

中国东部地幔岩包体及其中硫化物相金含量的比较研究

岳可芬^{①②*}, 赫英^①

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

② 西北大学合成与天然功能分子化学教育部重点实验室, 西北大学化学系, 西安 710069

* E-mail: ykflyy@nwu.edu.cn; ykflyy@sina.com.cn

收稿日期: 2007-06-26; 接受日期: 2007-12-03

国家自然科学基金项目(批准号: 40372052)和陕西省自然科学基金项目(批准号: 2004B27)资助

摘要 分析了中国东部 8 个地区 59 件新生代地幔岩包体的金含量, 并分析了相应地区 85 件地幔岩硫化物相的金含量, 结合文献共报道了 130 件硫化物相的金含量. 将两种金含量进行比较, 发现地幔岩包体全岩金含量通常为 $10^{-9} \sim 10^{-8}$, 而一些地幔岩包体硫化物中 Au 含量可达 $10^{-4} \sim 10^{-2}$, 是全岩的数十万倍, 证实地幔岩中 Au 主要赋存于地幔硫化物相中. 将两种金含量分布进行比较, 发现空间上地幔岩包体全岩和地幔岩包体硫化物相中金含量分布都是不均一的, 但二者金含量分布变化规律相一致, 即地幔岩包体中 Au 含量高的地区, 地幔岩包体硫化物相中金含量也高. 除海南岛外, 位于华北地台南北缘的山东临朐、昌乐和河北汉诺坝地幔岩包体全岩和包体硫化物相中金含量分布均较高, 与冀北西部和山东胶东半岛的金矿集中区有对应关系, 反映地幔的高金含量可能为相应地区金矿的形成提供了物质基础. 古老的华北地台原始地幔曾有富金的物质基础, 经后期地幔事件后仍富金, 说明后期地幔事件(如减薄、去根、底侵、拆沉、置换、交代等)及有关的富 CO_2 含金地幔流体对金活化、富集和转移直到成矿作用是在先期岩石圈地幔的物质基础上发生的.

关键词

地幔岩包体
硫化物相
金含量
金矿集中区

被玄武岩带到地表的地幔岩包体是获取地球深部信息的一个重要窗口. 新生代以来, 中国东部多期火山活动将大量地幔岩包体(橄榄岩、辉石岩等)带入地面, 这为研究中国东部地幔演化提供了条件. 国内外学术界对中国东部地幔岩包体在岩石学、地球化学和深部动力学等方面进行了大量的研究, 取得了重要进展^[1~9]. 但很少有研究地幔岩包体金含量和地幔岩包体与金的深部成矿关系的报道. 而金大规模富集成矿与深部地质过程的关系是当今矿床学研究最具探索性的科学问题之一^[10~14].

根据 Au 的地球化学性质, Au 是亲硫元素, 主要存

在于硫化物相中. 地幔岩捕虏体中硫化物相普遍存在. 地幔岩捕虏体中的硫化物可以提供地幔部分熔融、地幔交代作用以及与成矿有关的重要信息^[15~17]. 电子探针原位分析硫化物中 Au 含量在揭示岩石圈深部过程与金成矿关系的细节上, 有比全岩分析更大的优越性. 有关中国东部地幔岩包体硫化物相中金含量与金矿关系的报道也很少^[18]. 因此, 运用比较矿床学的研究方法^[19], 分析、对比中国东部地幔岩包体全岩及包体中硫化物相的金含量, 将空间上它们的金含量分布规律与中国东部金矿分布规律进行比较, 可能会帮助我们更好地认识岩石圈深部过程与金成矿关系.

1 地幔岩包体中金含量的分析方法和分析结果

选择华北地块的河北汉诺坝、山东临朐、山东昌乐及以南的安徽明光、福建牛头山、广东雷州半岛、海南定安、海南蓬莱的新生代地幔岩包体共 59 件. 除山东昌乐包体为绿色辉石岩(橄榄二辉岩和斜方辉石岩), 山东临朐有两个样为橄榄二辉岩, 海南蓬莱有一个样(HP-03)为斜方辉石岩外, 其他包体多为尖晶石二辉橄榄岩, 个别为尖晶石方辉橄榄岩.

样品经粉碎、筛分和研磨后送国家地质实验测试中心进行金含量的分析. 烘干后的样品 10 g 用王水溶解, 泡沫塑料富集, 1%硫脲解脱, 用电热原子吸收法测金, 所用仪器为 PE3030. 同时 2 件国家一级标准物质 GBW007242 和 GBW07244 随同样品一起进行分析. 分析结果列于表 1.

2 地幔岩包体中硫化物及其金含量

上述各地地幔岩包体中的硫化物相按其成因均可分为两种类型 [17,20]: 1) 硅酸盐矿物颗粒内、未与裂隙相连硫化物包裹体, 包括孤立的大硫化物和成群的小硫化物. 其中成群的小硫化物粒径为 1~8 μm, 孤立分布的硫化物包裹体粒径为 10~60 μm. 这类硫化物形成较早, 硫化物熔体从硅酸盐熔体中熔离出来, 代表与地幔矿物结晶时平衡的初始硫化物熔体, 或地幔熔融的残余, 称为早期硫化物包裹体. 2) 矿物颗粒交界边上的硫化物和颗粒内裂隙上的硫化物, 硫化物粒径大小不等, 为 1~30 μm. 这类硫化物代表地幔矿物结晶后地幔岩局部熔融、与地幔流体交代有关, 称为后期硫化物.

