

学士学位论文

嫦娥五号拟着陆区地质特征 及月壤特性研究

姓 名： 钱煜奇

学 科 专 业： 地质学(基地班)

指 导 教 师： 肖 龙 教授

培 养 单 位： 地球科学学院

二〇一七年六月

中国地质大学（武汉）学士学位论文原创性声明

本人郑重声明：本人所呈交的学士学位论文《嫦娥五号拟着陆区地质特征及月壤特性研究》，是本人在指导老师的指导下，在中国地质大学（武汉）攻读学士学位期间独立进行研究工作所取得的成果。论文中除已注明部分外不包含他人已发表或撰写过的研究成果，对论文的完成提供过帮助的有关人员已在文中说明并致以谢意。

本人所呈交的学士学位论文没有违反学术道德和学术规范，没有侵权行为，并愿意承担由此而产生的法律责任和法律后果。

学位论文作者签名：_____

日 期： 年 月 日

摘要

嫦娥五号任务是我国探月工程“绕”、“落”、“回”三步走战略中的最后一步,将于2017年11月在海南文昌发射,最终带回约2kg月壤,为研究月球组成及演化提供宝贵的样品。本文基于多元遥感数据对拟着陆区的地形地貌特点进行了分析,基于铁钛元素分布和撞击坑分布特点划分了主要地质单元并对主要月海玄武岩单元进行了撞击坑大小-频率分布法定年。最终通过与以往着陆区月壤样品的比较,大致限定了拟着陆区月壤成分、厚度、均值粒径等特性,为嫦娥五号的顺利实施提供了有益参考。

嫦娥五号拟着陆区位于月球正面风暴洋北部、吕姆克山附近,面积约55000km²,美国地质调查局曾对该地区进行了1:100万地质填图,将拟着陆区划分为Im和Em两个主要的地质单元。Hiesinger等曾通过克莱门汀数据将该地区划分为P58和P10两个地质单元,通过撞击坑大小-频率分布定年法确定其年龄约为3.44Ga和1.33Ga。然而目前为止对该地区的研究主要集中在吕姆克山地区,对拟着陆区主体部分的地质特征和月壤特性却没有进一步认识。

本文通过KAGUYA数据反演并制作了拟着陆区铁钛元素丰度图、假彩色影像及光学成熟度图,将拟着陆区划分为7个地质单元,并利用撞击坑大小-频率分布定年法对其中四个月海玄武岩单元进行了定年,确定其分别为I_{2m}极低钛中低铁月海玄武岩、IE_m极低钛低钛中铁月海玄武岩、E_{2m}中低钛高铁月海玄武岩和E_{2m}极低钛高铁月海玄武岩。通过上述年代学及元素含量分析,在拟着陆区内识别出一期晚雨海世极低钛月海玄武岩事件,一期晚爱拉托逊世中低钛月海玄武岩事件和一期火山穹丘事件。

在综合分析以往着陆区月壤特性资料的基础上,本文确定了拟着陆区西部主要为极低钛低钛月壤,东部主要为中低钛月壤。本文将拟着陆区地质年龄与光学成熟度数据与以往着陆区进行比较,从而限定了拟着陆区月壤均值粒径、厚度等主要特性,得到拟着陆区西部月壤厚度约为3-4m,拟着陆区东部月壤厚度约为2.5-3m。

关键词: 嫦娥五号、风暴洋、KAGUYA、月壤、撞击坑

Abstract

Chang'E 5 is China's first sample return mission which will launch in late November, 2017. It is designed to bring about 2kg lunar regolith samples back to the earth, which will be the only returned sample after Luna-14 and benefits a lot to lunar research. This paper will analyze the topography of the candidate landing area via multi-source remote sensing data. This paper will also divide the main geologic units via the content of Fe and Ti and the distribution characteristics of craters and carry out the CFSD method on the main mare basalts units.

The candidate landing area of Chang'E 5 is in the north of Oceanus Procellarum, near the Mons Rumker, which is a 55,000 km² area. USGS once developed a 1:1 000 000 geologic map in this area. Hiesinger et.al once divided the area into P58 and P10, and give the dating results of 3.44Ga and 1.33Ga. However, detailed study only be done in the Rumker area, there are no further study of the geology and the lunar regolith of the major of Chang'E 5 candidate landing area.

We build the TiO₂ and FeO abundance map, color ratio map and optical map in this area based on KAGUYA data and figure that the mare materials in the candidate landing area can be divided into seven main geologic units. To constraint the age of the main mare basalts, we carried out the CFSD methods and figured out that they are I₂m, IEm, E₂m and E₂m units.

Finally, we ensure several physical property of the lunar soils including depth, grain size distribution and composition through comparing remote sensing data and age of the candidate landing area with the former Apollo and Luna landing area. We think the west part of the landing area is ultra-low Ti or low Ti lunar regolith, the east side of the landing is low or middle Ti lunar regolith. We also give estimate value of the west and east part of the landing area, which is 3-4m and 2.5-3m.

