

# 加拿大奈恩地区镁铁-超镁铁岩体稀土元素地球化学特征及其意义

胥迎红<sup>1,2</sup>, 王京彬<sup>2</sup>, 宋谢炎<sup>3</sup>, 王向兰<sup>4</sup>, 陈列锰<sup>3</sup>, 于宋月<sup>3</sup>

(1. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 2. 北京矿产地质研究院, 北京 100012;  
3. 中国科学院地球化学研究所, 贵州 贵阳 550002; 4. 有色金属矿产地质调查中心, 北京 100012)

**摘要:** 奈恩镁铁-超镁铁质岩体位于加拿大萨德伯里火成杂岩体西南缘,属于古元古代尼帕辛(Nipissing)镁铁-超镁铁侵入岩套的一部分。奈恩岩体在地表出露 I 号和 II 号两个岩体,呈北东走向岩脉式分布,在深部二者合并为一个整体。奈恩岩体从底部至顶部主要包括辉石岩、含铜镍硫化物苏长辉长岩、苏长辉长岩、辉长辉绿岩-辉绿辉长岩等 4 个主岩相分带。奈恩岩体的  $\Sigma$ REE、LREE/HREE、Sm/Nd 等参数反映了岩浆源为上地幔部分熔融。岩体内不同岩相单元的 REE 球粒陨石标准化后,均表现为 LREE 富集、HREE 平坦的右倾型配分曲线,但含矿岩相表现为 LREE 强富集,且有独特的负铕异常。这些说明岩体内不同岩相均为同岩浆源产物,同时含矿岩相的 REE 分馏程度更高。通过 La/Yb-REE 图解和 La/Sm-La 图解的判别,反映奈恩镁铁-超镁铁质岩属于大陆拉斑玄武岩-碱性玄武岩范围,同时反映了岩浆源部分熔融的特点。

**关键词:** 尼帕辛; 奈恩; 镁铁-超镁铁质岩体; LREE 富集; 分馏程度; 部分熔融

**中图分类号:** P584 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4051(2015)S2-0135-08

## REE geochemical characteristics of the Nairn mafic-ultramafic intrusion, Sudbury, Canada

XU Ying-hong<sup>1,2</sup>, WANG Jing-bing<sup>2</sup>, SONG Xie-yan<sup>3</sup>, WANG Xiang-lan<sup>4</sup>, CHEN Lie-meng<sup>3</sup>, YU Song-yue<sup>3</sup>

(1. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Beijing Institute of Geology for Mineral Resources, Beijing 100012, China; 3. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 4. China Non-ferrous Metals Resource Geological Survey, Beijing 100012, China)

**Abstract:** Nairn mafic-ultramafic intrusion, which is a part of the Nipissing mafic-ultramafic intrusive suite, is located at the southwest edge of the Sudbury Igneous Complex, Canada. The Nairn intrusion exposed I and II blocks, as dikes in NE toward, on the surface, which combined into a whole in deep. Nairn intrusion includes four lithofacies belts from the bottom to the top: pyroxenite, copper-nickel sulfide ores, norite-gabbro, gabbro-diorite. According to the parameters of  $\Sigma$ REE, LREE/HREE, Sm/Nd, the magma source of Nairn intrusion could be partial melting of uppermost mantle. Chondrite-normalized REE patterns of different types of rock of Nairn intrusion assumed right-inclined fractionation, with enrichment of LREE and smoothness of HREE. But copper-nickel sulfide ores show higher enrichment of LREE and negative Eu anomalies. All of this assumed that different types of rock is originated from the comagmatic magma and copper-nickel sulfide ores showed stronger REE fractionation. According to La/Yb-REE diagram and La/Sm-La diagram, Nairn mafic-ultramafic intrusion belongs to the range of continental tholeiite-alkali basalt and its magma source was resulted from partial melting.

**Key words:** Nipissing; Nairn; mafic-ultramafic intrusion; LREE enrichment; fractionation degree; partial melting

收稿日期: 2015-08-10

基金项目: 国外矿产资源风险勘查专项项目资助(编号:10254B007)

作者简介: 胥迎红(1981-),男,工程师,在读博士研究生,专业为矿床学与矿床地球化学,主要从事有色金属矿床学研究。E-mail: henryxu7283@163.com.

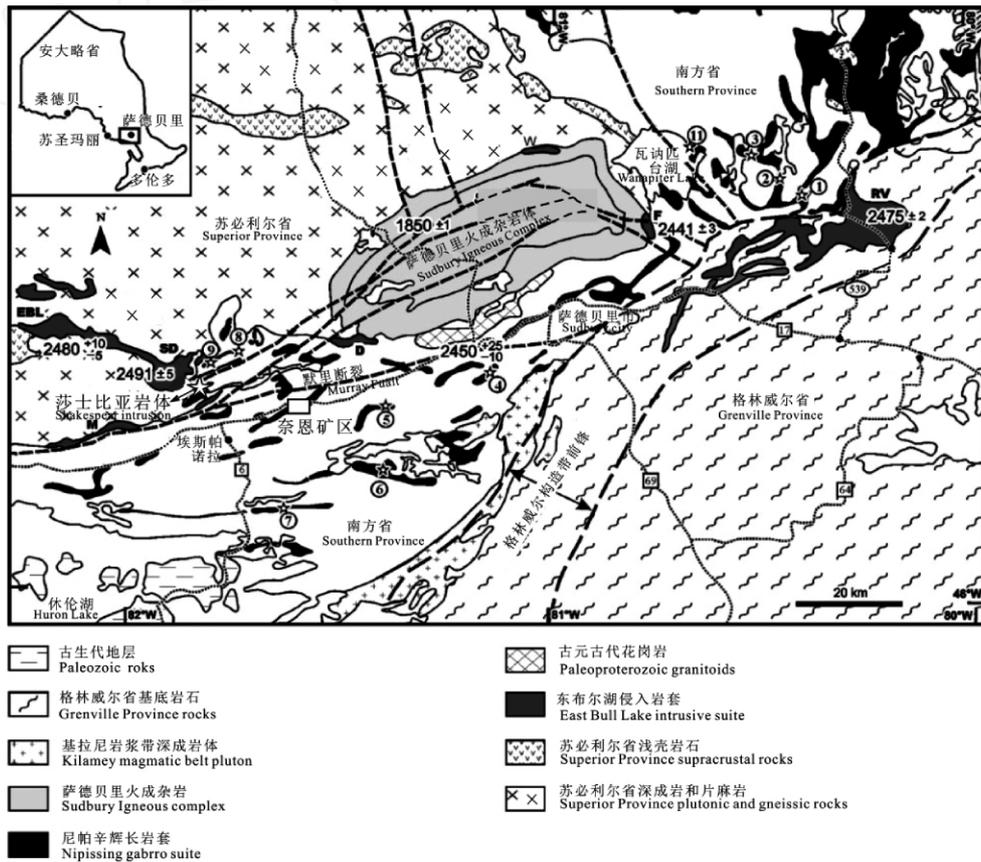
加拿大萨德伯里(Sudbury)奈恩(Nairn)地区发育一组镁铁-超镁铁质侵入岩体,属于区域上古元古代(2219Ma)尼帕辛(Nipissing)镁铁-超镁铁侵入岩套的一部分<sup>[1-2]</sup>。在萨德伯里火成杂岩体及

