zhen-kuan, LIU Xiao-yang, XU Wei-dong, LUO Hui. Geodynamic setting for formation of large-superlarge gold deposits and Mesozoic granites in Jiaodong area[J]. Mineral Deposits, 2005, 24(4): 361–372.
- [17] 管涛, 黄智龙, 许成, 张振亮, 严再飞, 陈冕. 云南白马寨镍矿区煌斑岩⁴⁰Ar-³⁹Ar 定年和地球化学特征[J]. 岩石学报, 2006, 22(4): 873–883.
- GUAN Tao, HUANG Zhi-long, XU Cheng, ZHANG Zhen-liang, YAN Zai-fei, CHEN Mi. ⁴⁰Ar-³⁹Ar dating and geochemical characteristics of lamprophyres in the Baimazhai Nickel Deposit, Yunnan Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(4): 873–883.
- [18] 翟明国, 朱日祥, 刘建明, 孟庆任, 侯泉林, 胡圣标, 李忠, 张宏福, 刘伟. 华北东部中生代构造体制转折的关键时限[J]. 中国科学:D辑, 2003, 33(10): 913–920.
- ZHAI Ming-guo, ZHU Ri-xiang, LIU Jian-ming, MENG Qing-ren, HOU Quan-lin, HU Sheng-biao, LI Zhong, ZHANG Hong-fu, LIU Wei. Key timeline of Mesozoic tectonic regime transition in eastern north China[J]. Science in China: Series D, 2003, 33(10): 913–920.
- [19] 姜耀辉, 蒋少涌, 赵葵东, 倪培, 凌洪飞, 刘敦一. 辽东半岛煌斑岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其对中国东部岩石圈减薄开始时间的制约[J]. 科学通报, 2005, 50(19): 2161–2168.
- JIANG Yao-hui, JIANG Shao-yong, ZHAO Kui-dong, NI Pei, LING Hong-fei, LIU Dun-yi. SHRIMP U-Pb zircon dating for lamprophyre of Liaotung Peninsula and the time-restricted of the lithosphere becoming thin in eastern north China[J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(19): 2161–2168.
- [20] 罗镇宽, 苗来成. 胶东招莱地区花岗岩和金矿床[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002: 84–117.
- LUO Zhen-kuan, MIAO Lai-cheng. Granite and gold deposits at Zhaolai area of Jiaodong, eastern China[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2002: 84–117.
- [21] 张华峰, 翟明国, 何中甫, 彭澎, 许保良. 胶东昆仑山杂岩中高锶花岗岩地球化学成因及其意义[J]. 岩石学报, 2004, 20(3): 369–380.
- ZHANG Hua-feng, ZHAI Ming-guo, HE Zhong-fu, PENG Peng, XU Bao-liang. Petrogenesis and implications of the sodium-rich granites from the Kunyushan complex, eastern Shandong Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20(3): 369–380.
- [22] GUO F, FAN W M, WANG Y J, ZHANG M. Origin of early Cretaceous calc-alkaline lamprophyres from the Sulu orogen in eastern China: Implications for enrichment processes beneath continental collisional belt[J]. Lithos, 2004, 78(3): 291–305.

(编辑 陈卫萍)