Key Words: Chang'E 5, Oceanus Procellarum, KAGUYA, Lunar Regolith, Impact Crater

图清单

图 1.1	嫦娥五号拟着陆区位置及范围	3
图 1.2	以往采样区位置及嫦娥五号拟着陆区位置	4
图 3.1	嫦娥五号拟着陆区 TC Morning Map 影像	13
图 3.2	1:100 万吕姆克幅月球地质图局部	13
图 3.3	嫦娥五号拟着陆区地形图	14
图 3.4	嫦娥五号拟着陆区 AA'地形剖面图	15
图 3.5	嫦娥五号拟着陆区坡度图	15
图 3.6	嫦娥五号拟着陆区山体阴影图	16
图 3.7	嫦娥五号拟着陆区撞击坑直径-频数分布直方图	17
图 3.8	嫦娥五号拟着陆区 500m 以上撞击坑分布	17
图 3.9	嫦娥五号拟着陆区皱脊分布图	18
图 3.10	嫦娥五号拟着陆区典型皱脊影像	18
图 3.11	嫦娥五号拟着陆区皱脊典型剖面图	19
图 3.12	嫦娥五号拟着陆区月溪地区山体阴影图和 TC DTM 影像	20
图 3.13	夏普溪典型地形剖面图	20
图 3.14	吕姆克山地区 TC Morning Map 影像及 TC DTM 影像	21
图 3.15	吕姆克山地区 CC'地形剖面图	22
图 3.16	吕姆克山地区地质图	22
图 3.17	嫦娥五号拟着陆区 TiO_2 丰度图	23
图 3.18	嫦娥五号拟着陆区玄武岩分布图	24
图 3.19	嫦娥五号拟着陆区 FeO 丰度图	24
图 3.20	嫦娥五号拟着陆区假彩色影像	25
图 3.21	嫦娥五号拟着陆区地质单元划分	26
图 3.22	拟着陆区 300m 以上撞击坑统计区域及定年结果	27
图 3.23	拟着陆区 300m 以上撞击坑累积分布曲线	28
图 3.24	拟着陆区 150m 以上撞击坑统计区域及定年结果	28
图 3.25	拟着陆区 150m 以上撞击坑累积分布曲线	31
图 4.1	嫦娥五号拟着陆区月壤成分特性图	34
图 4.2	嫦娥五号拟着陆区月壤 FeO 、 TiO_2 含量	35
图 4.3	撞击坑形态法 DA、DF 示意图	36
图 4.4	Region1、Region3 地区撞击坑形态法统计结果	37

图 4.5	Region1、Region3 地区撞击坑直径-频率分布图·····	38
图 4.6	嫦娥五号拟着陆区月壤厚度估计值·····	39
图 4.7	嫦娥五号拟着陆区月壤厚度估计值与以往着陆区比较·····	40
图 4.8	阿波罗地区光学成熟度与 Is/FeO 关系·····	41
图 4.9	嫦娥五号拟着陆区光学成熟度影像·····	41
图 4.10	以往着陆区光学成熟度影像·····	43
图 4.11	以往着陆区光学成熟度值与均值粒径关系·····	44
图 4.12	嫦娥五号拟着陆区均值粒径分布图·····	45

表清单

表 1.1	月球地质年代表	2
表 2.1	本文所用 NAC 数据列表	6
表 2.2	本文所用 TC Morning Map 数据列表	7
表 2.3	本文所用 TC DTM 数据列表	7
表 2.4	本文所用 KAGUYA MI 数据列表	8
表 2.5	以往着陆区铁钛元素反演结果与实验测量值比较	12
表 3.1	嫦娥五号拟着陆区地质单元划分依据	26
表 3.2	拟着陆区 300m 以上撞击坑定年结果	27
表 3.3	拟着陆区 150m 以上撞击坑定年结果	28
表 3.4	嫦娥五号拟着陆区主要地质单元模式年龄及地质代号	31
表 4.1	以往着陆区地质年龄及月壤厚度	35
表 3.4	嫦娥五号拟着陆区主要地质单元模式年龄及地质代号	31
表 4.1	以往着陆区地质年龄及月壤厚度	35
表 4.2	嫦娥五号拟着陆区部分区域月壤厚度估计值	38
表 4.3	嫦娥五号拟着陆区主要地质单元月壤厚度估计值	39
表 4.4	嫦娥五号拟着陆区主要地质单元模式年龄及地质代号	40
表 4.5	以往着陆区地质年龄及光学成熟度值	43
表 4.6	嫦娥五号拟着陆区主要地质单元模式年龄及地质代号	44
表 4.7	嫦娥五号拟着陆区月壤均值粒径划分	45
表 4.8	嫦娥五号拟着陆区月壤均值粒径及光学成熟度值	46