其赋存铜镍矿床的光环笼罩下,人们对尼帕辛岩套的认识并不是很多。虽然,尼帕辛镁铁—超镁铁侵入岩套内多处发育铜镍硫化物矿化,但过去地质学者们并不认为该岩套内具有寻找工业铜镍矿床的潜力。直到近些年,Ursa Major Minerals Incorporated公司在尼帕辛岩套西段、奈恩地区西北侧发现了中型规模的Shakespeare铜镍矿床<sup>[3]</sup>,大家才开始对尼帕辛岩套产生浓厚兴趣。

对奈恩岩体的稀土元素地球化学研究,能够更深入地了解奈恩岩体特征,对奈恩地区甚至整个尼帕辛岩套寻找铜镍矿床具有重要意义。

### 1 区域地质

奈恩地区距离加拿大萨德伯里火成杂岩体西南缘约20km,处于苏必利尔地质省(Superior Province)南缘与南方地质省(Southern Province)交汇部位(图1)。苏必利尔地质省基岩主要以太古代长英质深成岩体为主;南方地质省基岩以古元古代休伦统(Huronian Supergroup)上地壳岩石为主。所有基岩被东布尔湖镁铁侵入岩套(East Bull Lake Suite)、尼帕辛镁铁—超镁铁侵入岩套和萨德伯里火成杂岩体等几个不同时代的镁铁—超镁铁侵入岩套切割。



图中数字代表尼帕辛侵入岩套中的各矿化点位置:①:筒岩体;②:戴维斯-凯利岩体;③:凯利岩体;④:马卡达湖岩体;⑤:路易斯湖岩体;⑥:莱克帕奈什岩体;⑦:卡森湖岩体;⑧:大天鹅岩体;⑨:昂布莱恩岩体;图中也展示了东布尔湖侵入岩套中矿化岩体的位置并用字母缩写标记:RV:里弗瓦利岩体;D:德鲁里镇岩体;W:温斯特镇岩体;F:猎鹰桥岩体;SD:阿格纽湖岩体;EBL:东布尔湖岩体;修改自 Sproule et al.,(2007)。

图1 安大略省萨德伯里地区地质简图

尼帕辛镁铁—超镁铁侵入岩套主要以岩脉或岩床形式(大约90%)出露在早元古代休伦统变质沉积岩中(2.45~2.2Ga)<sup>[1-2,4-7]</sup>(图1)。整个尼帕辛镁铁—超镁铁侵入岩套从苏圣玛丽(Sault Ste. Marie)经过萨德伯里地区一直延伸到克波特(Cobalt)地区,呈狭长带状分布,东西向延伸达450km,岩带出露宽度变化范围较大,从20~150km不等,岩套总体积大于104km<sup>3</sup>,其规模虽然不能与

中生代和现代的大陆溢流玄武岩相比(如非洲的Karoo火成岩省,西伯利亚大火成岩省),但仍被认为是元古代大陆溢流玄武岩省的残留(2.21~2.22Ga)<sup>[8]</sup>。

### 2 矿区地质

奈恩地区镁铁—超镁铁侵入岩体位于尼帕辛侵入岩套的西段。奈恩岩体侵位于2.45~2.2Ga的休伦统(Huronian Supergroup)的长石石英砂岩、

含砾砂岩、浅变质细砂岩中<sup>[4]</sup>(图 2)。参考邻区 Shakespeare 矿床年龄测试数据<sup>[4]</sup>, 推测奈恩侵入体形成时间约为 2219 Ma。奈恩岩体基本形态依然保存完好, 在地表出露 I 号和 II 号岩体(图 2), 推测在深部这两条岩体合并为一个整体, 产状呈南东缓倾。

I 号岩体总体呈 NE-SW 走向岩脉产出, 倾向 SE, 倾角约为 60~70°。该岩体沿走向延伸约 9km,

岩体厚度约 400m, 但在该岩体东北部该岩体呈重叠状, 厚度增大为约 800m。I 号岩体北东段受岩浆期后 SN 向断裂和 NW 向断裂破坏明显。II 号岩体也呈岩脉产出, 但产状略有变化, 南西端呈近 NE-SW 走向, 北东端呈弧状逐渐向南东弯曲(图 2), 倾向也随之由 SE 逐渐变为 S 向, 倾角较 I 号岩体略缓一些, 约为 50~60°。该岩体沿走向延伸约 5km, 厚度约 300~500m 之间变化。II 号岩体受构造影响较小。

