科学通报 2014 年 第 59 卷 第 11 期：960 ~ 969
论 文 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

藏南罗布莎蛇绿岩高磁异常分布特征与成因

何兰芳[①②*], 胡修棉[①], 查亚兵[③], 徐礼贵[②], 王耀辉[②]

① 南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京大学地球科学与工程学院, 南京 210093;
② 中国石油东方地球物理公司, 涿州 072750;
③ 国防科技大学信息系统与管理学院, 长沙 410073
* 联系人, E-mail: mofoo@263.net

2013-05-10 收稿, 2013-08-19 接受, 2014-03-06 网络版发表
中央地质勘查基金(12120113095200), 国家自然科学基金(U1262206)和十二五国家重大科技专项(2011ZX05019-007)资助

摘要 罗布莎蛇绿岩位于连接亚欧板块和印度板块的雅鲁藏布江缝合带东段, 航磁调查发现了雅鲁藏布江航磁异常带, 并认为是雅鲁藏布江缝合带蛇绿岩存在的客观反映. 前人将罗布莎蛇绿岩高磁异常的成因笼统地归结为超镁铁岩体的存在. 然而, 在罗布莎岩体高精度地面磁测和钻孔岩芯的磁化率测量时发现, 高磁性在超镁铁岩体内部分布极不均匀, 甚至同一块标本的不同位置, 磁化率的差异超过 30 倍. 岩芯磁化率研究发现, 蛇纹石化纯橄岩的磁化率远高于其他岩石(新鲜纯橄岩、斜辉辉橄岩、铬铁矿等). 详细的显微镜和电子探针分析发现, 在纯橄岩蛇纹石化裂隙和蛇纹石中存在丰富的磁铁矿, 铬尖晶石周边也被厚度不等的磁铁矿包围. 通过矿物磁化率特征分析, 结合罗布莎岩体高磁异常的分布特征, 认定罗布莎岩体橄榄岩蛇纹石化过程中析出的磁铁矿是导致罗布莎蛇绿岩出现高磁异常的原因.

关键词
高磁异常
成因
磁铁矿
超镁铁岩体
罗布莎
蛇绿岩

高磁异常是指一定区域的磁场值明显高于平均磁场值的一种扰动或异常, 它在全球范围内普遍存在[1]. 正确认识和合理地解释这些高磁异常引起了地质学家的广泛关注, 因为它既是地质地球物理学的一个基础科学问题[2~5], 又能为地球动力学研究[6~8]、构造研究[9~11]和矿产资源预测提供依据[12~14]. 多数学者从岩体和构造等宏观因素方面推断高磁异常的成因, 延伸较长的区域性高磁异常带的出现通常被认为是板块缝合带的俯冲或残余洋壳形成的蛇绿岩或中酸性岩侵入所致[15~18], 分布范围较小的局部的高磁异常的出现多数被认为是小范围分布的火成岩体或局部的基底抬升[19~22]. 由于区域性的磁异常的数据处理大多采用长波长数据, 推测的异常源埋藏深度较大, 难以得到钻探或其他采样分析印证, 多数佐证依托其他的地球物理资料如大地电磁、重力、地震资料[15,18~22]. 埋藏较浅或出露的火成岩可以通过采样和钻孔岩芯的测定验证分析磁异常的成因[23], 但这方面的工作极少. 针对火成岩和环境高磁异常成因问题, 国外已开展岩石和矿物的磁性方面的研究[24~28], 国内在土壤和环境磁学方面开展了深入研究[29~32], 在地质和地球物理领域矿物磁性和磁异常矿物成因研究仅有极少量文献发表[23,32].

西藏南部罗布莎岩体位于雅鲁藏布江蛇绿岩带东段(图 1), 受雅鲁藏布江构造带的控制[33]. 由于罗布莎是我国最大的铬铁矿产地, 同时也是蛇绿岩尤其是地幔橄榄岩出露较好的部位之一, 在整个雅鲁藏布江蛇绿岩中研究程度相对较高[33,34], 在矿物[33,35~37]、矿床特征[38~42]、岩体定年、形成环境[43]、区域地质构造[34,44]等方面取得了不少进展. 但在罗布莎蛇绿岩岩体和铬铁矿的成因、构造产出与侵位机制的关键问题上还没有形成一致的研究结论[33,34]. 在岩体和铬铁矿成因方面, Zhou 等人[41,42]提出了不

引用格式: 何兰芳, 胡修棉, 查亚兵, 等. 藏南罗布莎蛇绿岩高磁异常分布特征与成因. 科学通报, 2014, 59: 960–969
英文版见: He L F, Hu X M, Zha Y B, et al. Distribution and origin of high magnetic anomalies at Luobusa Ophiolite in Southern Tibet. Chin Sci Bull, 2014, 59, doi: 10.1007/s11434-014-0330-6

同期次岩石(方辉橄榄岩)-熔体(母岩浆)反应的模式来解释罗布莎蛇绿岩铬铁矿成因, Ren 等人[45]也认为罗布莎蛇绿岩中的地幔橄榄岩和铬铁矿等均形成于俯冲带上的浅部地幔环境. Yang 等人[46]研究发现, 铬铁矿中陆续发现呈斯石英假象的柯石英、锇铱矿中的金刚石包裹体及自然铁等系列异常地幔矿物, 地幔橄榄岩中也发现大量金刚石及系列异常地幔矿物, 表明了地幔岩和铬铁矿可能形成于地幔深部, 进而提出了罗布莎地幔岩和铬铁矿的地幔柱和深部地幔成因模式[33,34]. 对雅鲁藏布江蛇绿岩的侵位机制, 被广泛认同的模式是特提斯型仰冲就位模式[33,34].

20 世纪 70 年代初和 90 年代末的两次航磁调查, 姚正煦等人[16]发现了由北、南 2 条异常带平行构成的规模巨大的雅鲁藏布江高磁异常带, 它自西向东延伸达 1400 km. 罗布莎高磁异常带位于雅鲁藏布江高磁异常带东段北带, 在 1969~1972 年西藏中部航磁测量中, 航高在 2000~3000 m 之间, 异常宽约 6 km, 2000 年在矿区上空 1000 m 高度磁测时, 异常宽度仅 2 km[16]. 为了探析罗布莎高磁异常的分布特征和成因, 我们分析了 2012 年的地面磁法观测结果, 测定 11 个钻孔的磁化率, 对罗布莎的反演磁化率进行三维成像分析. 同时, 对 17 个样品进行了磁化率测定、显微镜下分析和扫描电子显微镜分析, 从矿物特征方面初步分析了罗布莎高磁异常的成因.