用电子探针对上述各地地幔岩包体中的 85 件硫化物相的化学成分进行测定, 并结合文献报道的数据 [18,21], 共有 130 件硫化物相数据列于表 2.

表 1 中国东部新生代地幔岩包体金含量(×10⁻⁹)

样品位置	样品号	岩石类型 ^{a)}	Au	样品位置	样品号	岩石类型	Au
河北汉诺坝	WD-2-1	sp-lh	8.2	福建牛头山	FN-03	sp-lh	2.0
河北汉诺坝	WD-3-1	sp-lh	3.2	福建牛头山	FN-04	sp-lh	7.2
河北汉诺坝	WD-28-2	har	11.6	福建牛头山	FN-5	sp-lh	6.6
河北汉诺坝	WD-31-2	sp-lh	14.4	福建牛头山	FN-6	sp-lh	1.2
河北汉诺坝	WD-5	har	7.5	福建牛头山	FN-9	sp-lh	4.0
河北汉诺坝	WD-12	sp-lh	1.0	广东雷州半岛田洋	GT-1	sp-lh	1.1
河北汉诺坝	WD-24	sp-lh	2.2	广东雷州半岛英峰岭	GY-6-1	sp-lh	1.2
河北汉诺坝	WD-29	sp-lh	5.0	广东雷州半岛英峰岭	GY-0	sp-lh	5.4
山东临朐	SL1	sp-lh	10.0	广东雷州半岛英峰岭	GY-2	har	7.4
山东临朐	SL3	sp-lh	12.0	广东雷州半岛英峰岭	GY-3	har	6.2
山东临朐	SL4	har	4.8	广东雷州半岛英峰岭	GY-6	sp-lh	3.2
山东临朐	SL5	sp-lh	15.0	广东雷州半岛英峰岭	GY-7	sp-lh	4.8
山东临朐	S817-1	sp-lh	7.1	广东雷州半岛英峰岭	GY-8	har	3.4
山东临朐	SL6	sp-lh	5.0	海南定安	HF-10-1	sp-lh	7.1
山东临朐	SL-10-2	ol-web	21.0	海南定安	HF-11-1	sp-lh	15.0
山东临朐	SL-11-2	ol-web	28.0	海南定安	HF-01	har	16.0
山东昌乐	CF-01	orth	7.6	海南定安	HF-02	sp-lh	5.0
山东昌乐	CF-02	ol-web	9.2	海南定安	HF-4	har	15.0
山东昌乐	CF-4	ol-web	7.8	海南定安	HF-5	sp-lh	6.6
山东昌乐	CF-5	ol-web	12.0	海南定安	HF-7	har	2.8
山东昌乐	CF-6	ol-web	5.4	海南定安	HF-23	har	36.0
山东昌乐	CF-7	ol-web	7.8	海南蓬莱	HP-1-1	sp-lh	7.9
安徽明光	AM-9-1	sp-lh	1.3	海南蓬莱	HP-01	har	16.0
安徽明光	A2	sp-lh	6.0	海南蓬莱	HP-02	har	18.0
安徽明光	A3	sp-lh	4.0	海南蓬莱	HP-03	orth	12.0
安徽明光	A5	sp-lh	5.0	海南蓬莱	HP-04	har	7.8
安徽明光	A6	sp-lh	5.2	海南蓬莱	HP-05	sp-lh	1.4
安徽明光	A7	sp-lh	5.6	海南蓬莱	HP-07	sp-lh	4.0
安徽明光	A8	har	3.4	标准物质	检测值(推荐值)	岩性	RE/%
福建牛头山	FN-6-1	sp-lh	6.8	GBW07244	6(5.3)	超基性岩	13.2
福建牛头山	FN-01	sp-lh	1.2	GBW007242	0.6(0.5)	基性岩	20.0