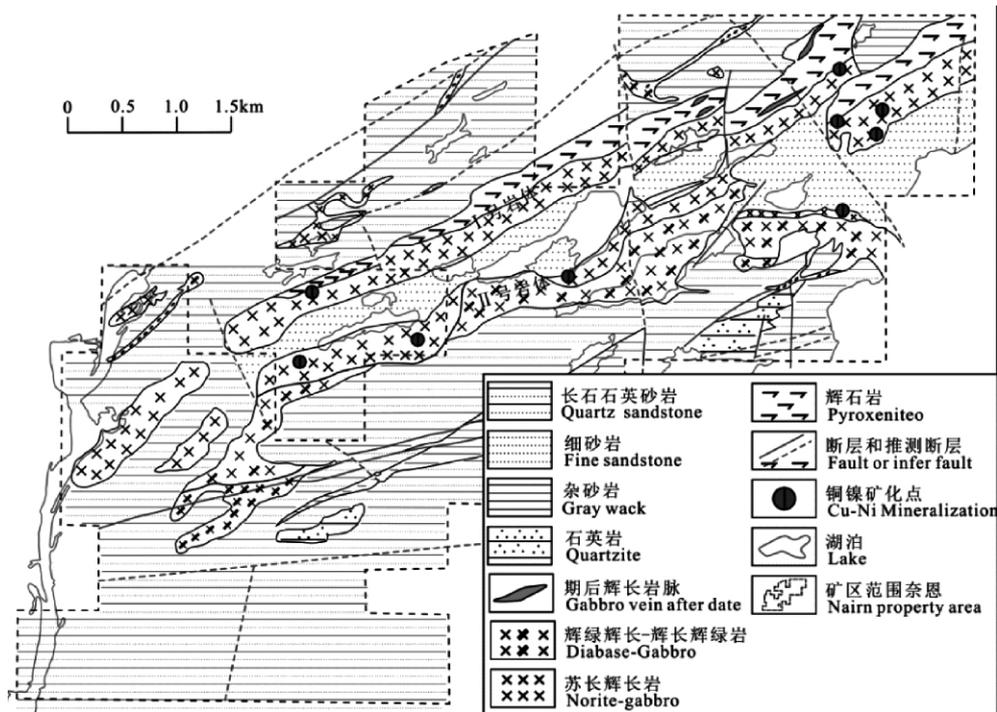


图 2 加拿大萨德伯里奈恩地区地质简图

奈恩岩体岩相分带性较好, 与区域上尼帕辛侵入岩套的岩相分带基本一致<sup>[9-10]</sup>。从顶部至底部岩相分带依次为: 顶部辉绿岩、辉绿辉长岩-辉长辉绿岩、浅色—暗色苏长辉长岩、辉石岩、底部辉绿岩组成(图 3)。顶部辉绿岩、辉绿辉长岩-辉长辉绿岩主要位于 II 号岩体; 浅色—暗色苏长辉长岩、辉石岩、底部辉绿岩主要位于 I 号岩体。铜镍硫化物主要分布在浅色—暗色苏长辉长岩、辉石岩两个岩相单元内。浅色—暗色苏长辉长岩内主要发育浸染状铜镍硫化物矿化, 辉石岩内主要发育半块状-块状铜镍硫化物矿化(图 3)。岩相分带在 I 号、II 号两个岩体中并没有重复, 说明这两条岩体是岩浆侵入后作为一个整体分带的结果, 而不是岩浆同时侵入在不同位置形成的两条独立岩体。岩体还发育少量主岩浆期后形成细粒辉长岩脉。

### 3 稀土元素地球化学特征

本次研究工作中, 针对奈恩矿区 I 号岩体、II 号

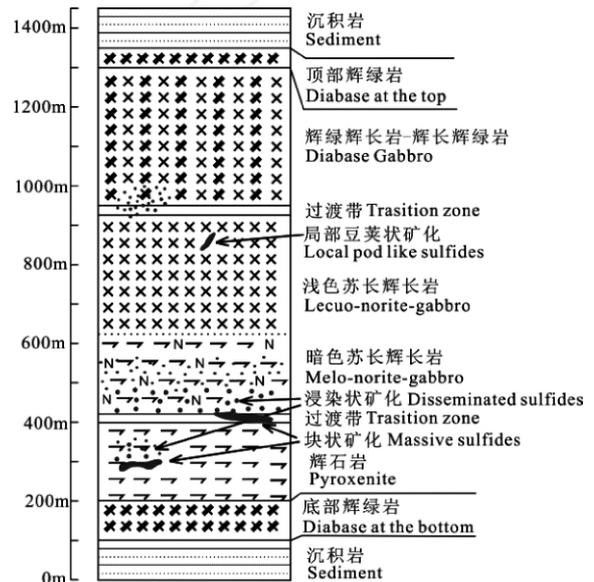


图 3 奈恩岩体岩相分带柱状图

岩体的典型岩相分带, 分别在不同岩石单元采集了

地表样品和少量钻孔岩芯样品进行15种稀土元素进行分析测试(表1),对奈恩镁铁-超镁铁岩体的稀土元素分配演化进行总体认识,最后利用稀土元素特征探讨在岩浆形成、演化及成岩、成矿过程中的反映<sup>[11-12]</sup>。

### 3.1 参数值特征

#### 3.1.1 $\Sigma$ REE、LREE/HREE

由表1、表2可知,奈恩岩体的 $\Sigma$ REE总体更接近于上地幔特征值,而与下地幔相差巨大,这说明奈恩岩体的岩浆可能来源上地幔部分熔融,与下地幔物质无关。奈恩岩体的 $\Sigma$ REE与上地幔仍有一定差异,尤其含矿岩相表现更为明显,这说明岩浆在演化过程中受到了地壳物质的混染,并且含矿化

