

博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

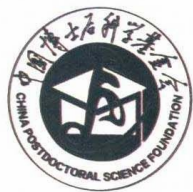
基于遥感与伽马能谱的 月球化学和岩性分析

王贤敏 编著

4



科学出版社



博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

基于遥感与伽马能谱的 月球化学和岩性分析

王贤敏 编著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书重点从月球化学成分含量分布与月球岩性分析两个相互关联的方面进行介绍,探讨相关地质演化线索。全书共4章,第1章主要介绍采用“嫦娥二号”伽马射线谱仪数据反演月表Th含量,分析壳幔内Th含量的分布特征和富Th物质的分布深度,探讨富Th物质月表出露机制;第2章主要介绍采用“嫦娥一号”干涉成像光谱仪数据反演月表主要氧化物含量,探讨月球高地地区的岩性特征;第3章主要介绍月球岩石的类型、源区、形成年代、化学成分和矿物特征;第4章主要根据Th含量和主要氧化物含量,揭示月球各岩套在月球表面和浅月表的分布特征,进而探讨相关的岩浆洋演化和地质线索。本书插图配彩图二维码,见封底。

本书可作为从事行星科学和遥感地质等领域工作的科研人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

基于遥感与伽马能谱的月球化学和岩性分析/王贤敏编著.—北京:科学出版社,2019.11

(博士后文库)

ISBN 978-7-03-062868-8

I.①基… II.①王… III.①月球-地球化学标志-研究 ②月球-岩相分析-研究 IV.①P184

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第242460号

责任编辑:何念 / 责任校对:刘畅

责任印制:彭超 / 封面设计:陈敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

开本: B5 (720×1000)

2019年11月第 一 版 印张: 12 1/4

2019年11月第一次印刷 字数: 245 000

定价: 118.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《博士后文库》编委会名单

主任：李静海

副主任：侯建国 李培林 夏文峰

秘书长：邱春雷

编委：（按姓氏笔划排序）

王明政 王复明 王恩东 池建 吴军 何基报

何雅玲 沈大立 沈建忠 张学 张建云 邵峰

罗文光 房建成 袁亚湘 聂建国 高会军 龚旗煌

谢建新 魏后凯

《博士后文库》序言

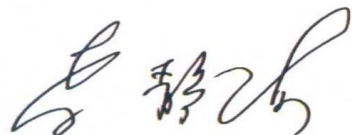
1985年，在李政道先生的倡议和邓小平同志的亲自关怀下，我国建立了博士后制度，同时设立了博士后科学基金。30多年来，在党和国家的高度重视下，在社会各方面的关心和支持下，博士后制度为我国培养了一大批青年高层次创新人才。在这一过程中，博士后科学基金发挥了不可替代的独特作用。

博士后科学基金是中国特色博士后制度的重要组成部分，专门用于资助博士后研究人员开展创新探索。博士后科学基金的资助，对正处于独立科研生涯起步阶段的博士后研究人员来说，适逢其时，有利于培养他们独立的科研人格、在选题方面的竞争意识以及负责的精神，是他们独立从事科研工作的“第一桶金”。尽管博士后科学基金资助金额不大，但对博士后青年创新人才的培养和激励作用不可估量。四两拨千斤，博士后科学基金有效地推动了博士后研究人员迅速成长为高水平的研究人才，“小基金发挥了大作用”。

在博士后科学基金的资助下，博士后研究人员的优秀学术成果不断涌现。2013年，为提高博士后科学基金的资助效益，中国博士后科学基金会联合科学出版社开展了博士后优秀学术专著出版资助工作，通过专家评审遴选出优秀的博士后学术著作，收入《博士后文库》，由博士后科学基金资助、科学出版社出版。我们希望，借此打造专属于博士后学术创新的旗舰图书品牌，激励博士后研究人员潜心科研，扎实治学，提升博士后优秀学术成果的社会影响力。