a) sp-lh 示尖晶石二辉橄榄岩; har 示方辉橄榄岩; ol-web 示橄榄二辉岩; orth 示斜方辉石岩

表 2 中国东部地幔岩捕虏体中硫化物相的电子探针分析结果^{a)}

地点	样号	S /mol%	Fe /mol%	Ni /mol%	Cu /mol%	Au /mol%	总量 /wt%	Au/wt%	矿物	硫化物 类型	来源
河北 汉诺坝	WD-29-2	47.47	18.37	31.85	1.30	0.20	96.46	0.83	Pn	早期	本文
	WD-29-1	53.91	42.23	3.37	0.04	0.06	97.62	0.25	Po	早期	
	WD-29-5	47.86	24.41	25.03	1.92	0.23	99.18	0.99	Pn	后期	
	D15(1)	47.57	41.17	9.70	0.44	0.02	99.64	0.09	Pn	后期	[21]
	D15(2)	42.9	43.16	2.04	0.11	0.09	99.48	0.39	Po	早期	
	D15(3)	45.35	40.68	5.67	0.15	0	99.4	0	Po	早期	
	D5(2)	46.55	30.08	19.17	0.60	0.03	99.53	0.13	Pn	早期	
	Q117-1	48.32	18.18	27.14	2.81	0	99.37	0	Pn	早期	
	Q117-3	45.99	23.40	29.20	0	0.06	99.79	0.26	Pn	后期	
	J131-3	46.63	25.99	26.00	0.20	0.02	99.70	0.09	Pn	早期	
	J131-4-1	47.08	26.40	25.08	0.19	0	99.66	0	Pn	后期	
	J131-4-2	47.47	27.16	17.23	6.31	0.04	99.29	0.18	Pn	早期	
	J131-4-3	47.22	26.73	24.18	0.88	0	99.92	0	Pn	早期	
	J131-5-1	48.60	30.63	18.18	1.47	0.02	99.70	0.09	Pn	早期	
	J131-5-2	50.09	29.09	0.82	19.23	0.04	99.90	0.18	Cp	后期	
	J139-1	49.83	25.34	1.46	22.35	0.04	99.61	0.18	Cp	后期	
	J139-2	52.87	45.02	1.19	0	0	99.61	0	Po	后期	
山东 临朐	SL1-3-1	52.06	47.10	0.32	0.14	0	100.11	0	Po	后期	本文
	SL1-3-2	52.78	46.21	0.60	0.01	0.03	100.04	0.15	Po	后期	
	SL1-2-1	51.05	39.88	8.13	0.03	0.03	100.31	0.12	Po	后期	
	SL1-2-2	51.05	43.93	4.05	0	0.01	99.02	0.03	Po	后期	
	SL1-1	46.79	25.17	26.79	0.18	0	100.06	0.02	Pn	早期	
	SL6	58.89	18.7	21.98	0.13	0	100.89	0	MSS	后期	
	SL4-d	47.05	15.81	36.35	0.15	0	99.30	0	Pn	早期	
	SL4-c	49.27	19.12	30.53	0.32	0	99.07	0	Pn	早期	
	SL4-b	47.93	23.23	24.21	4.34	0.12	100.68	0.50	Pn	早期	
	SL-d-1-1	42.61	10.79	1.64	44.80	0	98.85	0	Bn	早期	
	SL-d-1-2	42.10	11.21	1.34	45.17	0.15	98.10	0.62	Bn	早期	
	SL-d-2	38.39	9.41	0.39	51.56	0	99.64	0	Bn	早期	
	SL-p-1	46.73	17.76	33.90	0.32	0.10	91.02	0.40	Pn	早期	
	SL-p-2	46.41	17.40	34.58	0.18	0	96.54	0	Pn	早期	
	SL-p-3	46.71	25.67	26.54	0.33	0.16	100.87	0.71	Pn	后期	
山东 昌乐	SL-p-4	46.62	3.92	47.26	0.46	0	100.49	0	Mil	后期	本文
	SL-Z-1	40.32	11.14	35.94	8.67	0.08	99.91	0.33	MSS	粒间	
	CFI-20-b	47.13	25.80	25.20	0.07	0.08	100.87	0	Pn	早期	
	CFI-20-a1	48.31	35.13	15.66	0.05	0	98.43	0.14	Pn	早期	
	CFI-20-a2	49.14	32.53	17.36	0.05	0	99.77	0.17	Pn	早期	
	CFI-5-c-1	52.51	37.97	8.79	0.25	0	98.94	0.13	MSS	早期	
	CFI-5-c-2	51.29	24.64	1.91	21.74	0.05	99.03	0.09	Cp	早期	
	CFI-5-d	50.68	26.06	1.07	21.80	0	99.03	0	Cp	后期	
	CFI-5-d1	52.53	38.62	7.98	0.15	0.07	99.38	0.46	MSS	后期	
	CFI-5-a	51.01	40.76	7.36	0.24	0	98.12	0.70	Po	早期	
	CFI-5-b-1	52.13	46.83	0.01	0.02	0.03	100.60	0	Po	早期	
	CFI-5-b-2	52.77	46.03	0.02	0.03	0.04	98.90	0	Po	早期	
	CF-02-i-1	52.59	36.67	9.89	0.11	0.03	99.51	0.37	MSS	后期	
	CF-02-i-2	51.95	36.83	10.76	0.23	0.02	99.40	0	MSS	后期	

表 2(续)