1 罗布莎地面高精度磁法勘探

2012 年在罗布莎开展了覆盖整个岩体的、系统的地面高精度磁法勘探工作, 对岩体的磁异常分布特征有了整体的认识. 数据采集采用 G-858 磁力仪, 测网分 40 m×20 m 和 80 m×20 m 两种, 测点定位采用天宝-5700 测量系统, 磁法勘探观测精度小于 0.7 nT. 图 2(a) 为罗布莎岩体ΔT 化极磁异常分布图(局部), 从图中可以看出, 平面分布上, 超过 60%超基性岩体分布区磁异常小于 100 nT. 磁异常高于 500 nT 的超基性岩体分布区仅占 10%, 而且主要分布在研究区的南部, 宽度 100~400 m, 约占岩体宽度的 7%~28%. 对研究区内观测的磁法数据采用三维磁法物性层离快速反演法进行反演, 这种方法将快速迭代反演与约束反演相结合, 先对重磁数据进行网格剖分, 再转换为正方形节点网格, 对下半空间的剖分并进行标准格架快速正演计算与存储, 对架中心柱体计算点的格架系数求取平方根, 获得面元反演系数数组, 通

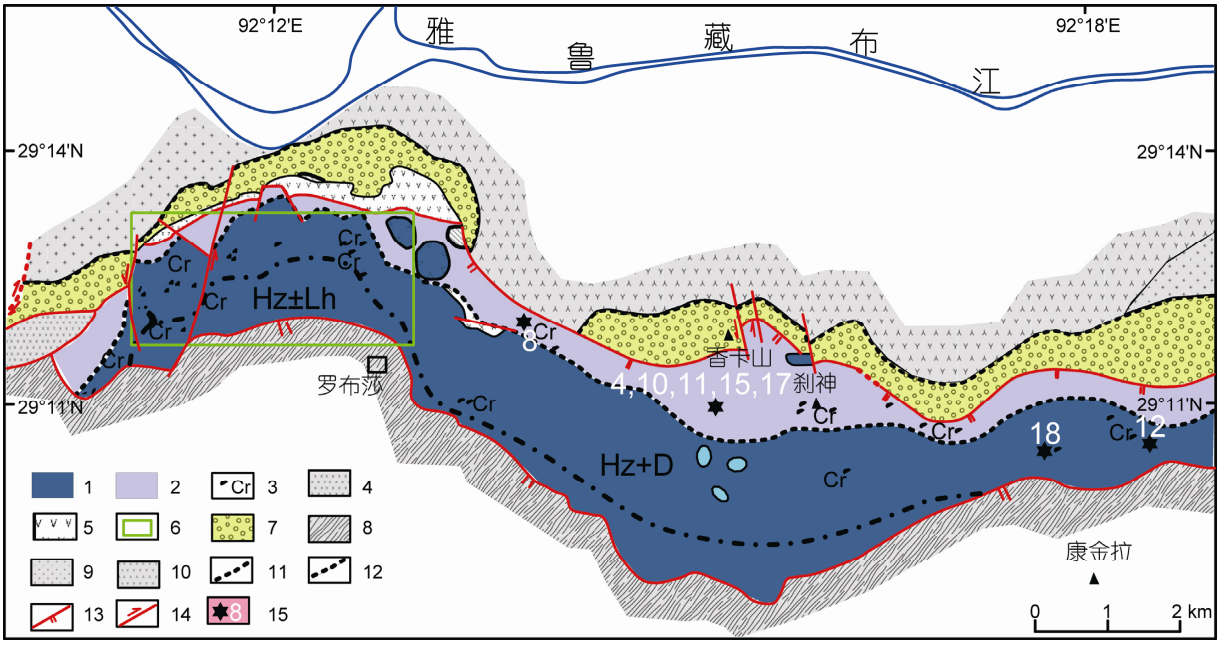

图 1 罗布莎蛇绿岩地质简图 (修改自李金阳等人[33])

1, 方辉橄榄岩(含纯橄岩和二辉橄榄岩); 2, 纯橄岩; 3, 铬铁矿体; 4, 辉长岩为主的堆晶岩; 5, 辉长岩异剥橄榄岩和辉石岩组成的堆晶岩; 6, 地面高精度磁测范围; 7, 第三系罗布莎群; 8, 上三叠统地层; 9, 石英闪长岩, 石英二长岩; 10, 黑云母花岗岩; 11, 岩相界线; 12, 不整合接触界线; 13, 逆断层; 14, (走滑)断层; 15, 分析样品采样位置及编号