2015年，国务院办公厅印发了《关于改革完善博士后制度的意见》（国办发〔2015〕87号），将“实施自然科学、人文社会科学优秀博士后论著出版支持计划”作为“十三五”期间博士后工作的重要内容和提升博士后研究人员培养质量的重要手段，这更加凸显了出版资助工作的意义。我相信，我们提供的这个出版资助平台将对博士后研究人员激发创新智慧、凝聚创新力量发挥独特的作用，促使博士后研究人员的创新成果更好地服务于创新驱动发展战略和创新型国家的建设。

祝愿广大博士后研究人员在博士后科学基金的资助下早日成长为栋梁之才，为实现中华民族伟大复兴的中国梦做出更大的贡献。



中国博士后科学基金会理事长

前 言

随着地球环境的恶化和能源的逐渐枯竭，人类将视野转向了深空探测。月球是地球唯一的天然卫星，是距离地球最近的自然天体，因此成为人类进行太空探测的首选对象。首先，对月球的探测和研究，有助于揭示地月系统的起源和演化，揭示地球早期的演化历史。其次，月球蕴含丰富的资源，如核聚变燃料氦-3，以及钛铁矿、稀土、铀、钍、铝、钙、铬、镍、钠、镁、铜和硅等矿产资源，通过月球采矿返回，有望缓解地球的资源危机。此外，通过探测月球，建立月球前哨基地，为实施登陆火星计划做准备。

1959年苏联成功发射了第一个星际探测器月球1号和第一个在月表硬着陆的月球探测器月球2号，成功开启了人类探测月球的历程。从1958年美国 and 苏联启动探月计划至今，世界发达国家和航天技术大国先后开展月球探测计划，目前开展过月球探测活动的国家和地区有苏联、美国、日本、欧洲、中国、印度和以色列。月球探测工程作为我国一项战略性科技工程，被列为《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020年）》的十六个重大专项之一。

月球化学成分、岩性特征和相关演化历史的研究是月球探测的重要科学目标，是理解月球化学分布不均一性的核心科学问题，是揭示月球火山活动历史和天体撞击开掘作用的重要科学问题，也是重建月球岩浆洋模型的关键线索。然而，目前在月球化学成分和岩性特征方面仍存在一些关键问题具有争议或未有定论，限制了我们对月球演化历史的理解，包括：①作为月球重要的放射性产热元素Th，其在壳幔内的分布特征是什么？富Th物质在月亮内的分布深度是多少？富Th物质的月表出露机制是如何的？②月表的一些主要氧化物，如SiO₂、Al₂O₃、CaO、MgO等在月表的分布特征是什么？③广泛分布在斜长岩质高地地区的岩性是什么？为什么具有较高的Mg#（镁指数）？④镁质岩套的形成是否需要克里普物质的参与？早期镁质岩浆活动是全球现象还是仅局限于风暴洋克里普地体？⑤碱性岩套侵入的是月壳的浅层还是深处？碱性岩套在月表的哪些地区出露，出露机制是如何的？碱性岩套与镁质岩套是否存在岩石成因关系？⑥标志着古老月海玄武质火山活动的隐月海在哪？

本书围绕月球化学成分和岩性特征两个相关联的主题，探讨相关的月球地质演化历史，对上述目前存在争议的或尚未解决的关键科学问题给出结论或线索。本书的工作将机器学习算法引入月球科学领域，提高月表化学成分含量反演和岩性识别的精度，有望为相关的月球地质演化问题提供线索和依据。此外，本书研

研究工作采用的主要数据源包括“嫦娥一号”干涉成像光谱仪的高光谱遥感数据和“嫦娥二号”伽马射线谱仪的能谱数据，展示我国探月数据在月球遥感和月球地质领域的应用。本书旨在抛砖引玉，希望借此促进月球探测理论和技术的发展。

本书的研究工作得到中国博士后科学基金会和国家自然科学基金项目（项目编号：41372341）的资助。感谢中国科学院紫金山天文台吴昫昭研究员、中国地质大学（武汉）胡祥云教授和肖龙教授、中国科学院大学张渊智教授、吉林大学陈圣波教授对本书研究工作的指导和帮助。感谢中国地质大学（武汉）研究生仇登高、夏文祥、赵思源对本书中研究工作的贡献。本书参考和引用国内外学者的许多研究成果，在此向这些学者表示感谢。由于作者水平有限，书中难免有疏漏之处，恳请读者和学者批评指正。