地点	样号	S /mol%	Fe /mol%	Ni /mol%	Cu /mol%	Au /mol%	总量 /wt%	Au/wt%	矿物	硫化物 类型	来源
山东 昌乐	CF-02-a	54.33	25.19	18.31	1.90	0	100.52	0	Po	后期	本文
	CF-02-b	48.32	30.53	15.70	4.90	0	100.41	0.02	Po	早期	
	CF-02-e	51.00	33.42	14.30	0.07	0.10	99.90	0.23	Po	后期	
	CF-02-d	49.41	32.63	17.46	0.09	0.16	98.56	0.01	Pn	早期	
	CF-02-g	49.55	28.28	19.38	2.48	0	100.11	0	Po	粒间	
	CF-02-h	49.54	24.05	11.93	14.12	0	99.12	0.31	Po	粒间	
安徽 明光	AM-20-a-1	66.77	33.02	0.02	0.01	0.01	100.49	0.03	Py	粒间	本文
	AM-20-a-2	65.52	34.32	0.01	0	0	100.63	0	Py	粒间	
	AM-1-1	41.06	5.06	35.67	12.75	0	99.68	0	MSS	早期	
	AM-1-2	41.53	3.66	42.48	10.92	0	99.60	0	MSS	早期	
	AM-4	52.12	41.35	1.84	4.05	0	100.88	0	Po	早期	
	AM-3	49.46	41.85	1.74	6.36	0	99.99	0	Po	早期	
	AM-2	46.38	29.16	1.77	22.10	0	100.93	0	Po	早期	
福建 牛头山	FN-05-b-1	47.75	25.59	0.43	25.96	0	100.23	0	Cp	早期	本文
	FN-05-b-2	48.06	24.65	2.43	24.42	0	100.57	0	Cp	早期	
	FN-05-a21	46.99	25.35	24.80	2.07	0.03	100.18	0.15	Pn	早期	
	FN-05-a22	51.29	37.10	10.93	0.07	0.02	100.97	0.07	MSS	早期	
	FN-05-c-1	48.38	18.96	31.68	0.15	0	100.32	0	Pn	早期	
	FN-05-c-2	47.24	18.35	32.74	0.09	0.03	100.57	0.12	Pn	早期	
	FN-02-c-1	48.38	13.18	36.74	0.14	0.03	101.32	0.13	Pn	早期	
	FN-02-c-2	49.17	7.68	42.01	0.14	0.03	99.28	0	Mil	早期	
	FN-02-d-1	48.05	7.47	41.30	0.21	0	100.94	0.18	Mil	粒间	
	FN-02-d-2	47.42	13.73	16.63	21.38	0.04	101.55	0.14	Tal	粒间	
	FN-02-b-1	48.02	14.24	37.07	0.08	0.03	100.68	0.06	Pn	粒间	
	FN-02-b-2	46.45	18.58	33.57	0.10	0.01	99.78	0.25	Pn	粒间	
	FN-02-f-1	51.86	36.09	11.43	0.05	0.06	98.74	0.49	MSS	后期	
	FN-02-f-2	55.34	29.45	14.40	0.04	0.11	99.75	0.12	MSS	后期	
	FN-02-f-3	54.17	32.73	12.19	0.03	0.03	99.38	0.13	MSS	后期	
广东 英峰岭	GY-0-b-1	48.25	31.18	16.36	3.65	0	99.14	0	Pn	早期	本文
	GY-0-b-2	50.59	26.00	17.59	5.20	0	99.67	0	MSS	早期	
	GY-0-a	48.00	30.77	14.54	6.42	0	98.99	0	MSS	早期	
广东 青桐洋	QTY-2(2)1	48.73	24.97	24.63	1.67	0	100.00	0	Pn	早期	[18]
	QTY-2(2)2	50.81	27.49	20.76	0.46	0.02	99.70	0.09	Po	早期	
	QTY-3(2)1	47.35	25.62	14.80	12.15	0	99.92	0	Cb	早期	
	QTY-3(4)1	48.04	28.62	10.11	12.01	0	98.98	0	Cb	早期	
	QTY-3(4)2	43.92	31.85	12.17	12.05	0	99.99	0	Pn	早期	
	QTY-3(4)3	47.29	26.76	2.88	22.72	0.18	99.81	0.79	Cp	早期	
	QTY-7(1)1	47.75	39.23	11.74	1.22	0.01	99.98	0.05	Pn	后期	
	QTY-7(2)1	52.06	35.20	12.06	0.20	0.01	99.53	0.05	Po	早期	
	QTY-7(4)1	41.27	43.98	11.90	2.38	0.06	100.01	0.26	Pn	早期	
	QTY-7(4)2	51.78	35.02	11.80	0.99	0.03	99.90	0.13	Po	早期	
	QTY-7(4)3	49.65	37.89	10.89	1.15	0	99.96	0	Po	早期	

表 2(续)

地点	样号	S /mol%	Fe /mol%	Ni /mol%	Cu /mol%	Au /mol%	总量 /wt%	Au/wt%	矿物	硫化物 类型	来源
海南 安定	HF-7-3	49.11	25.78	15.90	9.18	0	100.63	0	MSS	早期	本文
	HF-8-a	45.87	31.75	12.89	9.22	0	98.99	0	Pn	早期	
	HF-8-b1	49.33	27.69	22.15	0.34	0	99.88	0	Pn	早期	
	HF-8-b2	44.98	27.12	27.07	0.46	0.12	100.77	0.50	Pn	早期	
	HF-8-e'-1	54.31	33.43	11.61	0.12	0.08	99.25	0.35	MSS	粒间	
	HF-8-e'-2	52.05	38.48	8.89	0.24	0.11	99.54	0.48	MSS	粒间	
	HF-8-f-1	46.83	38.30	14.29	0.11	0.14	99.96	0.59	Pn	粒间	
	HF-8-f-2	48.99	37.31	13.24	0.16	0.08	99.47	0.34	Pn	粒间	
	HF-8-e-1	46.39	30.06	22.69	0.23	0.09	100.35	0.39	Pn	粒间	
	HF-8-e-2	51.20	42.44	5.50	0.21	0.10	100.80	0.47	Po	粒间	
	HF-8-e	48.21	27.76	23.36	0.05	0.08	99.91	0.33	Pn	粒间	
	HF-8-c	54.11	14.23	29.01	2.18	0	100.72	0	Viol	早期	
	HF-26-1	53.55	43.71	1.75	0.042	0.26	96.94	1.13	Po	早期	
	HF-26-2	53.57	37.91	7.73	0.06	0.12	97.05	0.53	Po	早期	
	SMG-8(2)1	61.25	34.30	0	0.75	1.87	99.50	8.12	Py	早期	
海南 蓬莱	SMG-8(2)2	60.71	30.70	0	1.48	0	93.95	0	Py	早期	[18]
	SMG-8(2)3	61.72	27.17	0	0	0	89.92	0	Py	早期	
	HP-7-a2-1	50.07	22.00	13.64	13.30	0.03	98.61	0.14	MSS	早期	
	HP-7-a2-2	47.86	19.50	17.40	14.59	0.01	101.80	0.04	MSS	早期	本文
	HP-7-a1	46.32	22.14	20.65	10.32	0.02	99.47	0.08	MSS	早期	
	HP-7-b	47.51	2.02	0.83	49.31	0.02	100.60	0.06	Bo	粒间	
	FJT-1(2)1	51.93	34.02	13.01	0.21	0.15	99.39	0.66	Po	早期	
	FJT-1(2)2	53.55	34.03	11.71	0	0.19	99.82	0.83	Po	早期	[18]
	FJT-2(1)1	47.28	24.68	24.31	1.83	0	98.91	0	Pn	早期	
	FJT-2(1)2	43.68	32.88	20.32	1.98	0.14	99.33	0.61	Pn	早期	
	FJT-2(1)3	52.16	32.91	14.11	0	0.11	99.37	0.48	Po	早期	
	FJT-2(3)1	49.89	26.30	0.02	23.57	0.01	99.82	0.05	Cp	早期	
	FJT-2(3)2	48.51	24.07	22.77	4.02	0	99.68	0	Pn	早期	
	FJT-2(5)1	37.73	54.69	6.98	0.60	0	100.00	0		早期	
	FJT-2(5)2	53.27	31.57	14.28	0.07	0.01	99.62	0.05	Po	早期	
	FJT-4(1)1	49.61	27.20	4.77	17.69	0	100.00	0	Cb	早期	
	FJT-4(1)2	51.26	37.92	10.36	0	0.11	99.87	0.48	Po	早期	
	FJT-4(2)1	48.62	31.57	18.67	0.78	0	99.88	0	Pn	后期	
	FJT-4(2)2	51.20	30.78	16.24	1.33	0.09	99.93	0.39	Pn	后期	
	FJT-5(1)1	50.35	30.85	18.70	0	0.08	100.00	0.35	Pn	早期	
	FJT-5(1)2	50.17	35.30	13.99	0	0.11	99.77	0.48	Po	早期	
	FJT-6(2)1	50.93	31.47	17.58	0	0	99.99	0	Pn	早期	
	FJT-6(2)2	49.61	30.16	19.95	0.10	0	100.20	0	Pn	早期	
	FJT-9(1)2	34.59	61.98	3.43	0	0	100.00	0		早期	
	FJT-10(1)1	52.70	32.23	14.38	0.10	0.04	99.60	0.18	Po	早期	
	FJT-10(2)1	49.95	28.24	7.86	13.63	0.05	99.78	0.22	Cb	早期	
	FJT-10(2)2	44.19	32.24	19.88	1.51	0.17	99.32	0.74	Pn	早期	