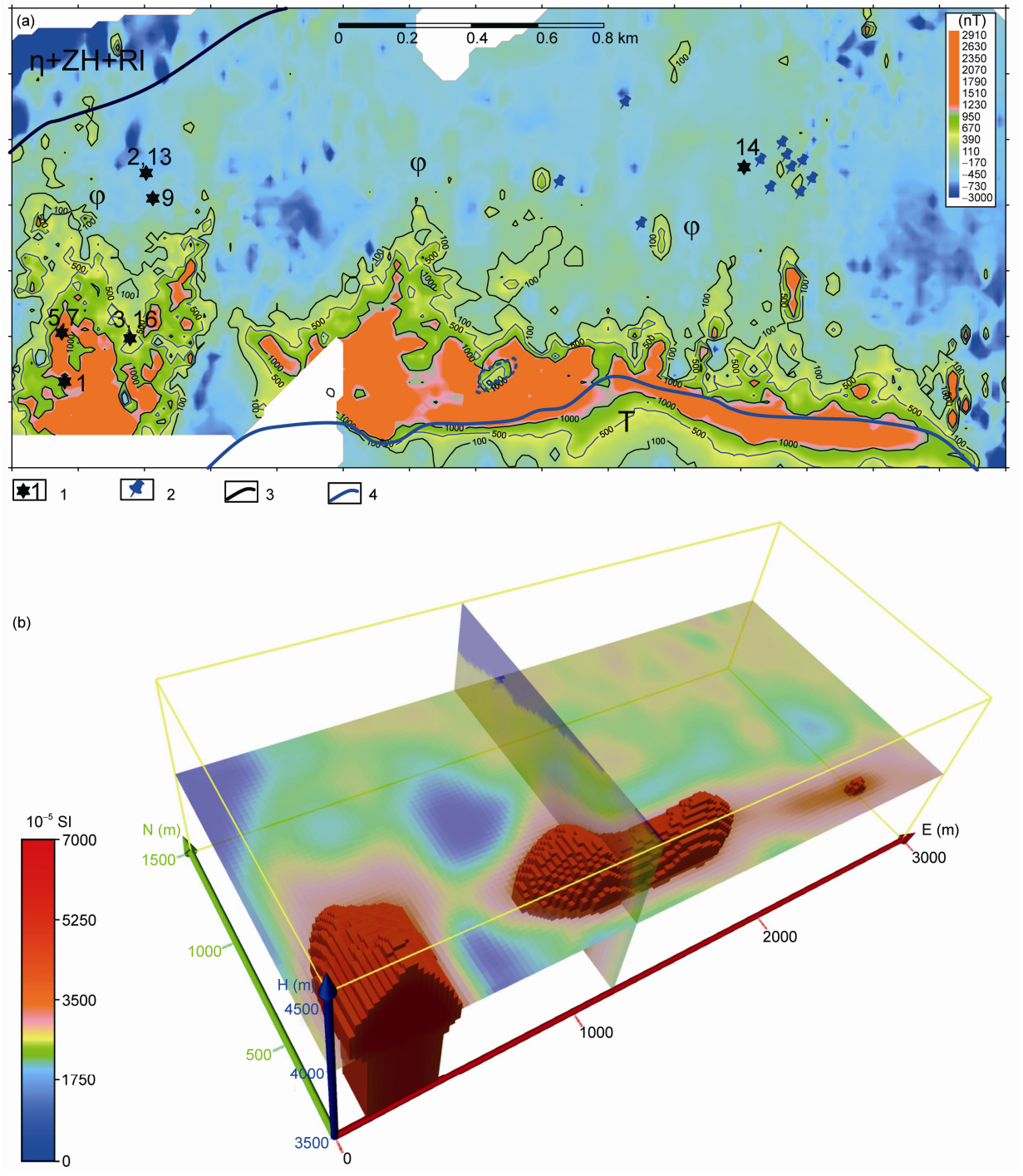

图 2 罗布莎岩体磁异常分布图

(a) ΔT 化极磁异常分布图; (b) 反演三维磁化率分布图. 1, 分析样品采样位置及编号; 2, 实测岩芯钻孔位置; 3, 三叠系(T)、罗布莎蛇绿岩(φ)地表接触带(断层位置); 4, 辉石岩、杂岩、砾岩(η+ZH +RL)和罗布莎蛇绿岩(φ)地表接触带

过快速外推的外扩计算获得平面重磁异常分离后三维重磁异常数据体, 进行反演物性数值区间约束和场级约束, 再正演得到高精度的反演模型[47]. 其主要算法包括标准几何格架系数三维正演、重磁异常层离法分离、异常等级约束快速反演. 为克服下半空间几何格架对于不同的测点存在计算量不一致的问题,

采用了标准几何格架概念, 在三维重磁反演中建立一个标准几何格架体, 不同测点正演时均采用该标准几何格架体, 使不同的测点磁力正演的立体角彼此一致. 我们建立的标准模型几何格架, 其水平范围大小及深度范围的规定与反演深度有关. 三维反演的具体算法参见文献[47~50]. 图 2(b)为依据观测磁异常反演磁化率三维影像图, 显示高磁异常不仅在平面分布范围有限, 在空间同样分布在宽度 100~400 m、厚度 100~300 m 的三维空间范围内, 同样说明了超基性岩体内磁化率异常分布极不均匀.

2 岩芯和样品磁化率测试

实测了罗布莎矿区 11 个钻孔 1558 块样品的磁化率(岩芯磁化率测试由中国航遥生产的 ZH-1 磁化率仪完成), 钻孔位置如图 2 所示. 由于钻孔钻遇的罗布莎岩体主要为斜辉辉橄岩和纯橄岩 2 类, 为突出蛇纹石化对磁化率的影响, 本次在岩芯岩性统计时将蛇纹石化岩芯(包括蛇纹石化斜辉辉橄岩和蛇纹石化纯橄岩)单独归为一类. 1558 块样品共分为斜辉辉橄岩(含角砾和蚀变岩石)、纯橄岩(含角砾和蚀变岩石)、蛇纹石化岩芯、铬铁矿 4 类, 辉绿岩共 2 块, 不参与统计. 需要特别指出, 罗布莎岩体的所有岩芯几乎都存在不同程度的蛇纹石化, 这里列出的蛇纹石化指的是肉眼能辨认蛇纹石化相对明显的一类岩芯. 表 1 列出按岩性分类的磁化率分布特征, 其中蛇纹石化岩芯的平均磁化率为 2654×10^{-5} SI (本文中以下省略, 除特别注明, 磁化率单位均为 10^{-5} SI), 高出其他岩类 5 倍以上. 测量结果还表明, 纯橄岩类磁化率大于 1000 的样品约占总样品数的 8%, 斜辉辉橄岩类磁化率大于 1000 的样品约占总样品数的 2.3%, 铬铁矿样品磁化率均小于 1000, 而蛇纹石岩类磁化率大于 1000 的样品占 94.2%, 表明组成岩体的主要岩类斜辉辉橄岩和纯橄岩磁化相对较低, 蛇纹石化岩芯磁化率相对较高. 表 2 列出了岩芯磁化率的分布特征, 结果表明, 磁化率低于 100 的占 8%, 100~500 占 64%; 500~1000 占 17%, 大于 1000 的占 11%. 图 3 为 3 口钻孔岩芯的磁化率测量结果和岩性柱状图, 3 个钻孔均未钻穿超基性岩体. 该测量结果表明, 在岩体内部, 磁化率纵向变化较大, 从 30 变化到 32000. 另外, 实测了矿井的岩体的磁化率, 在较小的测量范围内(小于 50 cm)同样存在超过 30 倍的差异. 同时发现, 在两块直径 48 mm 的岩芯不同位置, 磁化率相差分别超过 30 倍(图 4(a))和 7 倍(图 4(b)).

为分析高磁异常的成因, 我们在岩体的不同位置采集了 17 块样品进行了密度测量、磁化率测量、显微薄片观察和扫描电子显微镜分析. 样品以岩芯为主, 岩石类型有纯橄岩、斜辉辉橄岩、橄榄岩、菱镁石、致密块状铬铁矿、星点状铬铁矿、豆状铬铁矿. 9 块样品采自罗布莎矿区(其中 5 块采自本次研究范围内的高磁异常带), 6 块样品采自香卡山矿区, 2 块样品采自康金拉矿区. 采样位置见图 1 和 2. 磁化率测量采用 ASC Scientific 公司 Kappabridges MFK1FA 磁化率测量系统, 电子探针分析使用南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室的 JXA-8100 型电子探针, 分析误差~200 ppm(1 ppm=1 μg g^{-1}, 余同). 表 3 为 17 块样品的磁化率和密度测量结果. 图 4 中的岩芯照片揭示了不同磁化率岩样的外观特征, 表明高磁化率和相对高磁化率岩芯(7 号, 82 号, 102 号)蛇纹石蚀变发育(7 号, 82 号)或暗色矿物含量相对偏高(102 号), 低磁化率样品岩性蛇纹石蚀变不发育(81 号, 9 号). 图 5 为罗布莎岩体内 17 块样品的磁化率和密度交汇图. 从图中可以看出, 纯橄岩磁化率范围变化最大, 其次为斜辉辉橄岩, 致密块状铬铁矿、菱镁矿磁化率变化范围较小. 图 6 为 3 块高磁化率样品

表 1 罗布莎岩体样品按岩性、磁化率分布统计表

岩性	蛇纹石化岩芯	斜辉辉橄岩	纯橄岩	铬铁矿	合计
磁化率($\times10^{-5}$ SI) 平均(最小–最大)	2654 (409~32021)	328 (33~2935)	469 (50~3072)	338 (228~537)	
样品数(块)	139	1176	228	13	1556