王贤敏

2019年4月8日于武汉

本书涉及专业词汇中英文对照表

英文全称	英文简写	中文
alkali suite		碱性岩套
Alphonsus		阿方索
Antoniadi		安东尼亚迪
Apollo		阿波罗
Aristarchus		阿里斯塔克
Aristillus		阿里斯基尔
Autolycus		奥多利卡斯
basalt-rich, mafic breccias		玄武质角砾岩
Belkovich		别利科维奇
Birt		伯特
Bouguer		布格
Bullialdus		布利奥
Cauchy-5		柯西-5
Chandrayaan-1		“月船一号”
Chandrayaan-1 X-ray Spectrometer	C1XS	“月船一号” X 射线谱仪
Chang'e-1	CE-1	“嫦娥一号”
Chang'e-2	CE-2	“嫦娥二号”
Chang'e-3	CE-3	“嫦娥三号”
Chang'e-4	CE-4	“嫦娥四号”
Chang'e-5	CE-5	“嫦娥五号”
Clementine		克莱门汀
Compton		康普顿
Copernicus		哥白尼
dark mantling deposits		暗色月幔沉积
Decision Tree	DT	决策树
digital elevation model	DEM	数字高程模型
digital image model	DIM	数字影像模型

续表

英文全称	英文简写	中文
digital terrain model	DTM	数字地形模型
dimict breccias		双矿碎屑角砾岩
Diviner thermal infrared	Diviner TIR	预言家热红外
Dryden		德赖登
Feldspathic Highlands Terrane	FHT	斜长岩质高地地体
ferroan anorthosite		亚铁斜长岩套
ferroan anorthositic suite		亚铁斜长岩套
Fra Mauro		弗拉·毛罗
gamma ray spectrometer	GRS	伽马射线谱仪
gamma-ray and neutron spectrometers	GRNS	伽马射线谱仪和中子谱仪
Gauss		高斯
Gravity Recovery and Interior Laboratory	GRAIL	重力恢复和内部实验室
Grimaldi		格里马尔迪
Gruithuisen		格鲁伊图森
Hansteen Alpha		汉斯廷·阿尔法
High-Ca pyroxene	HCP	高钙辉石
high voltage level		高压电平
Highlands Radar Dark Terrane		高地雷达暗色地体
highly feldspathic (noritic and troctolitic), thorium-poor breccias		贫钍的高度斜长岩质(苏长岩质和橄长岩质)角砾岩
Imbrium Basin		雨海盆地
interference imaging spectrometer	IIM	干涉成像光谱仪
J. Herschel		约·赫歇尔
Kaguya		“月亮女神”
Kepler		开普勒

续表

英文全称	英文简写	中文
KREEP		克里普
KREEP basalt		克里普玄武岩
KREEP-Bearing Terrane		含克里普地体
largely unbrecciated mare basalts		(大部分非角砾的)月海玄武岩
Lassell		拉赛尔
Lavoisier		拉瓦锡
leave-one-out cross-validation	LOOCV	留一交叉验证
Leibnitz		莱布尼兹
less feldspathic (anorthositic norite and troctolite) breccias with little mare basalt		含少量月海玄武岩的弱长石质(钙长苏长岩和橄长岩)角砾岩
low-Ca pyroxene	LCP	低钙辉石
low-K Fra Mauro	LKFM	低钾弗拉·毛罗
Luna		月球号
Lunar Meteorite Compendium		月球陨石概略
lunar orbiter laser altimeter	LOLA	月球轨道飞行器激光高度计
Lunar Prospector	LP	月球勘探者
lunar reconnaissance orbiter	LRO	月球勘测轨道器
lunar reconnaissance orbiter camera	LROC	月球勘测轨道器相机
lunar soil characterization consortium	LSCC	月壤特征集
magnesian suite		镁质岩套
Mairan		梅蓝
majority analysis		主要分析
Mare Anguis		蛇海
Mare Australe		南海
mare basalt		月海玄武岩
Mare Cognitum		知海
Mare Crisium		危海