目 录

第一章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 月球地质历史划分	2
1.3 研究区域和研究现状	3
1.3.1 研究区域	3
1.3.2 研究现状	4
1.4 研究方法	5
1.5 论文结构	5
第二章 数据及处理	6
2.1 数据及数据来源	6
2.1.1 影像数据	6
2.1.2 地形数据	7
2.1.3 多光谱数据	8
2.2 数据处理	10
2.2.1 地形数据处理	10
2.2.2 研究背景多光谱数据处理	10
2.3 数据有效性	12
第三章 嫦娥五号拟着陆区地质特征	13
3.1 区域地质背景	13
3.2 拟着陆区地形分析	14
3.2.1 高程分析	14
3.2.2 坡度分析	15
3.3 拟着陆区重要地质特征解译	16
3.3.1 概述	16
3.3.2 撞击坑	16
3.3.3 皱脊	17
3.3.4 夏普溪	19
3.3.5 吕姆克山	21
3.4 拟着陆区物质成分分析及地质单元划分	23
3.4.1 铁钛元素含量分析	23
3.4.2 地质单元划分	25

3.5 拟着陆区模式年龄	27
3.6 本章小结	33
第四章 嫦娥五号拟着陆区月壤特性	34
4.1 月壤成分分析	34
4.2 月壤厚度分析	35
4.2.1 月壤厚度分析方法	35
4.2.2 拟着陆区月壤厚度	37
4.3 月壤成熟度分析	40
4.4 月壤粒度分析	42
4.5 本章小结	47
第五章 结论与展望	48
5.1 主要结论	48
5.2 展望	49
致谢	50
参考文献	51
附录	57
1. 嫦娥五号拟着陆区地质简图	57
2. 嫦娥五号拟着陆区地形地貌图	57
3. 嫦娥五号拟着陆区坡度图	58
4. 嫦娥五号拟着陆区较大撞击坑分布图	58
5. 嫦娥五号拟着陆区皱脊分布图	59
6. 嫦娥五号拟着陆区 TiO_2 丰度图	59
7. 嫦娥五号拟着陆区 FeO 丰度图	60
8. 嫦娥五号拟着陆区玄武岩划分图	60
9. 嫦娥五号拟着陆区假彩色影像	61
10. 嫦娥五号拟着陆区光学成熟度图	61
11. 嫦娥五号拟着陆区月壤成分特性图	62
12. 嫦娥五号拟着陆区月壤均值粒径分布图	62

第一章 绪论

1.1 研究背景

太空不仅孕育了地球，也为人类提供了无尽的资源，探测太空不仅能为人类带来巨大的经济效益^[1, 2]，也是扩展人类社会广度的唯一途径。月球作为地球的近邻，不仅寄托了人类几千年来的美好遐想，自然也成为了太空探测的前哨站。

20 世纪 60 年代，随着美苏冷战的加剧，月球探测迎来了第一次高潮，1959-1976 年间就有 62 个探测器前往月球，将人类对月球的认识提高了一大步^[3]；20 世纪 90 年代以来，受技术发展及人类认识的驱动，月球探测逐渐复苏，美国、中国、日本、印度和欧洲等国家或组织相继开实施了月球探测计划，将一系列探测器送往月球，月球探测具有了国际合作、科学引领的崭新面貌。

作为中国首个月球探测工程，“嫦娥工程”自 2004 年正式开展，目前已经顺利完成了“绕”、“落”、“回”三部曲战略中的前两步，取得了大量科学成果^[4-9]。按我国月球探测的战略规划，探月工程三期工程将携带月球样品返回地球，嫦娥五号任务作为三期工程的主任务将肩负起重大历史使命。

嫦娥五号将于 2017 年 11 月在海南文昌择机发射，完成我国航天史上的首次月表自动采样、首次月面起飞，首次月球轨道上的交会对接，首次带着月壤以接近第二宇宙速度返回地球^[10]，最终带回约 2kg 的月壤。

嫦娥五号带回的月球样品不仅将是我国第一份月球样品，也是自月球-24 号采样返回 41 年来首次从月球带回样品，将为研究月球物质组成、空间环境及风暴洋的演化等重大科学问题提供最新的第一手资料。

由于嫦娥五号钻取采样装置将进行月表取样，正式采样之前，钻取采样装置的地面模拟实验将为未来钻取工作提供重要的数据支持，是成功采样的有力保障。钻取采样装置地面模拟实验的成功与否，一方面取决于装置的可靠性，另一方面也取决于地面模拟实验所用的模拟月壤及模拟月壤剖面的代表性。

因此本文试图通过对国内外月球探测数据的运用，揭示嫦娥五号拟着陆区的地质特征和月壤特性，并在广泛调研“阿波罗”计划、“月球”计划返回样品性质的基础上限定拟着陆区月壤物理特性参数，为钻取采样装置的地面模拟实验提供支持。

1.2 月球地质历史划分

月球地质年代划分已有数十年历史。1949 年，哈巴科夫等第一次系统划分了月球地质年代。1962，Shoemaker 和 Hackman 根据威尔逊天文台得到的哥白尼撞击坑影像，通过反射率与地形地貌学特征研究，建立了月球相对地质年代序列，成为现行通用月球相对地质年代划分的基础^[11]。

20 世纪 60、70 年代以来，随着“阿波罗”和“月球”计划的成功采样返回，月球局部地区的绝对年龄得到测定，完整的月球地质年代表从而得以建立^[12]，Wilhelms 的五分法逐渐被普遍接受。