a) Pn 示镍黄铁矿; Po 示磁黄铁矿; Py 示黄铁矿; Cp 示黄铜矿; Cb 示方黄铜矿; Mil 示针镍矿; Bo 示斑铜矿; Viol 示紫硫镍矿; Tal 示硫铜铁矿; MSS 示单硫化物固溶体. wt%为质量分数, 下同

本文大多数硫化物由西安地质矿产研究所测试. 一部分硫化物由长安大学资源学院测试. 西安地质矿产研究所电子探针室仪器: JXA-733 电子探针仪; 加速电压 25 kV, 探针电流 20 nA, 束斑直径 2 μm ; 2AF 校正, 误差 $<1\%$ (总量). 长安大学资源学院电子探针室仪器: 测试采用 JXA-8100 型 WDS 谱仪; 加速电压 15 kV; 探针电流 10 nA; 束斑直径 1 μm ; 修正方法为 PRZ; 误差 $<1\%$ (总量).

3 讨论

3.1 地幔岩包体全岩金含量分布

黎彤 [22] 报道地幔金平均丰度为 5.0×10^{-9} , 因此, 本文比较不同地区地幔岩包体金含量大于 5.0×10^{-9} 的分布(图 1).

图 1 表明, 空间上地幔岩中金含量是不均一的. 高于地幔金平均丰度 5.0×10^{-9} 的样品, 除海南岛外, 主要集中在华北地台北缘的河北汉诺坝和南缘的山东临朐、昌乐, 与冀北西部和山东胶东半岛的金矿集中区有对应关系.

从分析结果(表 1)看出, 地幔岩包体金含量与包体类型无关. 山东临朐的橄榄岩和二辉岩包体金含量都高. 山东昌乐的绿色二辉岩和斜方辉石岩包体金含量也都高; 另外, 海南定安的二辉橄榄岩和方辉橄榄岩包体金含量都高, 海南蓬莱橄榄岩包体(HP-01 和 HP-02)和斜方辉石岩包体(HP-03)金含量也都高.

3.2 地幔岩包体硫化物相的金含量分布

通过电子探针测得硫化物中的 Au 含量, 电子探针针对元素的检出限为 $1/10000 \sim 5/10000$ 即 $0.01\% \sim 0.05\%$. 徐九华等 [18] 报道吉林长白山、河北汉诺坝、江苏六合和浙江新昌各地地幔岩硫化物相 Au 含量平均值在 $0.14\% \sim 0.10\%$ 之间. 因此, 本文比较不同地区地幔岩硫化物相 Au 含量大于 0.15% 的分布(图 2).

图 2 表明, 不同地区地幔岩硫化物相 Au 含量大于 0.15% 的分布是不均一的. 除海南岛外, 地幔岩硫化物相中 Au 含量大于 0.15% 的样品主要集中在华北地台北缘的河北汉诺坝和南缘的山东临朐、昌乐, 与冀北西部和山东胶东半岛的金矿集中区有对应关系.

分别比较河北汉诺坝、山东临朐和山东昌乐 3 个地区地幔早期硫化物和后期硫化物的金含量分布(表 3), 发现每个地区地幔高金含量的硫化物既有早期硫化物又有后期硫化物, 后期硫化物金含量的平均值稍高于早期硫化物. 说明地幔流体富金, 具有继承性.