续表

英文全称	英文简写	中文
Mare Fecunditatis		丰富海
Mare Frigoris		冷海
Mare Humboldtianum		洪堡海
Mare Humorum		湿海
Mare Imbrium		雨海
Mare Ingenii		智海
Mare Insularum		岛海
Mare Marginis		界海
Mare Moscoviense		莫斯科海
Mare Nectaris		酒海
Mare Nubium		云海
Mare Orientale		东海
Mare Serenitatis		澄海
Mare Smythii		史密斯海
Mare Spumans		泡沫海
Mare Tranquillitatis		静海
Mare Undarum		浪海
Mare Vaporum		汽海
Marius Hills		马利厄斯丘陵
Mersenius		梅森
Messala		默萨拉
Mg-rich spinel		富镁尖晶石
Mg-spinel lithology		镁尖晶石岩
miniature radio frequency	Mini-RF	微型无线电频率
minimal description length principle	MDLP	最短描述长度原则

续表

英文全称	英文简写	中文
minimum noise fraction	MNF	最小噪声分离
monomict breccias		单矿碎屑角砾岩
Mons Rümker		吕姆克山
Montes Apenninus		亚平宁山脉
Montes Jura		侏罗山脉
moon mineralogy mapper	M3	月球矿物绘图仪
multiband imager	MI	多波段成像仪
Nearside Radar Dark Terrane	NRDT	月球正面雷达暗色地体
Oceanus Procellarum		风暴洋
Oppenheimer		奥本海默
optical maturity	OMAT	光学成熟度
Oriente Impact Basin Terrane	OT	东方盆地地体
partial least squares regression	PLSR	偏最小二乘回归
pink spinel anorthosite		粉红尖晶石钙长岩
Plato		柏拉图
Poincaré		庞加莱
polymict breccias		复矿碎屑角砾岩
probability density function	PDF	概率密度函数
Procellarum KREEP Terrane	PKT	风暴洋克里普地体
pyroclastic deposit		火山碎屑沉积
quality state		质量情况
quartz monzobiorite	QMD	石英二长闪长岩
radial basis function	RBF	径向基函数
rare earth element	REE	稀土元素
rille		月谷
root mean square error	RMSE	均方根误差

续表

英文全称	英文简写	中文
signal noise ratio	SNR	信噪比
Sinus Iridum		虹湾
small crater rim and ejecta probing	SCREP	小撞击坑边缘和溅射物探查
Sosigenes		索西琴尼
South Pole-Aitken	SPA	南极艾特肯
South Pole-Aitken Basin		南极艾特肯盆地
South Pole-Aitken Terrane	SPAT	南极艾特肯地体
Space Weather Prediction Center		空间天气预报中心
spectral profiler	SP	光谱廓线仪
support vector machine	SVM	支持向量机
Taurus-Littrow		陶拉斯-利特罗
Theophilus		西奥菲勒斯
Thomson		汤姆孙
Th-rich (>3.5 $\mu\text{g/g}$), moderately mafic breccias		富钍 (>3.5 $\mu\text{g/g}$) 的中等镁铁质角砾岩
Tsiolkovskiy		齐奥尔科夫斯基
ultraviolet visible	UV-VIS	紫外-可见光
USGS Geologic Atlas of the Moon		美国地质勘探局的月球地质图集
USGS Moon Pyroclastic Volcanism Project		美国地质勘探局的月球火山碎屑火山活动项目
Vallis Alpes		阿尔卑斯大峡谷
Von Kármán		冯·卡门
wide angle camera	WAC	广角相机
wrinkle ridge		月脊

注：部分中英文对照参考了中华人民共和国民政部发布的《第一批月球地名标准汉字译名表》和《第二批月球地名标准汉字译名表》，术语在线：<http://www.termonline.cn/list.htm?k>，月球地图—百度文库：<https://wenku.baidu.com/view/d604fc0e4a7302768e9939f3.html>，月面图—百度文库：<https://wenku.baidu.com/view/5d6317b2fd0a79563cle72af.html>。