新世纪以来，随着月球探测的不断深入，以欧阳自远为代表的中国科学家主张按月球演化的地质作用类型将月球地质年代划分为“三宙六纪”，并得到了普遍认可^[12, 13]。“三宙六纪”方案中冥月宙代表了以内动力地质作用为主的岩浆洋演化阶段；古月宙代表了内外地质作用共同作用时期，其间形成了原前酒海纪的 30 个大型撞击盆地并发生了月海玄武岩的泛滥；新月宙则是以外动力地质作用为主的时期，其间形成了大量较小规模的撞击坑。该划分方案如表 1.1 所示。

表 1.1 月球地质年代表^[11-15]

地质年代			年龄界线 (Ga)	地质特征
新月宙	哥白尼纪 (C)		0-0.8	形成具有辐射纹的新鲜撞击坑
	爱拉托逊纪 (E)	晚爱拉托逊世 (E2)	0.8-2.8	形成无辐射纹的撞击坑
		早爱拉托逊世 (E1)	2.8-3.16	高钛月海玄武岩喷发
古月宙	雨海纪 (I)	晚雨海世 (I2)	3.16-3.80	剧烈的玄武岩喷发
		早雨海世 (I1)	3.80-3.85	形成雨海、东海等多环盆地
	酒海纪 (N)		3.85-3.92	形成酒海盆地等 12 个大型撞击盆地
	艾肯纪 (A)		3.92-4.2	形成了以南极艾肯盆地为代表的 30 个大型撞击盆地
冥月宙	前艾肯纪 (pA)		4.2-4.56	斜长质月壳形成

1.3 研究区域和研究现状

1.3.1 研究区域

风暴洋是月球上最大的月海单元，直径约 3000km，面积约 $5 \times 10^6 \text{km}^2$ ^[16, 17]。嫦娥五号拟着陆区位于风暴洋北部，北纬 41-45°，西经 49-69°区域，东西长约 450km，南北宽约 120km，总面积约 55000km²。拟着陆区东西两侧均为高地物质，南部为吕姆克山，与嫦娥三号着陆的雨海盆地隔侏罗山相望。

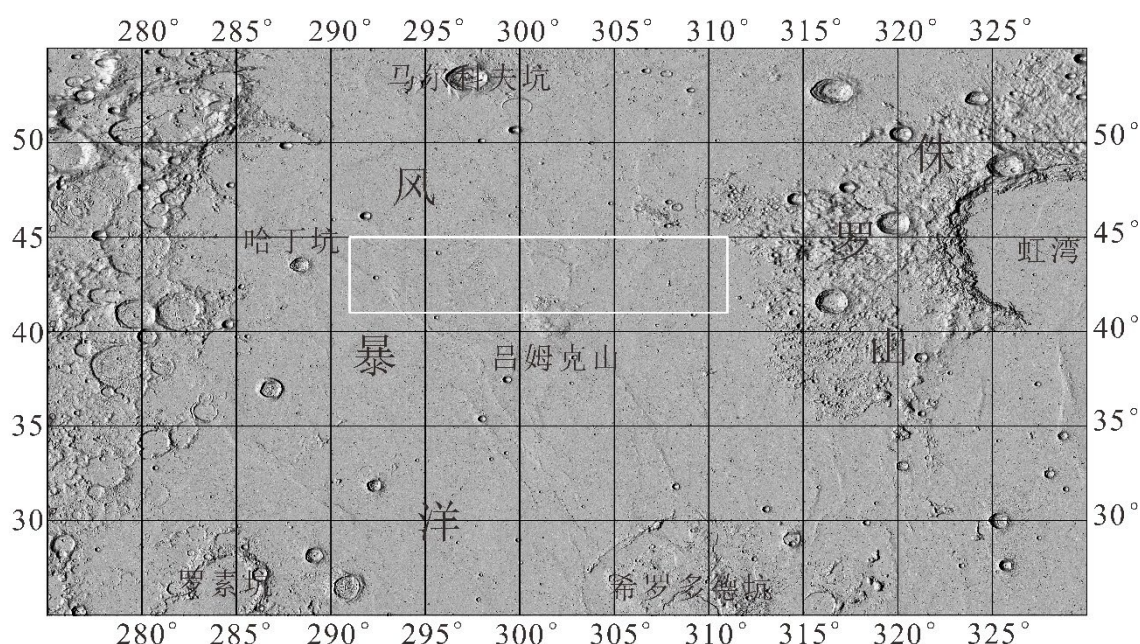


图 1.1 嫦娥五号拟着陆区位置及范围

风暴洋形成于月球早期一次巨大的撞击事件^[18]。撞击产生的巨大能量开挖了月球正面的原始长石质月亮，撞击产生的熔体洋中结晶出了新生长石质月亮，导致了如今月球正反两面不对称的面貌^[19]。

风暴洋岩浆活动是月球上最大、持续时间最长的玄武岩喷发活动，其喷发起始于~3.93Ga，结束于~1.20Ga，在~3.3-3.5Ga 达到了顶峰，持续了近 30 亿年^[20]。风暴洋岩浆活动岩浆量达 $8.7 \times 10^5 \text{km}^3$ ^[21]，厚约 160-625m^[22]。风暴洋位于克里普地体范围内，其 U、Th 含量比正常值高出约 300 倍，其放射性衰变为风暴洋地区持续的岩浆活动提供了必要的能量^[23]。