3.3 地幔岩包体及其中硫化物相的金含量比较

(1) 与地幔岩包体全岩金含量相比, 一些硫化物中金含量可达 $10^{-4} \sim 10^{-2}$ (即金的重量百分比为 $0.01\% \sim 1.00\%$), 是全岩的数十万倍(全岩通常 $10^{-9} \sim 10^{-8}$). 说明, 地幔岩中金主要富集于地幔硫化物中而非共存的硅酸盐中. 自从 Mitchell 和 Keays [23] 对地幔

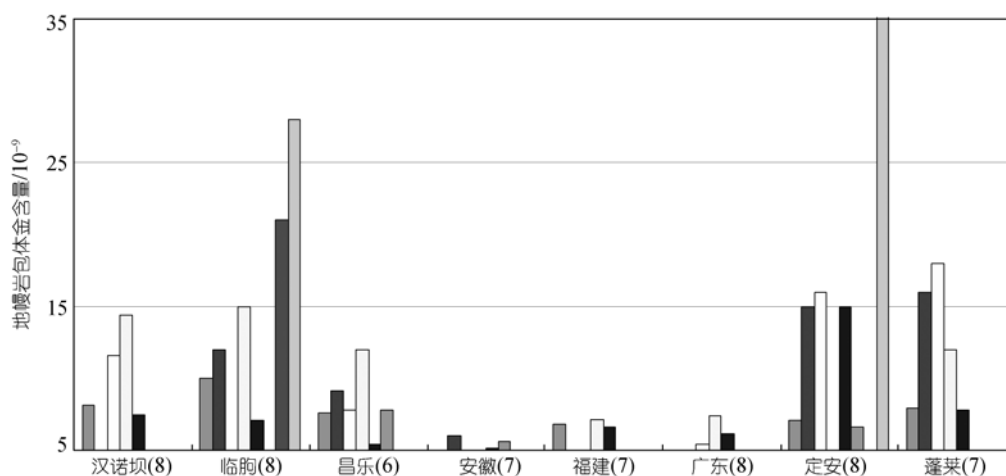


图 1 中国东部新生代地幔岩包体中金含量分布

地名后括号中的数字代表所测样品个数

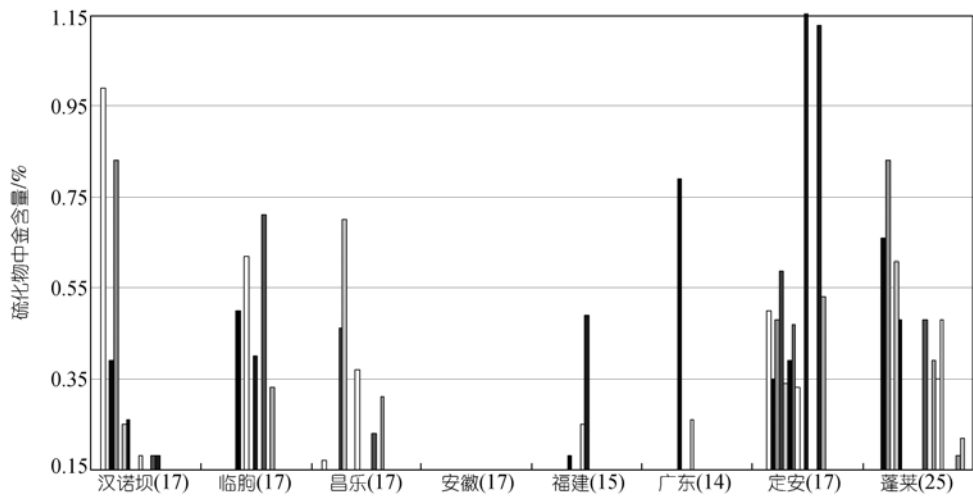


图2 中国东部新生代地幔岩包体中硫化物相的金含量分布
地名后括号中的数字代表所测样品的个数

表3 华北地台南北缘地幔早期硫化物和后期硫化物金含量比较(单位: wt%)

	河北汉诺坝		山东临朐		山东昌乐	
	范围	平均	范围	平均	范围	平均
早期	0.83~0	0.20	0.62~0	0.17	0.70~0	0.13
后期	0.99~0	0.24	0.71~0	0.17	0.46~0	0.17

岩硫化物中金含量和分布研究以来, 硫化物就被看作是地幔中金的主要寄主相. 本文研究证实了这一推测. Au 的这一特点可以用 Pearson 的软硬酸碱理论解释. 该理论认为, “硬酸”易与“硬碱”结合, “软酸”易与“软碱”结合. Au 是典型的软酸, O 为硬碱, S 为软碱. 所以, Au 具有强烈的亲硫性, 而与 O 亲合力很小. 因此, Au 在自然界中常与硫化物如黄铁矿、毒砂、方铅矿等密切共生.

(2) 空间上, 地幔岩包体全岩和地幔岩包体硫化物相中金含量分布都具有非均一性, 二者金含量分布变化规律又具有相一致性. 即地幔岩包体中金含量高的地区, 地幔岩包体硫化物相中金含量也高.

位于华北地台南北缘的山东临朐、昌乐和河北汉诺坝地幔岩包体及其中硫化物相金含量均较高, 与山东胶东半岛和冀北西部的金矿集中区有对应关系, 反映地幔的高金含量可能为相应地区金矿的形成提供了物质基础.