表 2 罗布莎岩体样品磁化率分布统计表

磁化率($\times10^{-5}$ SI)	10~100	10~500	500~1000	>1000	合计
样品数(块)	124	996	262	176	1558

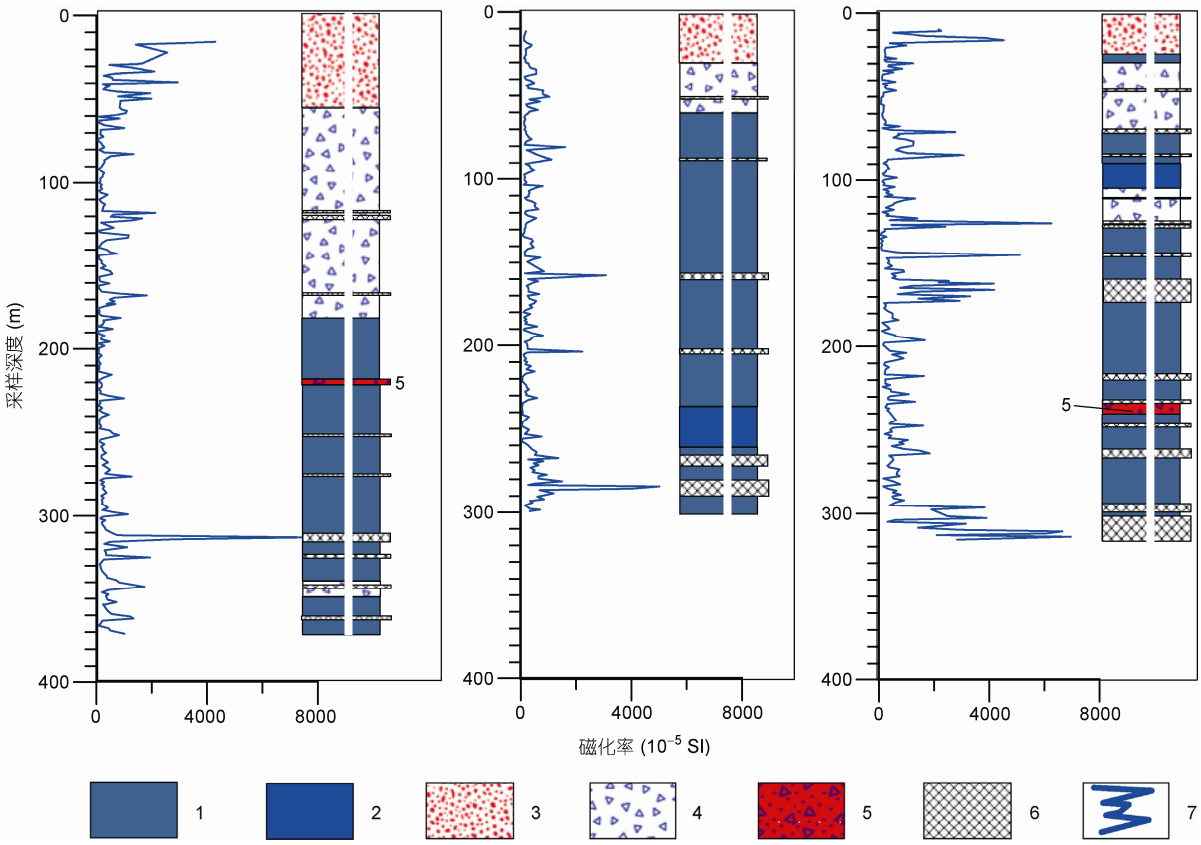

图 3 罗布莎岩体钻孔岩芯实测磁化率和岩性柱状图

1, 斜辉辉橄岩; 2, 纯橄岩; 3, 第四系坡积、残积物, 含超基性岩、辉绿岩转石; 4, 构造角砾岩, 主要由斜辉辉橄岩、纯橄岩组成; 5, 含铬铁矿岩层或矿层; 6, 肉眼可辨蛇纹石化岩类; 7, 实测磁化率曲线

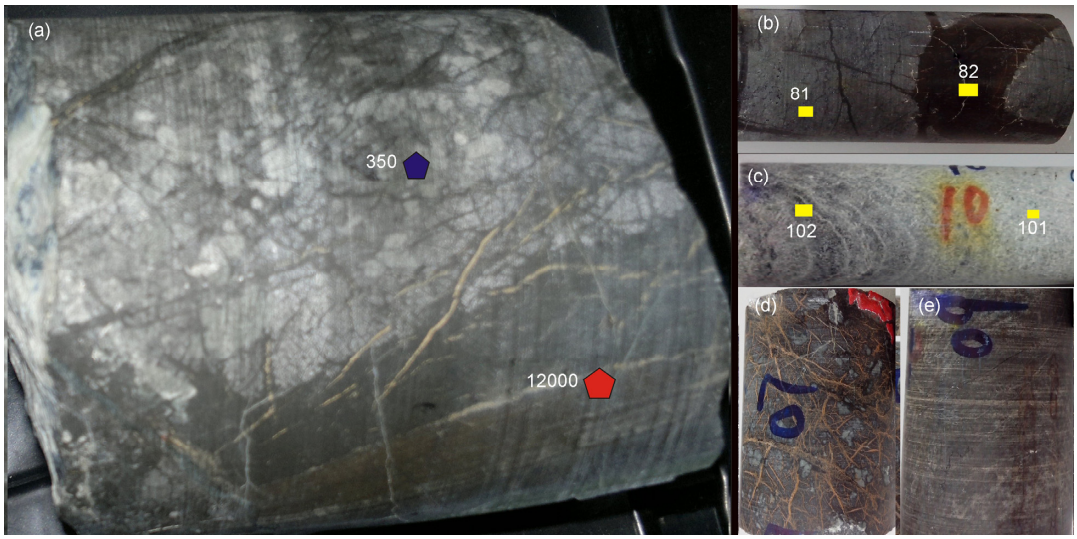

图 4 代表性岩芯照片

(a) 同一岩芯不同位置磁化率差异(图中标注数值为磁化率, 单位 10^{-5} SI); (b) 8 号样品不同试块(81, 82)取样位置; (c) 10 号样品(菱镁矿)不同试块(101, 102)取样位置; (d) 7 号样品, 蛇纹石化严重的纯橄岩; (e) 9 号样品, 新鲜纯橄岩. 岩性直径均为 48 mm

表 3　罗布莎岩体样品磁化率和密度测量结果 a)