1.3.2 研究现状

目前为止，风暴洋地区共进行了 4 次无人软着陆探测和 1 次载人探测。阿波罗-12 任务带回了约 34.6kg 月岩和月壤，而嫦娥五号拟着陆区目前并无样品返回。

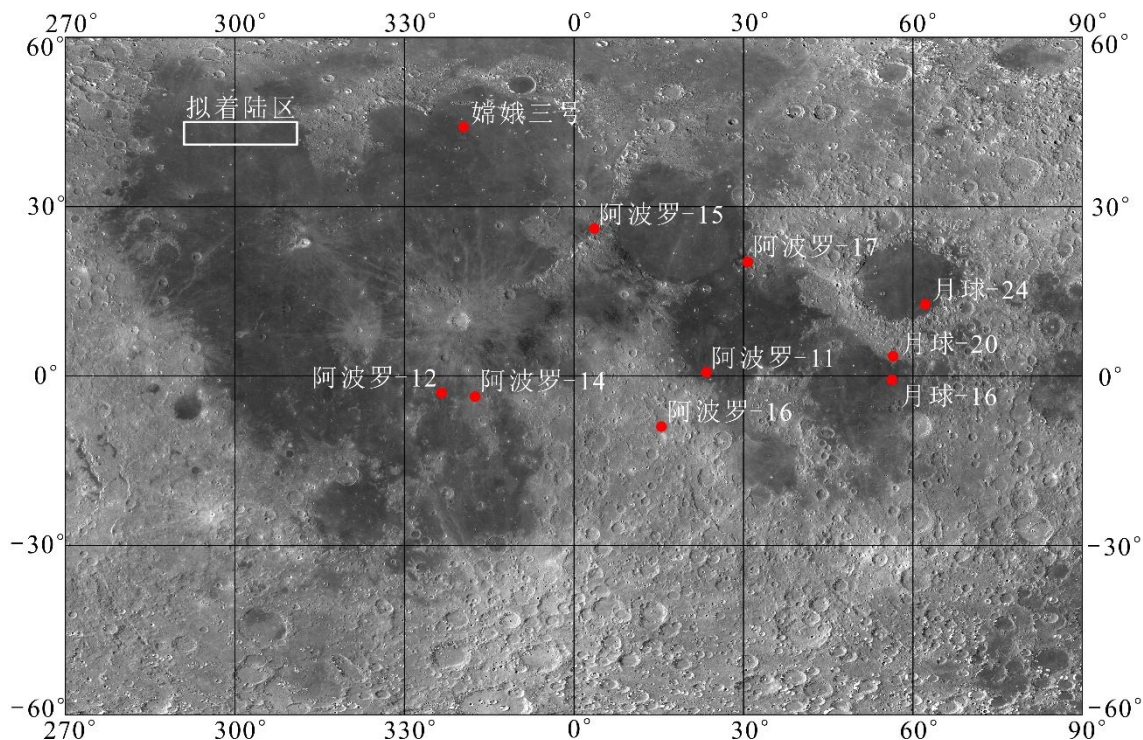


图 1.2 以往采样区位置及嫦娥五号拟着陆区位置

美国地质调查局在 20 世纪 60、70 年代出版的一系列月球地质图中共有三幅地质图覆盖拟着陆区，分别为 1:500 万月球西部地质图^[24]、1:500 万月球近端地质图^[25]和 1:100 万吕姆克幅地质图^[26]。其中 1:100 万吕姆克幅地质图对拟着陆区地质单元进行了简要划分。

Hiesinger 等曾基于 Clementine 假彩色影像对风暴洋地区的地质单元进行了划分，并通过数坑法确定了这些地质单元的绝对模式年龄^[20, 27, 28]。Hiesinger 等将嫦娥五号拟着陆区划分为 P58 和 P10 两个地质单元，P58 年龄约 3.44Ga，代表较老的玄武岩岩浆活动，P10 年龄约 1.33Ga，几乎代表了风暴洋地区最年轻的岩浆活动^[20]。这一划分方案得到了 Morota 等的认可，其通过 KAGUYA 高分辨率影像得出 P58 年龄约为 3.46Ga，P10 年龄约为 1.91Ga^[29]。

1.4 研究方法

本文将广泛使用 KAGUYA、LRO 等探测器取得的影像数据、高程数据、多光谱数据，通过 ARCGIS 10.3、ENVI 5.1、JMARS、Crater-Helpers、Cratertools、craterstats2 等软件或插件进行铁钛元素反演、光学成熟度计算和撞击坑统计等操作，进而进行地质单元划分、定年，最终推演区域地质演化历史。

本文将比较嫦娥五号拟着陆区和以往“阿波罗”计划、“月球”计划的遥感影像，在广泛调研以往着陆区月壤特性资料的基础上限定拟着陆区月壤成分、厚度、粒度等特性，为嫦娥五号钻取采样装置地面实验提供依据。