岩相的岩浆混染作用更强,这与典型岩浆型铜镍矿床成矿模式一致。LREE/HREE比值也可以得到相似认识,含矿岩相的比值较其他岩相比值更高,这与金川铜镍矿床的含矿岩相相似<sup>[16]</sup>,反映了含矿岩相更富集轻稀土,其岩浆混染作用更强。

需要说明,细粒辉长岩脉岩属于奈恩岩体期后产物,所以其REE含量及特征值与岩体内各岩相单元相差极大,这里不对该岩相特征进行过多论述。

#### 3.1.2 (La/Yb)N、La/Yb、Ce/Yb

(La/Yb)N、La/Yb、Ce/Yb比值是反映REE分馏程度的重要参数(汤中立,1995)。由表2可见,奈恩岩体各岩相单元的(La/Yb)N、La/Yb、Ce/Yb比值变化特征一致。随镁铁含量的增加,(La/Yb)

表1 奈恩岩体稀土元素含量及其特征值

样品	ZK1-005	ZK1-053	K11-1	K11-11	K11-28	ZK1-473	ZK1-428	ZK2-015	ZK3-011	ZK4-001	ZK5-112	ZK5-72	
岩石类型	苏长辉长岩					辉石岩							
稀土含量 ( $10^{-6}$ )	La	4.5	2.9	4.1	4.7	6.1	6.1	3.8	4.5	3.4	2.7	3.6	3.3
	Ce	9.6	6.2	8.6	9.8	12.6	12.4	8.2	9.6	7.3	6	7.9	7.2
	Pr	1.26	0.84	1.14	1.29	1.49	1.57	1.09	1.25	0.97	0.84	1.03	0.95
	Nd	5.2	3.7	4.9	5.4	5.8	6.3	4.7	5.1	4.1	3.7	4.4	4.3
	Sm	1.4	1	1.28	1.37	1.34	1.48	1.24	1.37	1.1	1.04	1.17	1.13
	Eu	0.6	0.4	0.55	0.58	0.54	0.51	0.44	0.46	0.38	0.38	0.38	0.44
	Gd	1.6	1.14	1.55	1.59	1.45	1.7	1.48	1.58	1.29	1.22	1.41	1.3
	Tb	0.28	0.21	0.27	0.28	0.25	0.31	0.26	0.28	0.23	0.22	0.24	0.23
	Dy	1.82	1.32	1.67	1.71	1.54	2	1.62	1.72	1.48	1.37	1.56	1.47
	Ho	0.35	0.27	0.35	0.37	0.32	0.42	0.34	0.36	0.31	0.29	0.32	0.31
	Er	1.06	0.81	1.01	1.06	0.97	1.29	1	1.1	0.89	0.87	0.94	0.93
	Tm	0.15	0.11	0.14	0.14	0.14	0.19	0.14	0.15	0.12	0.12	0.14	0.13
	Yb	0.95	0.74	0.91	0.93	0.92	1.21	0.92	0.97	0.81	0.77	0.88	0.84
	Lu	0.13	0.11	0.14	0.14	0.15	0.18	0.14	0.15	0.13	0.12	0.13	0.13
	Y	9.10	6.90	8.50	9.0	8.10	10.70	8.40	9.0	7.70	7.20	8.30	8.0
	$\Sigma$ REE( $10^{-6}$ )	38.00	26.65	35.11	38.36	41.71	46.36	33.77	37.59	30.21	26.84	32.4	30.66
	LREE( $10^{-6}$ )	22.56	15.04	20.57	23.14	27.87	28.36	19.47	22.28	17.25	14.66	18.48	17.32
	HREE( $10^{-6}$ )	15.44	11.61	14.54	15.22	13.84	18.00	14.30	15.31	12.96	12.18	13.92	13.34
	LREE/HREE	1.46	1.30	1.41	1.52	2.01	1.58	1.36	1.46	1.33	1.20	1.33	1.30
	(La/Yb)N	3.13	2.59	2.98	3.34	4.38	3.33	2.73	3.06	2.77	2.32	2.70	2.59
稀土元素 特征值	La/Yb	4.74	3.92	4.51	5.05	6.63	5.04	4.13	4.64	4.20	3.51	4.09	3.93
	Ce/Yb	10.11	8.38	9.45	10.54	13.70	10.25	8.91	9.90	9.01	7.79	8.98	8.57
	La/Sm	3.21	2.90	3.20	3.43	4.55	4.12	3.06	3.28	3.09	2.60	3.08	2.92
	Sm/Nd	0.27	0.27	0.26	0.25	0.23	0.23	0.26	0.27	0.27	0.28	0.27	0.26
	Eu/Sm	0.43	0.40	0.43	0.42	0.40	0.34	0.35	0.34	0.35	0.37	0.32	0.39
	$\delta$ Eu	1.23	1.15	1.20	1.21	1.19	0.99	1.00	0.96	0.98	1.04	0.91	1.12
	$\delta$ Ce	0.94	0.92	0.92	0.92	0.96	0.92	0.94	0.94	0.93	0.93	0.95	0.95