海南岛北部的包体和包体硫化物的金含量比华北地台两缘的还高, 但到目前为止, 在海南北部仅发

现了富文和南报 2 个中小型金矿床和 15 个金矿点^[24], 还未发现像华北地台两缘那样的金矿集中区. 这可以从两个方面理解: 一方面, 海南北部可能具有很大的金成矿潜力, 需要做进一步的勘探工作; 另一方面, 大的矿集区的形成是多种因素综合作用的结果, 除有充足的物质基础外, 还需有其他有利因素(如迁移条件和沉淀条件)的配合.

(3) 众所周知, 我国华北地块相对于邻区古老, 很多学者指出岩石圈地幔和地壳间在形成时代、性质和成分上有耦合性^[25~28]. 因而相对于邻区, 华北地块应曾有较古老的岩石圈(虽然已经过后期改造), 路凤香等^[29]已研究认为华北地台曾有过巨厚古老岩石圈根. 金是亲铁性元素, 地球历史早期形成的大陆岩石圈地幔和下地壳比较晚形成的大陆岩石圈地幔和下地壳是更富金的(尽管壳-幔分异作用导致地幔中金高于地壳). 因而推测, 相对于邻区, 古老的华北地台可能有一个原始的富金岩石圈地幔. 即有富金的物质基础.

中国东部岩石圈地幔的共同特点是大多数经历有不同程度的后期地幔事件(如减薄、去根、底侵、拆沉、置换、交代等), 尤其地幔流体交代现象普遍. 代表岩石圈地幔的地幔岩包体中金主要赋存于地幔硫化物中. 简单的分为早期硫化物和后期硫化物. 不同成因的硫化物有不同的Re-Os同位素组成^[9]. 因此, 全岩中金含量是各种成因金的总含量.

华北地台两缘的河北汉诺坝和山东临朐、昌乐地幔岩包体及其中硫化物相金含量分布都较高, 分布规律具有相一致性, 与华北地台两缘相应地壳金矿集中区有对应关系. 这 3 个地区不同的地幔岩包体类型金含量没有明显区别. 同时, 这 3 个地区地幔高金含量的硫化物既有早期硫化物又有后期硫化物, 后期硫化物金含量的平均值稍高于早期硫化物, 暗示地幔流体富金, 具有继承性. 加之, 相对于邻区, 古老的华北地台可能曾有一个原始的富金岩石圈地幔. 这些资料证明华北地台两缘的后期地幔事件引起的地幔部分熔融和地幔交代及有关的富 CO_2 含金地幔流体对金活化、富集和转移直到成矿作用 [30~33] 是在先期岩石圈地幔的物质基础上发生的.

4 结论

(1) 地幔岩包体全岩中金含量为 $10^{-9} \sim 10^{-8}$, 一些硫化物中金含量可达 $10^{-4} \sim 10^{-2}$. 显然, 地幔岩中 Au 主要赋存于地幔硫化物相中.

(2) 除海南岛外, 位于华北地台北南两缘的河北

汉诺坝和山东临朐、昌乐地幔岩包体及其中硫化物相金含量分布均较高, 与冀北西部和山东胶东半岛的金矿集中区有对应关系. 反映地幔的高金含量可能为相应地区金矿的形成提供了物质基础.

(3) 中国东部岩石圈地幔的共同特点是大多数经历有不同程度的后期地幔事件. 相对于邻区, 古老的华北地台可能曾有一个原始的富金岩石圈地幔. 经后期地幔事件后, 位于华北地台两缘的河北汉诺坝和山东临朐、昌乐在新生代时期被玄武岩带到地表的不同类型的地幔岩包体仍有高金含量, 金含量与地幔岩包体类型无关. 同时, 这 3 个地区地幔高金含量的硫化物既有早期硫化物又有后期硫化物, 只是后期硫化物金含量的平均值稍高于早期硫化物, 暗示地幔流体富金, 具有继承性, 金含量与硫化物类型相关性不很明显. 因此, 华北地台两缘后期地幔事件(如减薄、去根、底侵、拆沉、置换、交代等)及有关的富 CO_2 含金地幔流体对金活化、富集和转移直到成矿作用是在先期岩石圈地幔的物质基础上发生的.

致谢 感谢几位评审人提出的宝贵意见.

参考文献

- 1 鄂莫岚, 赵大升. 中国东部新生代玄武岩及深源包体. 北京: 科学出版社, 1987. 10—268
- 2 于津海, 徐夕生, 周新民. 华南沿海基性麻粒岩捕虏体的地球化学研究和下地壳组成. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2002, 32(5): 383—393
- 3 Xu Y G. Evidence for crustal components in the mantle and constraints on crustal recycling mechanisms: pyroxenite xenoliths from Hannuoba, North China. *Chem Geol*, 2002, 182: 301—322
- 4 Gao S, Rudrick R L, Carlson R W, et al. Re-Os evidence for replacement of ancient mantle lithosphere beneath North China craton. *Earth Planet Sci Lett*, 2002, 198(3-4): 307—322 [DOI]
- 5 Xu X S, O' Reilly S Y, Griffin W L, et al. Enrichment of upper mantle peridotite: petrological, trace element and isotopic evidence in xenoliths from SE China. *Chem Geol*, 2003, 198: 163—188 [DOI]
- 6 周新华. 中国东部中、新生代岩石圈转型与减薄研究若干问题. 地学前缘, 2006, 13 (2): 50—64
- 7 Ying J F, Zhang H F, Kita N, et al. Nature and evolution of Late Cretaceous lithospheric mantle beneath the eastern North China Craton: constraints from petrology and geochemistry of peridotitic xenoliths from Jünan, Shandong Province, China. *Earth Planet Sci Lett*, 2006, 244(3-4): 622—638
- 8 Wu F Y, Walker R J, Yang Y H, et al. The chemical-temporal evolution of lithospheric mantle underlying the North China Craton. *Geochim Cosmochim Acta*, 2006, 70(19): 5013—5034 [DOI]
- 9 郑建平, 余淳梅, 路凤香, 等. 华北东部大陆地幔橄榄岩组成、年龄与岩石圈减薄. 地学前缘, 2007, 14(2): 87—97
- 10 裴荣富, 翟裕生, 张本仁. 深部构造作用与成矿. 北京: 地质出版社, 1999. 105
- 11 Yang J H, Wu F Y, Wilde S A. A review of the geodynamic setting of large-scale Late Mesozoic gold mineralization in the North