1.5 论文结构

第一章 绪论：本章主要论述本文的选题背景、研究意义，介绍研究区域概况、研究现状，提出了本文使用的研究方法。

第二章 数据及处理：本章主要介绍本文中所使用遥感数据的类别、来源和处理方法，介绍每种遥感数据在本文中的作用。

第三章 嫦娥五号拟着陆区地质特征：本章使用处理后的遥感影像，进行地形地貌分析、元素含量分析、相对地质年龄分析，在此基础上进行地质单元划分和定年，最终恢复出区域地质演化历史。

第四章 嫦娥五号拟着陆区月壤特性：本章通过拟着陆区遥感影像资料，并在广泛调研以往着陆区月壤特性资料的基础上进行拟着陆区月壤成分、厚度和粒度和其他物理特性参数分析。

第五章 结论与展望：本章将归纳总结本文所取得的结果，并对未来工作作出展望。

第二章 数据及处理

2.1 数据及数据来源

本文所用数据可分为影像数据、地形数据和多光谱数据。

2.1.1 影像数据

影像数据主要包括美国月球勘察轨道器相机拍摄的 WAC 数据、NAC 数据和日本月亮女神号地形相机拍摄的 TC Morning Map 数据。

WAC 数据由 LROC 宽角相机拍摄，空间分辨率为 100m。本文使用从 USGS 网站下载的全月 WAC 数据进行地形地貌分析，下载地址为：https://astrogeology.usgs.gov/search/map/Moon/LRO/LROC_WAC/Lunar_LRO_LROCWAC_Mosaic_global_100m_June2013。

NAC 数据由 LROC 窄角相机拍摄，最佳空间分辨率可达 50cm。本文使用 LROC 网站（<http://lroc.sese.asu.edu/>）下载的 NAC CDR 级数据进行地形地貌、石块分布和小型撞击坑研究。本文所使用的 NAC 数据如表 2.1：

表 2.1 本文所用 NAC 数据列表

数据名称	
M166215270RC	M160350468RC
M160336924RC	M160336924LC
M157988674RC	M144992169RC
M144971839RC	M144971839LC
M144951466LC	M142658319RC
M142658319LC	M124939913LC
M122537346RC	M122537346LC
M114382204RC	M114382204LC

TC Morning Map 数据由月亮女神号地形相机拍摄，空间分辨率约 10m。本文使用 KAGUYA 网站（<http://l2db.KAGUYA.darts.isas.jaxa.jp/>）下载的 LISM Map

级数据进行撞击坑统计及地形地貌分析。本文所使用的 TC Morning Map 数据如表 2.2:

表 2.2 本文所用 TC Morning Map 数据列表

数据名称	
TCO_MAPm04_N42E291N39E294SC	TCO_MAPm04_N42E294N39E297SC
TCO_MAPm04_N42E297N39E300SC	TCO_MAPm04_N42E300N39E303SC
TCO_MAPm04_N42E303N39E306SC	TCO_MAPm04_N42E306N39E309SC
TCO_MAPm04_N42E309N39E312SC	TCO_MAPm04_N45E291N42E294SC
TCO_MAPm04_N45E294N42E297SC	TCO_MAPm04_N45E297N42E300SC
TCO_MAPm04_N45E300N42E303SC	TCO_MAPm04_N45E303N42E306SC
TCO_MAPm04_N45E306N42E309SC	TCO_MAPm04_N45E309N42E312SC

2.1.2 地形数据

本文所用的地形数据主要为 TC DTM 数据和 NAC DTM 数据。

TC DTM 数据由 KAGUYA 所携带的 TC 相机拍摄, 空间分辨率约 10m。本文所使用的 LISM Map 级 TC DTM 数据下载自 KAGUYA 官网 (<http://l2db.KAGUYA.darts.isas.jaxa.jp/>), 主要用于地形地貌分析及制作拟着陆区山体阴影图和坡度图。

NAC DTM 数据由 LRO 所携带的窄角相机拍摄, 空间分辨率约 2m。本文所使用的 NAC DTM 数据下载自 LROC 网站 (<http://lroc.sese.asu.edu/>), 主要用于月溪的地形特征和月海玄武岩厚度的研究。

表 2.3 本文所用 TC DTM 数据列表

数据名称	
DTM_MAP_02_N42E291N39E294SC	DTM_MAP_02_N42E294N39E297SC
DTM_MAP_02_N42E297N39E300SC	DTM_MAP_02_N42E300N39E303SC
DTM_MAP_02_N42E303N39E306SC	DTM_MAP_02_N42E306N39E309SC
DTM_MAP_02_N42E309N39E312SC	DTM_MAP_02_N45E291N42E294SC
DTM_MAP_02_N45E294N42E297SC	DTM_MAP_02_N45E297N42E300SC
DTM_MAP_02_N45E300N42E303SC	DTM_MAP_02_N45E303N42E306SC
DTM_MAP_02_N45E306N42E309SC	DTM_MAP_02_N45E309N42E312SC