样品编号	1	2	3	4	5	7	81	82	9	101
磁化率($\times10^{-5}$ SI)	3884	554	3924	2359	4649	8072	411	3422	576	109
密度(kg/m^3)	2744	2475	2777	2768	2375	2516	2913	2362	2322	2829
样品编号	102	11	12	13	14	15	16	17	18	
磁化率($\times10^{-5}$ SI)	546	1809	240	1234	339	1725	761	2150	1729	
密度(kg/m^3)	2730	2942	3590	2375	4047	2807	4091	2515	2700	

a) 81, 82, 101, 102 分别是 8 号、10 号样品不同位置试块的测量结果

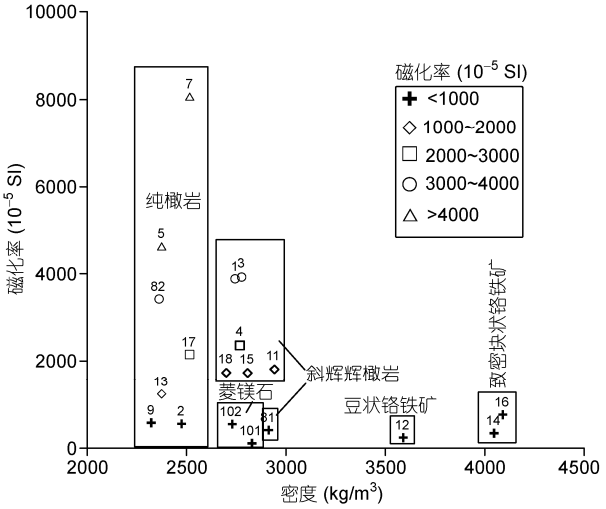

图 5　样品实测磁化率和密度交汇图

图中数字为样品编号

(7 号, 5 号, 3 号)和 3 块低磁化率样品(2 号, 9 号, 12 号)的显微照片, 3 块高磁异常样品微裂隙发育, 裂隙中填充暗色矿物; 3 块相对低磁化率样品中微裂隙不发育, 但含有块状暗色矿物. 罗布莎蛇绿岩样品暗色矿物及围岩电子探针化学成分结果(表4)表明, 微裂隙中填充的暗色矿物主要为磁铁矿, 粒状暗色矿物主要为铬尖晶石. 在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室 JXA-8100 型电子探针扫描电子显微镜分析同时发现, 铬尖晶石矿物的周边包裹了厚约 2~20 μm 的磁铁矿, 在铬尖晶石的微裂缝中也充填了磁铁矿(图 7).

3　讨论

3.1　罗布莎岩体磁异常及磁化率的影响因素

绝大多数磁法测量都在地表进行, 观测磁场随

表 4　罗布莎蛇绿岩样品暗色矿物及围岩石化学成分电子探针分析结果(wt%)[a)]

样品号	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Cr_2O_3	FeO	MnO	ZnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	NiO	V_2O_3	总计
2~3 (铬尖晶石)	0.02	0.19	11.42	55.54	19.63	0.28	0.06	11.86	–	0.04	0.02	0.07	0.05	99.16
2~6 (橄榄石)	41.16	–	–	–	5.39	0.07	–	52.87	0.07	0.05	0.05	0.23	0.05	99.95
3~1 (铬尖晶石)	–	0.08	11.10	55.38	24.03	0.29	–	8.21	–	0.02	0.01	0.04	0.02	99.19
3~5 (磁铁矿)	0.07	0.02	0.02	BL	91.40	0.07	0.05	0.19	–	0.03	–	–	0.02	91.87
3~7 (橄榄石)	41.17	BL	BL	–	7.47	0.12	–	51.68	0.03	0.03	–	0.18	0.03	100.71
5~1 (磁铁矿)	0.03	0.05	0.03	0.05	89.94	0.04	0.03	0.08	–	–	–	BL	–	90.25
5~2 (含铬磁铁矿)	1.23	0.14	2.55	22.18	64.22	2.03	0.14	1.75	–	–	–	–	0.03	94.26
5~3 (磁铁矿)	0.02	–	–	0.00	90.20	0.06	0.09	0.08	–	–	–	–	–	90.44
7~2 (磁铁矿)	0.02	0.05	BL	0.02	90.63	0.04	0.02	0.08	–	–	–	–	BL	90.87
7~3 (磁铁矿)	0.03	0.02	BL	0.06	90.37	0.07	–	0.14	–	–	–	–	–	90.69
9~1 (铬尖晶石)	0.01	0.20	2.60	56.78	33.61	0.49	–	4.70	BL	–	0.02	0.02	0.02	98.46
9~5 (磁铁矿)	0.05	0.04	0.38	7.10	85.71	–	–	0.30	–	0.07	0.02	BL	BL	93.68
9~6 (铬尖晶石)	0.04	0.26	12.36	54.03	20.75	0.27	0.02	11.47	0.03	0.07	0.03	0.09	BL	99.41
12~1 (铬尖晶石)	0.03	0.16	11.90	58.09	14.60	0.17	–	15.09	–	–	–	0.04	–	100.08
12~2 (铬尖晶石)	0.05	0.18	11.91	57.19	14.20	0.17	–	15.24	–	–	–	0.04	0.02	99.00
12~3 (橄榄石)	40.71	–	BL	0.03	2.80	0.03	–	55.55	–	–	–	0.20	BL	99.32