续表 1-1

样品	JN11-17	JN11-18	JN11-20	JN11-21	JN11-22	JN11-23	JN11-24	ZK4-012	ZK5-036	ZK5-049	K11-48	
岩石类型	辉长辉绿岩				辉绿辉长岩			含矿化苏长辉长岩				
稀土含量 ( $10^{-6}$ )	La	4.98	3.84	3.12	2.93	4.28	1.49	2.26	8.9	6.1	19.4	7.6
	Ce	10.9	8.51	6.83	6.39	9.31	3.19	5.1	18.3	12.6	37.2	15.6
	Pr	1.46	1.09	0.91	0.87	1.23	0.44	0.68	2.22	1.49	4.18	1.88
	Nd	6.61	4.78	4.19	3.97	5.32	1.96	2.77	8.4	5.7	14.6	6.6
	Sm	1.82	1.38	1.18	1.15	1.43	0.67	0.73	1.74	1.25	2.43	1.39
	Eu	0.65	0.63	0.46	0.45	0.55	0.29	0.4	0.41	0.38	0.50	0.40
	Gd	2.27	1.61	1.45	1.41	1.7	0.85	0.89	1.74	1.33	2.35	1.36
	Tb	0.38	0.28	0.26	0.25	0.29	0.17	0.14	0.27	0.23	0.33	0.23
	Dy	2.46	1.85	1.66	1.6	1.87	1.2	0.88	1.58	1.34	1.79	1.42
	Ho	0.52	0.38	0.34	0.34	0.4	0.27	0.19	0.34	0.28	0.38	0.32
	Er	1.38	1.01	0.94	0.89	1.07	0.74	0.56	0.99	0.85	1.23	0.95
	Tm	0.2	0.16	0.14	0.13	0.15	0.11	0.07	0.14	0.12	0.19	0.15
	Yb	1.28	0.96	0.88	0.8	0.97	0.81	0.55	0.98	0.82	1.27	0.97
	Lu	0.18	0.14	0.13	0.12	0.15	0.13	0.09	0.16	0.13	0.2	0.16
Y	13.4	10.2	9.9	9.6	11.3	8	5.7	8.9	7.6	9.8	7.9	
稀土元素 特征值	$\Sigma\text{REE}(10^{-6})$	48.49	36.82	32.39	30.9	40.02	20.32	21.01	55.07	40.22	95.85	46.93
	LREE( $10^{-6}$ )	26.42	20.23	16.69	15.76	22.12	8.04	11.94	39.97	27.52	78.31	33.47
	HREE( $10^{-6}$ )	22.07	16.59	15.70	15.14	17.90	12.28	9.07	15.10	12.70	17.54	13.46
	LREE/HREE	1.20	1.22	1.06	1.04	1.24	0.65	1.32	2.65	2.17	4.46	2.49
	(La/Yb)N	2.57	2.64	2.34	2.42	2.91	1.21	2.71	6.00	4.91	10.09	5.17
	La/Yb	3.89	4.00	3.55	3.66	4.41	1.84	4.11	9.08	7.44	15.28	7.84
	Ce/Yb	8.52	8.86	7.76	7.99	9.60	3.94	9.27	18.67	15.37	29.29	16.08
	La/Sm	2.74	2.78	2.64	2.55	2.99	2.22	3.10	5.11	4.88	7.98	5.47
	Sm/Nd	0.28	0.29	0.28	0.29	0.27	0.34	0.26	0.21	0.22	0.17	0.21
	Eu/Sm	0.36	0.46	0.39	0.39	0.38	0.43	0.55	0.24	0.30	0.21	0.29
	$\delta\text{Eu}$	0.99	1.30	1.08	1.09	1.09	1.19	1.53	0.72	0.90	0.64	0.89
$\delta\text{Ce}$	0.94	0.97	0.94	0.93	0.94	0.92	0.96	0.95	0.96	0.93	0.95	

续表 1-2

样品	K11-51	ZK1-069	ZK1-420	ZK2-012	ZK3-004	ZK4-028	地球中的丰度 (黎彤, 1976)		Leedy 球粒陨 石平均值 (Masuda, 1973)	
岩石类型	含矿化苏 长辉长岩	细粒辉长脉岩				上地幔	下地幔			
稀土含量 ( $10^{-6}$ )	La	12.4	21.8	27.8	36.6	34.4	33.4	0.70	0.40	0.315
	Ce	24.5	44.6	56.8	77	69.9	70	1.10	0.70	0.813
	Pr	2.85	5.83	7.24	9.48	8.88	8.87	1.00	0.10	0.115
	Nd	10.3	23.2	28.4	37	35.3	35.1	5.00	0.80	0.597
	Sm	1.98	5.14	6.11	7.85	7.47	7.58	1.30	0.30	0.192
	Eu	0.57	1.53	1.77	2.2	2.09	2.02	0.30	0.01	0.0722
	Gd	2.05	5.59	6.55	8.49	8.04	7.56	1.20	0.60	0.259
	Tb	0.32	0.9	1.03	1.32	1.28	1.22	0.20	0.07	0.0473
	Dy	1.9	5.46	6.23	7.81	7.6	7.11	0.50	0.05	0.325
	Ho	0.41	1.13	1.28	1.63	1.57	1.46	0.20	0.10	0.0723
	Er	1.23	3.4	3.82	4.93	4.65	4.41	0.50	0.30	0.213
	Tm	0.18	0.47	0.53	0.68	0.65	0.61	0.05	0.05	0.0333
	Yb	1.21	3.04	3.52	4.35	4.27	3.89	0.50	0.30	0.208
	Lu	0.19	0.47	0.55	0.66	0.66	0.6	0.15	0.05	0.0323
Y	10.7	29.4	33	41	40.5	38.1	5.00	0.50		