2.1.3 多光谱数据

本文所用的多光谱数据主要为 KAGUYA MI 数据。

MI 数据由月亮女神号所携带的多光谱成像仪所拍摄，空间分辨率约 20m。月亮女神号多光谱成像仪具有与克莱门汀紫外可见光光谱仪相同的波段，可见光波段波长分别为 415nm, 750nm, 900nm, 950nm, 1000nm, 但比克莱门汀数据具更高的空间分辨率^[30]。本文所用的 LISM Map 级数据下载自 KAGUYA 网站 (<http://l2db.KAGUYA.darts.isas.jaxa.jp/>)，主要用于拟着陆区元素含量分析及光学成熟度分析。本文所使用的 MI 数据如表 2.4：

表 2.4 本文所用 KAGUYA MI 数据列表

数据名称	
MI_MAP_03_N40E291N39E292SC	MI_MAP_03_N40E292N39E293SC
MI_MAP_03_N40E293N39E294SC	MI_MAP_03_N40E294N39E295SC
MI_MAP_03_N40E295N39E296SC	MI_MAP_03_N40E296N39E297SC
MI_MAP_03_N40E297N39E298SC	MI_MAP_03_N40E298N39E299SC
MI_MAP_03_N40E299N39E300SC	MI_MAP_03_N40E300N39E301SC
MI_MAP_03_N40E301N39E302SC	MI_MAP_03_N40E302N39E303SC
MI_MAP_03_N40E303N39E304SC	MI_MAP_03_N40E304N39E305SC
MI_MAP_03_N40E305N39E306SC	MI_MAP_03_N40E306N39E307SC
MI_MAP_03_N40E307N39E308SC	MI_MAP_03_N40E308N39E309SC
MI_MAP_03_N40E309N39E310SC	MI_MAP_03_N40E310N39E311SC
MI_MAP_03_N40E311N39E312SC	MI_MAP_03_N41E291N40E292SC
MI_MAP_03_N41E292N40E293SC	MI_MAP_03_N41E293N40E294SC
MI_MAP_03_N41E294N40E295SC	MI_MAP_03_N41E295N40E296SC
MI_MAP_03_N41E296N40E297SC	MI_MAP_03_N41E297N40E298SC
MI_MAP_03_N41E298N40E299SC	MI_MAP_03_N41E299N40E300SC
MI_MAP_03_N41E300N40E301SC	MI_MAP_03_N41E301N40E302SC
MI_MAP_03_N41E302N40E303SC	MI_MAP_03_N41E303N40E304SC
MI_MAP_03_N41E304N40E305SC	MI_MAP_03_N41E305N40E306SC
MI_MAP_03_N41E306N40E307SC	MI_MAP_03_N41E307N40E308SC
MI_MAP_03_N41E308N40E309SC	MI_MAP_03_N41E309N40E310SC
MI_MAP_03_N41E310N40E311SC	MI_MAP_03_N41E311N40E312SC
MI_MAP_03_N42E291N41E292SC	MI_MAP_03_N42E292N41E293SC
MI_MAP_03_N42E293N41E294SC	MI_MAP_03_N42E294N41E295SC
MI_MAP_03_N42E295N41E296SC	MI_MAP_03_N42E296N41E297SC
MI_MAP_03_N42E297N41E298SC	MI_MAP_03_N42E298N41E299SC
MI_MAP_03_N42E299N41E300SC	MI_MAP_03_N42E300N41E301SC

数据名称	
MI_MAP_03_N42E301N41E302SC	MI_MAP_03_N42E302N41E303SC
MI_MAP_03_N42E303N41E304SC	MI_MAP_03_N42E304N41E305SC
MI_MAP_03_N42E305N41E306SC	MI_MAP_03_N42E306N41E307SC
MI_MAP_03_N42E307N41E308SC	MI_MAP_03_N42E308N41E309SC
MI_MAP_03_N42E309N41E310SC	MI_MAP_03_N42E310N41E311SC
MI_MAP_03_N42E311N41E312SC	MI_MAP_03_N43E291N42E292SC
MI_MAP_03_N43E292N42E293SC	MI_MAP_03_N43E293N42E294SC
MI_MAP_03_N43E294N42E295SC	MI_MAP_03_N43E295N42E296SC
MI_MAP_03_N43E296N42E297SC	MI_MAP_03_N43E297N42E298SC
MI_MAP_03_N43E298N42E299SC	MI_MAP_03_N43E299N42E300SC
MI_MAP_03_N43E300N42E301SC	MI_MAP_03_N43E301N42E302SC
MI_MAP_03_N43E302N42E303SC	MI_MAP_03_N43E303N42E304SC
MI_MAP_03_N43E304N42E305SC	MI_MAP_03_N43E305N42E306SC
MI_MAP_03_N43E306N42E307SC	MI_MAP_03_N43E307N42E308SC
MI_MAP_03_N43E308N42E309SC	MI_MAP_03_N43E309N42E310SC
MI_MAP_03_N43E310N42E311SC	MI_MAP_03_N43E311N42E312SC
MI_MAP_03_N44E291N43E292SC	MI_MAP_03_N44E292N43E293SC
MI_MAP_03_N44E293N43E294SC	MI_MAP_03_N44E294N43E295SC
MI_MAP_03_N44E295N43E296SC	MI_MAP_03_N44E296N43E297SC
MI_MAP_03_N44E297N43E298SC	MI_MAP_03_N44E298N43E299SC
MI_MAP_03_N44E299N43E300SC	MI_MAP_03_N44E300N43E301SC
MI_MAP_03_N44E301N43E302SC	MI_MAP_03_N44E302N43E303SC
MI_MAP_03_N44E303N43E304SC	MI_MAP_03_N44E304N43E305SC
MI_MAP_03_N44E305N43E306SC	MI_MAP_03_N44E306N43E307SC
MI_MAP_03_N44E307N43E308SC	MI_MAP_03_N44E308N43E309SC
MI_MAP_03_N44E309N43E310SC	MI_MAP_03_N44E310N43E311SC
MI_MAP_03_N44E311N43E312SC	MI_MAP_03_N45E291N44E292SC
MI_MAP_03_N45E292N44E293SC	MI_MAP_03_N45E293N44E294SC
MI_MAP_03_N45E294N44E295SC	MI_MAP_03_N45E295N44E296SC
MI_MAP_03_N45E296N44E297SC	MI_MAP_03_N45E297N44E298SC
MI_MAP_03_N45E298N44E299SC	MI_MAP_03_N45E299N44E300SC
MI_MAP_03_N45E300N44E301SC	MI_MAP_03_N45E301N44E302SC
MI_MAP_03_N45E302N44E303SC	MI_MAP_03_N45E303N44E304SC
MI_MAP_03_N45E304N44E305SC	MI_MAP_03_N45E305N44E306SC
MI_MAP_03_N45E306N44E307SC	MI_MAP_03_N45E307N44E308SC
MI_MAP_03_N45E308N44E309SC	MI_MAP_03_N45E309N44E310SC
MI_MAP_03_N45E310N44E311SC	MI_MAP_03_N45E311N44E312SC