目 录

《博士后文库》序言

前言

本书涉及专业词汇中英文对照表

第 1 章 月球 Th 含量分布和出露机制	1
1.1 月球 Th 含量的地质意义	2
1.1.1 Th 含量与月球岩性的关系	2
1.1.2 Th 含量与月球地体划分的关系	3
1.1.3 Th 含量与月亮厚度的关系	8
1.2 基于 CE-2 GRS 数据的月表 Th 含量分布	10
1.2.1 CE-2 GRS 及探测数据	10
1.2.2 数据处理和 Th 含量反演	11
1.2.3 Th 含量分布	16
1.2.4 Th 含量反演结果比较和不确定性分析	18
1.2.5 PKT 月表 Th 含量分布特征	19
1.3 壳幔内 Th 含量分布特征	20
1.3.1 月表 Th 含量分布与月亮厚度	20
1.3.2 月球主要岩套的壳幔分布和 Th 含量特征	22
1.4 富 Th 物质月表出露机制	24
1.4.1 PKT 地区的富 Th 物质出露机制	24
1.4.2 Compton-Belkovich 地区的富 Th 物质出露机制	29
1.4.3 SPAT 地区的 Th 含量提升物质出露机制	30
1.5 本章小结	32
参考文献	33
第 2 章 月表氧化物含量反演	41
2.1 基于决策树和支持向量机的月表 TiO ₂ 含量反演	42
2.1.1 CE-1 IIM 主要性能参数	42
2.1.2 CE-1 IIM 数据处理	43

2.1.3	光谱参数建立	46
2.1.4	TiO ₂ 含量反演 DT-SVM 模型	47
2.1.5	基于 DT-SVM 模型的月表 TiO ₂ 含量反演	48
2.1.6	TiO ₂ 含量反演改进	51
2.2	基于神经网络模型的月表主要氧化物含量反演	58
2.2.1	光学光谱反演月表氧化物含量的依据	59
2.2.2	月表采样站点数据和 IIM 遥感数据	61
2.2.3	月表主要氧化物含量反演方法	68
2.2.4	月表氧化物含量分布	71
2.2.5	对于高地地区岩性特征的启示	78
2.3	本章小结	80
	参考文献	80
第 3 章	月球岩石	91
3.1	月球岩石类型	92
3.2	月壳原生岩浆岩	93
3.2.1	亚铁斜长岩套	93
3.2.2	镁质岩套	94
3.2.3	碱性岩套	96
3.2.4	克里普玄武岩	98
3.3	月幔岩石	99
3.3.1	月海玄武岩	99
3.3.2	月海玄武质火山碎屑沉积	101
3.4	月球角砾岩和月球陨石	104
3.4.1	月球角砾岩	104
3.4.2	月球陨石	105
3.5	本章小结	106
	参考文献	107
第 4 章	月球岩性分析和地质线索	118
4.1	月球表面岩性分布特征	119
4.1.1	基于 LP 的浅月表岩性分析	119
4.1.2	基于 CE-1 IIM 的月表岩性分析	132

4.2 相关岩浆洋演化和地质线索	163
4.2.1 早期镁质岩浆的侵入范围	164
4.2.2 镁质岩套与克里普玄武岩的成因关系	164
4.2.3 镁质岩套与碱性岩套的成因关系	164
4.2.4 南极艾特肯盆地的开掘程度	165
4.3 本章小结	166
参考文献	167
编后记	176

第 1 章 月球 Th 含量分布和出露机制

月球钍 (Th) 含量是区分不同岩性和地体的重要标志, 是反映月壳厚度的关键指标, 是研究月球化学分布不均一性的关键因素, 也是重建月球岩浆洋模型的重要线索。本章主要介绍采用“嫦娥二号”(Chang'e-2, CE-2) 伽马射线谱仪 (gamma ray spectrometer, GRS) 数据反演月表 Th 含量分布, 根据月壳厚度、月球五大岩套在壳幔内的分布特征和它们的 Th 含量特征, 揭示壳幔内 Th 含量的分布特征和富 Th 物质的分布深度, 进而探讨富 Th 物质在月表出露的机制。