续表 1-3

样品	K11-51	ZK1-069	ZK1-420	ZK2-012	ZK3-004	ZK4-028	地球中的丰度 (黎彤,1976)		Leedy 球粒陨 石平均值 (Masuda,1973)	
							上地幔	下地幔		
岩石类型	含矿化苏 长辉长岩		细粒辉长脉岩				上地幔	下地幔		
$\Sigma\text{REE}(10^{-6})$	70.79	151.96	184.63	241	227.26	221.93	17.7	4.33	3.29	
LREE( $10^{-6}$ )	52.60	102.10	128.12	170.13	158.04	156.97	9.40	2.31	2.10	
HREE( $10^{-6}$ )	18.19	49.86	56.51	70.87	69.22	64.96	8.30	2.02	1.19	
LREE/HREE	2.89	2.05	2.27	2.40	2.28	2.42	1.13	1.14	1.77	
(La/Yb)N	6.77	4.74	5.22	5.56	5.32	5.67	0.92	0.88	1.00	
稀土元素 特征值	La/Yb	10.25	7.17	7.90	8.41	8.06	8.59	1.40	1.33	1.51
	Ce/Yb	20.25	14.67	16.14	17.70	16.37	17.99	2.20	2.33	3.91
	La/Sm	6.26	4.24	4.55	4.66	4.61	4.41	0.54	1.33	1.64
	Sm/Nd	0.19	0.22	0.22	0.21	0.21	0.22	0.26	0.38	0.32
	Eu/Sm	0.29	0.30	0.29	0.28	0.28	0.27	0.23	0.03	0.38
	$\delta\text{Eu}$	0.87	0.88	0.86	0.83	0.83	0.81	0.73	0.07	1.00
	$\delta\text{Ce}$	0.94	0.92	0.92	0.95	0.92	0.94	0.25	0.80	1.00

注:①球粒陨石标准值引自 Leedy 球粒陨石平均值, Masuda, 1973<sup>[13]</sup>。②上地幔、下地幔的稀土元素数据引自黎彤, 1976<sup>[14]</sup>。③JN 系列样品的数据引自胥迎红等, 2012<sup>[15]</sup>。数据测试由中科院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成, 采用方法: Axios PW4400 型 X 荧光光谱仪法, 分析浓度范围: ppb-%。④其余样品测试由澳实分析检测(加拿大)有限公司完成, 采用方法: 硼酸锂融合, 电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES), 所有元素测试精度为  $10^{-9}$ 。

表 2 不同岩相单元样品 REE 特征值的平均值对比

岩石类型	辉石岩	苏长辉长岩	辉长辉绿岩- 辉绿辉长岩	含矿化苏 长辉长岩	细粒辉 长脉岩	上地幔	下地幔	Leedy 球粒 陨石平均值	
$\Sigma\text{REE}(10^{-6})$	33.98	35.97	32.85	61.77	205.36	17.7	4.33	3.29	
LREE/HREE	1.36	1.54	1.1	2.93	2.28	1.13	1.14	1.77	
LaN/YbN	2.79	3.28	2.4	6.59	5.3	0.92	0.88	1	
稀土 元素 特征 值	La/Yb	4.22	4.97	3.64	9.98	8.02	1.4	1.33	1.51
	Ce/Yb	9.06	10.43	7.99	19.93	16.57	2.2	2.33	3.91
	La/Sm	3.17	3.46	2.72	5.94	4.49	0.54	1.33	1.64
	Sm/Nd	0.26	0.26	0.29	0.20	0.22	0.26	0.38	0.32
	Eu/Sm	0.35	0.42	0.42	0.26	0.28	0.23	0.03	0.38
	$\delta\text{Eu}$	1	1.2	1.18	0.8	0.84	0.73	0.07	1
	$\delta\text{Ce}$	0.94	0.93	0.94	0.95	0.93	0.25	0.8	1

注: 上地幔、下地幔的稀土元素数据引自黎彤, 1976<sup>[14]</sup>。

N、La/Yb、Ce/Yb 比值略有减小, 即 REE 分馏程度增大, 但程度不明显。随着铜镍硫化物含量的增加, 其 La/Yb、Ce/Yb 比值呈明显增加,  $\Sigma\text{REE}$  总含量与 LREE 分馏程度增大<sup>[15]</sup>。这说明岩浆中硫化物熔离作用对 REE 分馏的影响要远大于岩浆结晶分异作用的影响。

### 3.1.3 Sm/Nd、La/Sm、 $\delta\text{Eu}$

由表 1 可以看出, 除了 JN11-23 样品的 Sm/Nd 比值为 0.34 外, 岩体内其余各岩相样品的 Sm/Nd

比值均小于 0.33(以 0.33 为界, 赫尔曼数据), 为轻稀土富集型, 反映了它们岩浆源一致<sup>[11,15]</sup>。各岩相的 Sm/Nd 值范围在 0.17~0.29 之间, 变化范围很窄, 反映了岩浆源部分熔融的特点<sup>[11]</sup>。

La/Sm 比值反映了 LREE 之间的分馏程度<sup>[11][15]</sup>。奈恩岩体中不同岩相的 La/Sm 比值变化与 La/Yb、Ce/Yb 比值变化相似, 随着铜镍硫化物含量的增加, La/Sm 比值明显增加, 说明趋向于富集更轻的稀土元素。

由表 1、表 2 可知, 辉石岩的  $\delta\text{Eu}$  值 = 1 土, 没有明显铕异常; 苏长辉长岩、辉长辉绿岩的  $\delta\text{Eu}$  值相近, 且均 > 1, 表现为弱正铕异常。含铜镍矿化苏长辉长岩的  $\delta\text{Eu}$  值 < 1, 表现为明显的负铕异常。就同一期岩石来说, 斜长石含量高的岩石的  $\delta\text{Eu}$  值较高, 奈恩岩体中含矿化苏长辉长岩的斜长石含量明显高于辉石岩, 但是仍然表现为明显负铕异常, 这可能是岩浆熔离作用和重力分异作用导致的结果<sup>[15]</sup>。含硫岩浆熔离后, 由于重力分异作用, 逐渐向岩浆房底部下移, 这时候含矿岩浆成分发生了明显改变, 产生了非同期岩浆的效果, 所以形成了独有的负铕异常。另外, 这也反映了奈恩岩体内含矿岩相并没有发生强烈后期热液叠加作用<sup>[16]</sup>。