- China Craton: an association with lithospheric thinning. *Ore Geol Rev*, 2003, 23(3-4): 125—152[DOI]
- 12 Li X F, Mao J W, Wang C Z, et al. The Daduhe gold field at the eastern margin of the Tibetan Plateau: He, Ar, S, O, and H isotopic data and their metallogenic implications. *Ore Geol Rev*, 2007, 30(3-4): 244—256[DOI]
- 13 Setiabudi B T, Campbell I H, Martin C E, et al. Platinum group element geochemistry of andesite intrusions of the Kelian region, East Kalimantan, Indonesia: implications of gold depletion in the intrusions associated with the Kelian gold deposit. *Econ Geol*, 2007, 102(1): 95—108[DOI]
- 14 Klein E L, Harris C, Renac C. Fluid inclusion and stable isotope (O, H, C, and S) constraints on the genesis of the Serrinha gold deposit, Gurupi Belt, northern Brazil. *Miner Depos*, 2006, 41(2): 160—178[DOI]
- 15 Szabo C, Bodnar R J. Chemistry and origin of mantle sulfides in spinel peridotite xenoliths from alkaline basaltic lavas, Nograd-Gomor volcanic field, northern Hungary and southern Slovakia. *Geochim Cosmochim Acta*, 1995, 59: 3917—3927[DOI]
- 16 Shaw C J S. Origin of sulfide blebs in variably metasomatized mantle xenoliths, Quaternary West Eifel volcanic field, Germany. *Can Mineral*, 1997, 35: 1453—1463
- 17 Alard O, Griffin W L, Lorand J P, et al. Non-chondritic distribution of the highly siderophile elements in mantle sulphides. *Nature*, 2000, 407(19): 891—894[DOI]
- 18 徐九华, 谢玉玲, 陈绪松, 等. 雷琼地幔岩中的硫化物及 Au-Pt 合金的发现. *地球科学*, 2002, 27(增刊): 280—286
- 19 涂光炽, 李朝阳. 浅谈比较矿床学. *地球化学*, 2006, 35(1): 1—5
- 20 岳可芬, 赫英, 刘文峰. 福建牛头山新近纪碱性玄武岩中地幔岩包体内硫化物相研究. *地质科学*, 2005, 40(1): 114—119
- 21 徐九华, 储雪蕾, 邹一民, 等. 汉诺坝地幔捕虏体中的硫化物包裹体. *科学通报*, 1998, 43(13): 1438—1442
- 22 黎彤. 金的地球化学性质. *地质与勘探*, 1976, (4): 13—18
- 23 Mitchell R H, Keays R R. Abundance and distribution of gold, palladium and iridium in some spinel and garnet lherzolites: implications for the nature and origin of precious metal-rich intergranular components in the upper mantle. *Geochim Cosmochim Acta*, 1981, 45(12): 2425—2433[DOI]
- 24 王春宏, 聂凤莲, 刘纲, 等. 海南省金矿成矿规律及找矿方向. *黄金地质*, 2002, 8(1): 11—16
- 25 朱炳泉. 从壳幔同位素体系看不同地体的化学不均一性. *科学通报*, 1990, 35(21): 1653—1655
- 26 Menzies M A, Chazot G. Fluid processes in diamond to spinel facies shallow mantle. *J Geodyn*, 1995, 20: 387—415[DOI]
- 27 Xu Y G, Menzies M A, Lin C Y. The nature of the lithospheric mantle beneath E-China: trace element and Sr-Nd isotope data of spinel peridotite xenoliths from Wangqing. In: Tu G C, Zhao Z H, eds. *Progress in Geochemistry. Contributions to the 30th IGCyrt21*. Guangzhou: Zhongshan University Press, 1996. 124—136
- 28 支霞臣, 彭子成, 陈道公, 等. 苏皖地区大陆岩石圈地幔的长时性. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2001, 31 (6) : 460—470
- 29 路凤香, 韩柱国, 郑建平, 等. 辽宁复县地区古生代岩石圈地幔特征. *地质科技情报*, 1991, 10 (增刊): 2—20
- 30 杜乐天. 地幔流体与软流层(体)地球化学. 北京: 科学出版社, 1996. 26—459
- 31 Lowestern J B. Carbon dioxide in magmas and implications for hydrothermal systems. *Miner Depos*, 2001, 36: 490—502[DOI]
- 32 Zhang R H, Hu S M. A case study of the influx of upper mantle fluids into the crust. *J Volcanol Geoth Res*, 2002, 118(3-4): 319—338[DOI]
- 33 赫英, 廖永胜. 胜利油田富二氧化碳含金流体及有关成因问题. *地质论评*, 2001, 47(3): 500—507