a) 样品位置见图 6, BL 表示测量数据低于检测限, "–"表示没有检测到数据

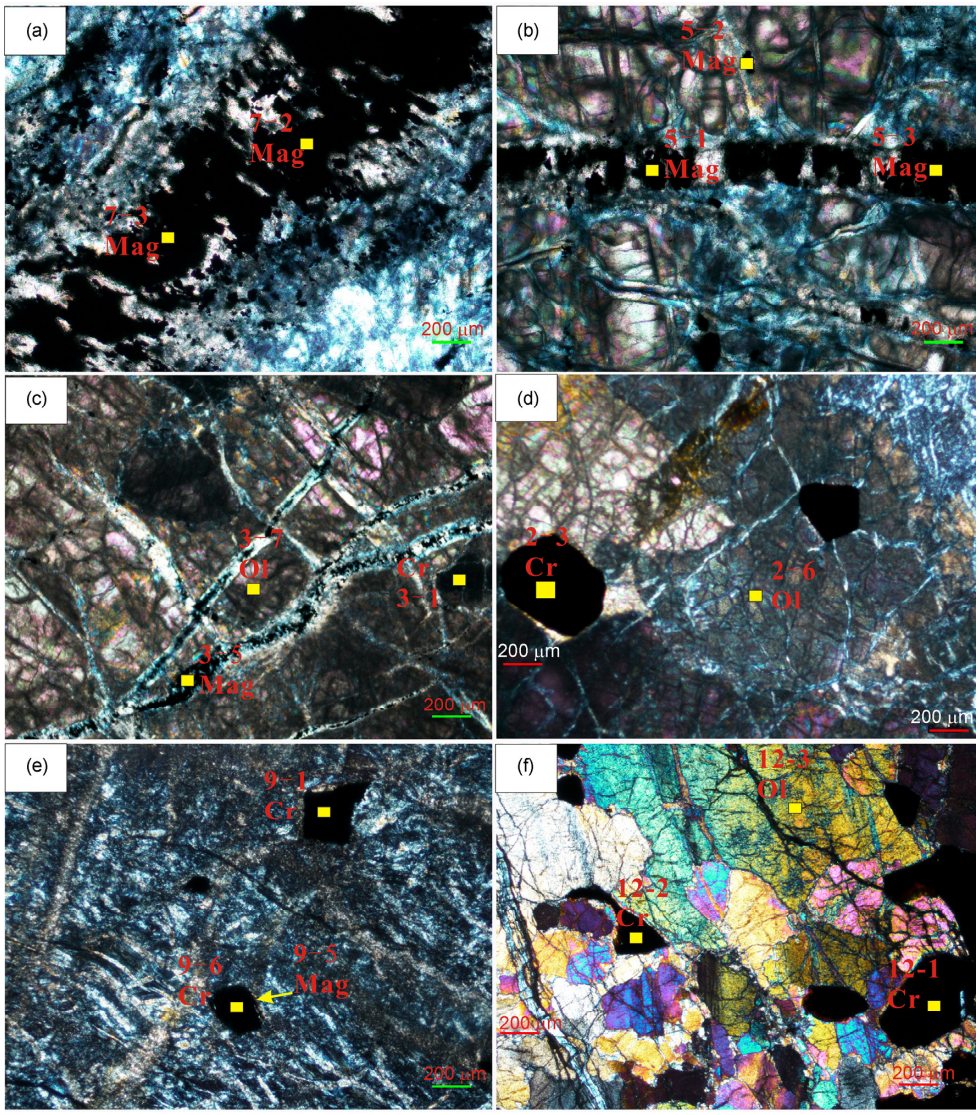

图 6 罗布莎岩体岩样显微结构照片

(a) 7 号样品; (b) 5 号样品; (c) 3 号样品; (d) 2 号样品; (e) 9 号样品; (f) 12 号样品; Cr, 铬铁矿; Mag, 磁铁矿; Ol, 橄榄石

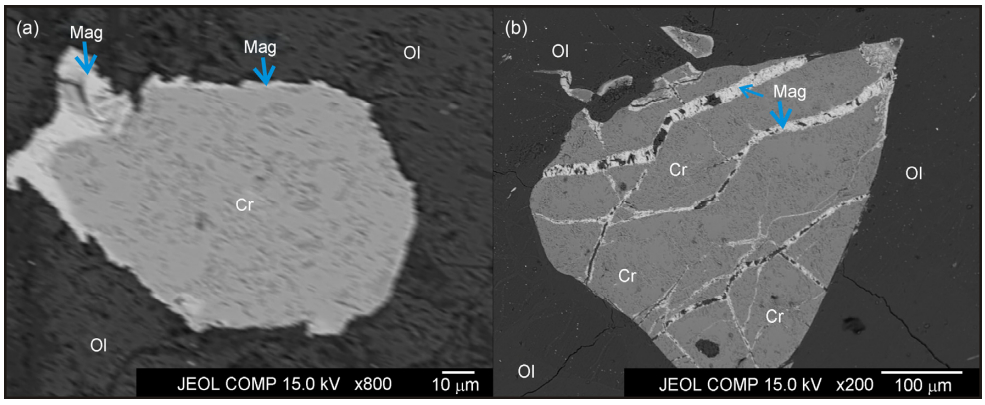

图 7 电子探针揭示的铬尖晶石和磁铁矿的接触关系

(a) 周边包裹; (b) 微裂缝中充填

着地表位置的变化而变化. 除少量剩磁岩体发育的地区, 大多数观测磁场异常为感应磁场(感磁)异常. 它的强度等于地磁场强度与磁化率的乘积, 如式(1)[51]:

$$I = kF, \tag{1}$$

式中, I 为感应磁场异常, k 为体积磁化率, F 为地磁场强度.

在一个较小的区域内(例如, 小于 10 km^2), 可以认为, 地磁场的强度和剩磁的影响相对不变, 感磁的强度变化反映了岩体综合磁化率的变化. 因而, 一定区域高磁异常对应该区域内岩体的磁化率异常. 研究岩石的磁化率分布特征与成因可以从本质上揭示一定区域的高磁异常成因. 本次研究区面积仅 2.8 km^2, 绝大部分位于罗布莎岩体内部, 因而在分析罗布莎高磁异常成因时, 我们认为罗布莎岩体内不同部分磁化率的变化是导致观测磁异常变化的主要原因.

研究表明, 矿物的磁化率及其体积(质量)百分含量是岩石磁化率的主要影响因素[28,51]. 岩石中的橄榄石、辉石、云母等矿物尽管都有含铁的成分, 但均为顺磁性矿物, 作为岩石中的铁磁性矿物, 只有铁-钛氧化物[28~32]. 对于绝大多数岩石而言, 铁氧化物(磁铁矿、赤铁矿)的含量和分布决定了岩石的磁性特征[28,52~54]. 岩石物理试验结果表明, 磁铁矿含量达1%的岩石磁化率会比不含磁铁矿的大多数岩石的磁化率高出 1000 倍以上[51]. 罗布莎岩体主要包含纯橄岩、斜辉辉橄岩、橄榄岩、铬铁矿等岩石组成. 主要矿物有辉石、橄榄石、铬铁矿、磁铁矿等, 依据文献[30]给出的超基性岩中主要矿物的质量磁化率, 按平均密度(橄榄石 2700, 辉石 3200, 磁铁矿 4000 kg/m^3)估算后的磁化率分别为橄榄石 2.7~351, 辉石 16~320, 磁铁矿 200000. 文献[30]没有给出铬铁矿的磁化率, 依据本次实测的结果, 致密块状铬铁矿的磁化率为200~800. 上述表明, 罗布莎蛇绿岩的主要造岩矿物橄榄石和辉石本身没有显著的高磁化率异常特征, 岩体中的铬铁矿也不具备高磁化率异常特征, 只有在岩体中的磁铁矿具有高磁化率异常特征. 据此, 我们认为岩体中的磁铁矿是影响罗布莎岩体磁化率变化的主要因素.

3.2 罗布莎岩体中磁铁矿成因及其与磁化率异常的对应关系

橄榄石中含铁端元蛇纹石化反应的产物之一是蛇纹岩磁铁矿[52~54]. 张浩勇和巴登珠[38]认为, 罗布莎岩体斜辉辉橄榄岩、二辉橄榄岩和蛇纹岩里都含有一定数量的磁铁矿, 从成因结果上都属于后期交代产物, 而不是原生的岩浆结晶矿物. 本次实测 14 个电子探针数据统计罗布莎岩体中磁铁矿 TiO_2 的平均含量仅为 0.03%, 依据文献[38]给出的 TiO_2-AL_2O_3-MgO 三元图解(TiO_2 低于~10%), 磁铁矿为后期交代磁铁矿. 图 6 中的显微照片(a, b, c)表明磁铁矿主要分布在岩石的裂隙中, 电子探针照片(图 7)表明新鲜岩石中磁铁矿主要分布在铬尖晶石与围岩的接触带上. 这进一步说明了岩体中的磁铁矿具有交代矿物的特征.