### 3.2 图解

#### 3.2.1 球粒陨石标准化图解

不同成因和类型的地质体具有不同的球粒陨石标准化分布型式<sup>[11]</sup>。

按不同类型的岩石、矿石, 将测试和收集的稀土元素分析结果经算术平均后与球粒陨石标准化后进行作图(图 4)。从图解可见, 奈恩岩体总体呈右倾斜曲线, 为轻稀土富集型, 与参数特征一致, 说明各岩相单元岩浆来源一致, 这种特征与大多数岩浆型铜镍矿特征相似, 如国内金川铜镍矿<sup>[11,16]</sup>、吉林红旗岭铜镍矿<sup>[12,17-18]</sup>、金平白马寨铜镍矿床<sup>[19]</sup>、东天山图拉尔根铜镍矿床<sup>[20]</sup>等均表现此特征。图解显示, 含矿化苏长辉长岩较其他岩相明显更加富集轻稀土, 且轻稀土含量也明显高于其他岩相, 说明含矿岩相的 REE 分馏程度最强。另外, 各岩相在铕异常特征上有明显不同, 与  $\delta\text{Eu}$  特征值反映结果一致, 含矿化的苏长辉长岩表现为弱负铕异常, 苏长辉长岩和辉长辉绿岩都表现弱正铕异常, 辉石岩无明显铕异常。Gd、Tb 元素表现无明显异常, 推测奈恩岩体受地壳物质影响不大<sup>[11]</sup>。

辉长辉绿岩的矿物成分与苏长辉长岩接近, 但  $\Sigma\text{REE}$  含量及 LREE 富集程度都有明显差异, 这里推测矿物粒度可能对 REE 也有明显影响<sup>[11]</sup>。粒度越小,  $\Sigma\text{REE}$  含量及 LREE 富集程度均变小。

奈恩岩体稀土元素球粒陨石标准化模型图解与萨德伯里岩体相似, 都为典型的 LREE 富集型, LREE、HREE 分馏程度大, 但  $\Sigma\text{REE}$  远低于萨德伯里岩体<sup>[11]</sup>。

#### 3.2.2 参数图解

1) La/Yb—REE 图解。对奈恩岩体的样品用该图解投图(图 5), 样品投点均落入玄武岩区, 集中于大陆拉斑玄武岩—碱性玄武岩的区域, 并且显示

出, 由大陆拉斑玄武岩向碱性玄武岩过渡的趋势<sup>[11]</sup>。

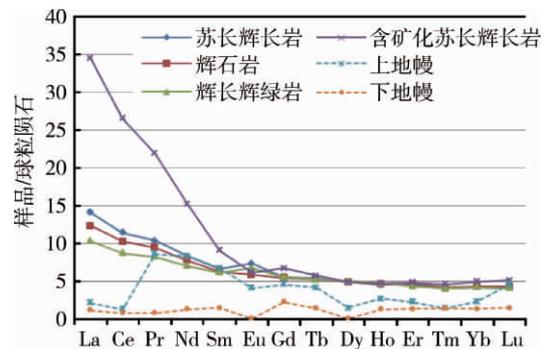


图 4 奈恩岩体不同类型岩石、矿石 REE 碳质球粒陨石标准化分配模型 (碳质球粒陨石标准值引自 Leedy 球粒陨石平均值, Masuda, 1973)<sup>[13]</sup>

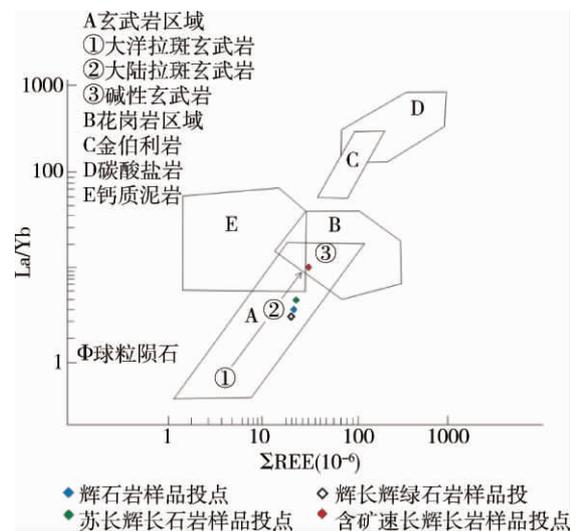


图 5 La/Yb—REE 图解

2) La/Sm—La 图解。通过 La/Sm—La 图解, 可以把部分熔融与分离结晶作用区分开来。分离结晶作用形成的岩石数据点往往构成一条水平线, 而部分熔融产物的数据点则构成一条斜线<sup>[11]</sup>(图 6)。将奈恩岩体中样品数据投点后大致可构成一条斜线, 反映了奈恩镁铁—超镁铁质岩体形成于上地幔部分熔融<sup>[11]</sup>。

## 4 结论

1) 奈恩岩体的  $\Sigma\text{REE}$  更接近上地幔, 且 Sm/Nd 值范围很窄, 反映了岩浆源为上地幔部分熔融。球粒陨石标准化分配模型显示, 奈恩镁铁—超镁铁质岩体内不同岩相单元 REE 配分梯度曲线相似, 都表现为 LREE 富集型的特点, 说明各岩相单元为同源岩浆产物。

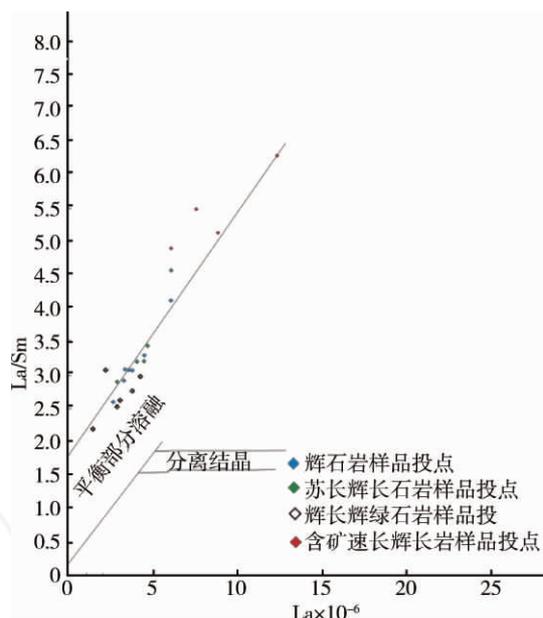


图6 La/Sm—REE 图解

2) La/Yb 等参数和球粒陨石标准化分配模型显示,铜镍硫化物对 REE 分馏程度影响较大,含铜镍硫化物岩相 LREE 富集程度最高。从分配模型中还可以看到,矿物粒度较大的岩相较矿物粒度较小的岩相更富集 LREE,REE 分馏程度更高。

3) 奈恩岩体的不含铜镍硫化物的镁铁质岩石表现为弱正铈异常,含铜镍硫化物的镁铁质岩石表现为弱负铈异常,超镁铁质岩石则无明显铈异常。

4) La/Yb—REE 图解反映,奈恩镁铁—超镁铁质岩落入大陆拉斑玄武岩—碱性玄武岩范围。La/Sm—La 图解显示,奈恩镁铁—超镁铁质岩体的数据点则构成一条明显斜线,反映了岩浆源部分熔融的特点。

### 参考文献

- [1] Krogh T E, Kamo S L, Bohor B F. Shocked metamorphosed zircons with correlated U-Pb discordance and melt rocks with concordant protolith ages indicate an impact origin for the Sudbury Structure [M]. Canada: American Geophysical Union, Geophysical Monograph, 1996: 343-352.
- [2] Corfu F, Andrews A. A U-Pb age for mineralized Nipissing diabase, Gowganda, Ontario [J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1986, 23: 107-112.
- [3] Sproule R A, Sutcliffe R, Tracaneli, H. Palaeoproterozoic Ni-Cu-PGE mineralization in the Shakespeare intrusion, Ontario, Canada: a new style of Nipissing gabbro-hosted mineralization [J]. Applied Earth Science (Trans. Inst. Min. Metall. B), 2007, 116(4): 188-200.
- [4] Krogh T E, Davis D W, Corfu F. Precise U-Pb Zircon and baddeleyite ages for the Sudbury area; in the Geology and Ore Deposits of the Sudbury Structure [J]. Ontario Geological Survey, 1984, SV. 1: 431-446.
- [5] Jobin-Bevans L S, MacRae N D, Keays R R. Cu-Ni-PGE potential of the Nipissing diabase [M]. Canada: Ontario Geological Survey, 1998, Miscellaneous Paper 169: 220-223.
- [6] Jobin-Bevans L S, Keays R R, MacRae N D. Cu-Ni-PGE in Nipissing Diabase: Results from surface and core samples [M]. Canada: Ontario Geological Survey, Open File Report, 1999, 6000: 33-1-33-5.
- [7] Jobin-Bevans L S. Platinum-group mineralization in Nipissing gabbro intrusions and the River Valley intrusions, Sudbury Region, Ontario [D]. London, Ontario: University of Western Ontario, 2004: 573.
- [8] Lightfoot P C, De Souza H, Doherty W. Differentiation and source of Nipissing Diabase intrusions, Ontario, Canada [J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1993, 30: 1123-1140.
- [9] Lightfoot P C, Naldrett A J. Petrology and geochemistry of the Nipissing Gabbro: exploration strategies for nickel, copper, and platinum group elements in a Large Igneous Province [J]. Ontario Geological Survey, 1996, 58: 4-8.
- [10] Lightfoot P C, Naldrett A J. A field guide to the geology of Sudbury, Ontario [J]. Ontario Geological Survey, 2009, Open File Report 6243: 31-36.
- [11] 汤中立, 李文渊. 金川铜镍硫化物(含铂)矿床成矿模式及地质对比 [M]. 北京: 地质出版社, 1995: 143-152.
- [12] 刘默. 吉林红旗岭铜镍硫化物矿床地质特征及成因研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2005.
- [13] 赵志根. 不同球粒陨石平均值对稀土元素参数的影响——兼论球粒陨石标准 [J]. 标准化报道, 2000, 21(3): 15-16.
- [14] 黎彤. 化学元素的地球丰度 [J]. 地球化学, 1976(3): 167-171.
- [15] 胥迎红, 王晨昇, 王向兰. 加拿大安大略省奈恩铜镍矿区岩相学、矿相学及稀土元素地球化学特征 [J]. 矿产勘查, 2012, 3(4): 537-544.
- [16] 田毓龙, 包国忠, 汤中立, 等. 金川铜镍硫化物矿床岩浆通道型矿体地质地球化学特征 [J]. 地质学报, 2009, 83(10): 1515-1521.
- [17] 董耀松, 范继璋, 杨言辰, 等. 吉林红旗岭铜镍矿床的地质特征及成因 [J]. 现代地质, 2004, 18(2): 197-202.
- [18] 郗爱华, 任洪茂, 李宝林, 等. 吉林省红旗岭铜镍硫化物矿床的岩石学和地球化学研究 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2002, 32(2): 140-145.
- [19] 宋立军, 吴冲龙, 朱杰勇, 等. 白马寨铜镍硫化物地球化学特征及成矿 [J]. 地质与勘探, 2005, 41(4): 39-43.
- [20] 孙赫, 秦克章, 李金祥, 等. 东天山图拉尔根铜镍钴硫化物矿床岩相、岩石地球化学特征及其形成的构造背景 [J]. 中国地质, 2006, 33(3): 606-613.