6 个样品的显微照片结果(图 6)和电子探针分析结果(表3)粗略地表明样品的磁化率异常与磁铁矿分布的对应关系: 7 号、5 号和 3 号磁化率高于 3000, 显微照片结果表明, 这 3 块样品中均发育了大量的微裂隙, 而且裂隙中填充大量的磁铁矿. 显微照片同样显示, 从 7 号样品、5 号样品到 3 号样品的裂隙宽度和磁铁矿相对含量逐步变低, 相应地它们的磁化率也逐步变低(8072~4649~3923). 2 号、9 号、12 号样品的磁化率低于 600, 在 17 块样品中属于相对低磁化率, 显微照片结果表明, 这 3 块样品裂隙不发育, 仅在铬尖晶石的周边发育了伴生(12 号)的磁铁矿. 上述结果粗略表明, 罗布莎岩体中磁铁矿含量是决定岩体磁化率的变化.

3.3 罗布莎蛇绿岩高磁异常成因探析

受氧逸度等因素的控制, 新鲜的橄榄岩、斜辉辉橄岩、纯橄岩中基本上不含磁铁矿[55,56]. 本次地面磁测结果同样表明, 研究区内罗布莎蛇绿岩仅有约10%的分布区ΔT 化极磁异常大于 500 nT, 超过 60%的岩体分布区磁异常小于 100 nT, 表现为相对弱磁性. 岩芯测深和样品分析, 超过 70 的岩芯和样品的磁化率低于 500. 显然, 将罗布莎高磁异常笼统地解释为超铁镁岩体的存在是不合适的. 地面磁测结果揭示罗布莎高磁异常主要分布在超基性岩与沉积地层的构造接触部位, 这里受到断层构造和其他地质活动的影响较大. 断裂构造一方面破坏了超基性岩体的完整性, 同时又为地下水的侵入提供了通道. 板块之间的挤压等地质活动为岩体的蚀变提供了热源. 在这些条件的综合作用下, 推测接触带附近的岩体发生了不同程度的蛇纹石化. 我们认为, 蛇绿岩体中

的橄榄岩发生的蛇纹石化并析出磁铁矿是罗布莎高磁异常的主要成因.

4 结论

虽然罗布莎高磁异常在航磁成果上表现为整体高磁异常, 但在岩体上进行的地面高精度磁测和岩体内部岩芯磁化率测试结果表明高磁异常在超基性岩体的分布并不均匀. 罗布莎高磁异常带主要分布在蛇绿岩体和沉积地层的接触部位. 三维磁化率成像结果显示高磁异常的核心埋深为 200~400 m, 属于浅源异常. 样品和岩芯分析结果表明, 高磁化率异常岩芯在外观上表现为蛇纹石化相对发育, 显微镜下分析发现高磁化率样品内发育了大量的被暗色矿物填充的微裂隙, 电子探针分析结果认定填充的暗色矿物主要为磁铁矿. 由于高磁化率异常带岩芯和相对低磁化率主要成分差异为磁铁矿含量的差异, 蛇绿岩中的橄榄岩在蛇纹石化过程中会析出磁铁矿并且磁铁矿的含量和分布决定岩体的磁异常特征. 据此, 我们初步认定: 地质作用特别是构造运动引起岩体橄榄岩蚀变和蛇纹石化并析出磁铁矿是罗布莎高磁异常的主要成因.

致谢 南京大学陈立辉教授、张文兰教授、安慰博士、徐耀明博士, 中国科学院地质与地球物理研究所王建刚博士, 中南大学陈儒军教授、崔宇硕士、东方地球物理公司高级工程师刘云祥、宋景明、戴和强等人在样品分析、测试、数据分析中提供了大量的帮助, 在此一并表示感谢.

参考文献

1 Reeves C. The first magnetic anolmaly map of the world. Lead Edge, 2008, 27: 32–33
2 Varne R, Gee R D, Quilty P G. Macquarie Island and the cause of oceanic linear magnetic anomalies. Science, 1969, 166: 230–232
3 刘庆生, 高山, 郑建平. 大陆地壳磁性结构研究及其意义. 科学通报, 1998, 43: 1246–1252
4 张昌达. 岩石圈磁场模型及其应用. 物探与化探, 2013, 37: 1–10
5 Vaughan A P, Wareham C D, Johnson A C, et al. A Lower Cretaceous, syn-extensional magmatic source for a linear belt of positive magnetic anomalies: The Pacific Margin Anomaly (PMA), western Palmer Land, Antarctica. Earth Planet Sci Lett, 1998, 158: 143–155
6 Liang R C, Pei Y L, Zhang Y P, et al. Gravity and magnetic field and tectonic structure character in the southern Yellow Sea. Chin Sci Bull, 2003, 48 (Suppl): 64–73
7 Li C F, Zhou Z Y, Hao H J, et al. Late Mesozoic tectonic structure and evolution along the present-day northeastern South China Sea continental margin. J Asian Earth Sci, 2008, 31: 546–561
8 Gorodnitskiy A M, Brusilovskiy Y V, Ivanenko A N, et al. New methods for processing and interpreting marine magnetic anomalies: Application to structure, oil and gas exploration, Kuril forearc, Barents and Caspian seas. Geosci Front, 2013, 4: 73–75
9 Abedi M, Gholami A, Norouzi G H. A stable downward continuation of airborne magnetic data: A case study for mineral prospectivity mapping in Central Iran. Comput Geosci, 2013, 52: 269–280
10 Pilkington M, Saltus R W. The Mackenzie River magnetic anomaly, Yukon and Northwest Territories, Canada-Evidence for Early Proterozoic magmatic arc crust at the edge of the North American craton. Tectonophysics, 2009, 478: 78–86
11 Surinach E, Galindo-zaldivar J, Maldonado A. Large amplitude magnetic anomalies in the northern sector of the Powell Basin, NE Antarctic peninsula. Mar Geophys Res, 1997, 19: 65–80
12 康国发, 高国明, 白春华, 等. 青藏高原及邻区的地壳磁异常特征与区域构造. 中国科学: 地球科学, 2011, 41: 1577–1585
13 李春峰, 宋陶然. 南海新生代洋壳扩张与深部演化的磁异常记录. 科学通报, 2012, 57: 1879–1895
14 Wang P X. Tracing the life history of a marginal Sea–On the "South China Sea Deep" Research Program. Chin Sci Bull, 2012, 57: 3093–3114
15 Mishra D C, Kumar V V, Rajasekhar R P. Analysis of airborne magnetic and gravity anomalies of peninsular shield, India integrated with seismic and magnetotelluric results and gravity anomalies of Madagascar, Sri Lanka and East Antarctica. Gondwana Res, 2006, 10: 6–17
16 姚正煦, 周伏洪, 薛典军, 等. 雅鲁藏布江航磁异常带性质及其意义. 物探与化探, 2001, 25: 241–252
17 Rybakov M, Goldshmidt V, Hall J K, et al. New insights into the sources of magnetic anomalies in the Levant. Russ Geol Geophys, 2011, 52: 377–397
18 Kostadinoff J, Bjerg E A, Gregori D, et al. Magnetic and gravity anomalies in the Sierra del Padre and Sierra del Tala, San Luis Province, Argentina: Evidence of buried mafic-ultramafic rocks. J South Am Earth Sci, 2001, 14: 271–276
19 Quesnel Y, Weckmann U, Ritter O, et al. Simple models for the Beattie magnetic anomaly in South Africa. Tectonophysics, 2009, 478: 111–118

20 Molnar P, Atwater T, Mammerickx J, et al. Magnetic anomalies, bathymetry and the tectonic evolution of the south Pacific since the late Cretaceous. Geophys J Res, 1975, 40: 383–420
21 胡登科, 周蒂, 吴湘杰, 等. 南海东北部高磁异常带成因的地球物理反演研究. 热带海洋学报, 2008, 27: 32–37
22 何碧竹, 焦存礼, 蔡志慧, 等. 塔里木盆地中部航磁异常带新解译. 中国地质, 2011, 38: 961–969
23 郎元强, 胡大千, 刘畅, 等. 南海北部陆区岩石磁化率的矿物学研究. 地球物理学报, 2011, 54: 573–587
24 Butler R F, Banerjee S K, Stout J H. Magnetic properties of oceanic pillow basalts: Evidence from Macquarie Island. Geophys J Int, 1976, 47: 179–196
25 McEnroe S A, Langenhorst F, Robinson P, et al. What is magnetic in the lower crust? Earth Planet Sci Lett, 2004, 226: 175–192
26 Piper J D, Mallik S B, Bandyopadhyay G. Palaeomagnetic and rock magnetic study of a deeply exposed continental section in the Charnockite Belt of southern India: Implications to crustal magnetisation and palaeoproterozoic continental nuclei. Precambrian Res, 2003, 121: 185–219
27 徐海军, 金振民, 欧新功. 超高压榴辉岩退变质作用对岩石磁化率的影响. 地球科学, 2004, 29: 674–684
28 上田诚也, 水谷仁, 著. 刘育燕, 译. 岩石的磁性. 地质科技情报, 1984, 3: 81–85
29 Zhou L P, Oldfield F, Wintle A G. Partly pedogenic origin of magnetic variations in Chinese Loess. Nature, 1990, 346: 737–739
30 王建, 刘泽纯, 姜文英, 等. 磁化率与粒度、矿物的关系及其古环境意义. 地理学报, 1996, 51: 155–163
31 姜月华, 殷鸿福, 王润华. 环境磁学理论、方法和研究进展. 地球学报, 2004, 25: 357–362
32 田莉丽, 邓成龙. 岩石的磁学性质. 地球物理学进展, 2001, 16: 109–117
33 李金阳, 杨经绥, 巴登珠, 等. 西藏罗布莎蛇绿岩中不同产出的纯橄岩及成因探讨. 岩石学报, 2012, 28: 1829–1845
34 梁凤华, 许志琴, 巴登珠, 等. 西藏罗布莎-泽当蛇绿岩体的构造产出与侵位机制探讨. 岩石学报, 2011, 27: 3255–3268
35 白文吉, 周美付, 方青松, 等. 西藏罗布莎金刚石及伴生矿物. 北京: 地震出版社, 2000. 98
36 白文吉, 方青松, 张仲明, 等. 西藏雅鲁藏布江蛇绿岩带罗布莎地幔橄榄岩的成因. 岩石矿物学杂志, 1999, 18: 193–216
37 白文吉, 杨经绥, 方青松, 等. 寻找超高压地幔矿物的储存库——豆荚状铬铁矿. 地学前缘, 2001, 8: 111–121
38 张浩勇, 巴登珠, 郭铁鹰, 等. 西藏自治区曲松县罗布莎铬铁矿床研究. 拉萨: 西藏人民出版社, 1996. 181
39 王希斌, 鲍佩声. 豆荚状铬铁矿床的成因——以西藏自治区罗布莎铬铁矿床为例. 地质学报, 1987, 61: 166–181
40 王希斌, 周详, 郝梓国. 西藏罗布莎铬铁矿床的进一步找矿意见和建议. 地质通报, 2010, 29: 105–114
41 Zhou M F, Robinson P T, Malpas J, et al. Podiform chromitites in the Luobusa Ophiolite (SouthernTibet): Implications for melt–rock interaction and chromite segregation in the upper mantle. J Petrol, 1996, 37: 3–21
42 Zhou M F, Robinson P T, Malpas J, et al. REE and PGE geochemical constraints on the formation of dunites in the Luobusa Ophiolite, Southern Tibet. J Petrol, 2005, 46: 615–639
43 周肃, 莫宣学, Mahney J J, 等. 西藏罗布莎蛇绿岩中辉长辉绿岩 Sm-Nd 定年及 Pb, Nd 同位素特征. 科学通报, 2001, 46: 1387–1390
44 李德威. 西藏罗布莎豆荚状铬铁矿成矿演化的构造过程. 现代地质, 1995, 9: 450–458
45 Ren Y F, Chen F Y, Yang J S, et al. Exsolutions of diopside and magnetite in olivine from mantle dunite, Luobusa Ophiolite, Tibet, China. Acta Geol Sin, 2008, 82: 377–384
46 Yang J S, Dobrzhinetskaya L, Bai W J, et al. Diamond-and coesite-bearing chromitites from the Luobusa ophiolite, Tibet. Geology, 2007, 35: 875–878
47 刘云祥. 基于标准格架的快速三维重力、磁力物性反演的方法. 中国专利. ZL200810119467.2
48 姚长利, 郑元满, 张聿文. 重磁异常三维物性反演随机子域法方法技术. 地球物理学报, 2007, 50: 1576–1583
49 姚长利. 重磁遗传算法三维反演中高速计算及有效存储方法技术. 地球物理学报, 2003, 46: 252–258
50 Liu Y X, Si H L, Lu Y X, et al. 3D rapid gravity stripping inversion and its application. In: 71st EAGE Conference & Exhibition-Amsterdam, The Netherlands, 8-11 June 2009
51 Griffin R H. Geophysical Exploration for Engineering and Environmental Investigations. U.S. Army Corps of Engineers. 1995
52 Harrison R J, Dunin-Borkowski R E, Putnis A. Direct imaging of nanoscale magnetic interactions in minerals. Proc Natl Acad Sci USA, 2002, 99: 16556–16561
53 Onyracocne A C. Alteration of chromite from the twin sisters dunite, Washington. Am Mineral, 1974, 59: 608–612
54 汪小妹, 曾志刚, 欧阳荷根, 等. 大洋橄榄岩的蛇纹岩石化研究进展评述. 地球科学进展, 2010, 25: 605–616
55 Ballhaus C, Berry R F, Green D H. Oxygen fugacity controls in the Earth's upper mantle. Nature, 1990, 348: 437–440
56 刘丛强, 李和平, 黄智龙, 等. 地幔氧逸度的研究进展. 地学前缘, 2001, 8: 73–82