2.2 数据处理

2.2.1 地形数据处理

(1) 山体阴影图

山体阴影图是假设阳光照射山体，对 DTM 数据进行晕染的结果，山体阴影图能更直观的表现月表地形地貌特征。

本文使用 ENVI Classic 的 Create Hill Shade Image 功能将 TC DTM 影像制成山体阴影图，制作时太阳方位角设置为 315 度，高度角设置为 45 度。

(2) 坡度图

坡度一方面是地形起伏的反映，另一方面制约了月表采样区域的分布。通过坡度图能定量反映着陆区的坡度特征。

本文利用 ENVI Classic 的 Topographic Modeling 功能将 TC DTM 影像制成坡度图。

2.2.2 多光谱数据处理

(1) 行星反射率影像

行星反射率代表行星表面反射电磁波的能力，对月球而言，通常用月表对 750nm 电磁波的反射率代表行星反射率。行星反射率影像不仅可以反映月表相关性质（年龄、辐射纹范围），而且是反演月表铁钛元素丰度和光学成熟度的基础。

本文通过 ENVI 的 BandMath 功能将 MI 数据 DN 值转换为反射率值，转换系数为 0.00002。

(2) 铁钛元素丰度图

行星岩浆活动通常随时间、空间而变化，岩浆成分也会随之改变。因此通过研究岩浆成分不仅可以了解岩浆性质、划分岩浆作用范围，进一步也可以恢复区域演化历史。其中铁和钛元素是反映岩浆成分的最主要两个元素，钛元素含量更是进行月球玄武岩划分的主要依据。

Lucey 等研究发现克莱门汀 UVVIS 数据可见光波段 415nm, 750nm, 950nm 波段的反射率与月表铁钛元素含量密切相关，并通过与以往着陆区的定标提出了月表铁钛元素含量的反演算法^[31-33]。由于月亮女神号多光谱成像仪与克莱门汀紫

外可见光光谱仪具有完全相同的波段，因此月亮女神号 MI 数据也适用于 Lucey 等提出的反演算法。

Otake 等改写了 Lucey 等提出的算法，使其更适合于 MI 数据反演，且相比于 Clementine 数据反演结果具有更小的误差。Otake 等改写后的算法如下^[34]：

$$\theta_{\text{Ti}} = \arctan \left\{ \left[\left(R_{415} / R_{750} \right) - 0.208 \right] / \left[R_{750} + 0.108 \right] \right\} \quad (1)$$

$$\text{wt}\% \text{TiO}_2 = 0.72 \theta_{\text{Ti}}^{14.964}$$

$$\theta_{\text{Fe}} = -\arctan \left\{ \left[\left(R_{950} / R_{750} \right) - 1.250 \right] / \left[R_{750} - 0.037 \right] \right\} \quad (2)$$

$$\text{wt}\% \text{FeO} = 20.527 \theta_{\text{Fe}} - 12.266$$

这里 R_{415} ， R_{750} ， R_{950} 分别代表相应波段的反射率值。

(3) 假彩色影像

本文通过 ENVI Classic 的 Band Ratios 功能将 MI 多光谱数据制成假彩色影像，该影像以 750nm/415nm 为红色，750nm/950nm 为绿色，415nm/750nm 为蓝色。

该影像对月壤成熟度、铁钛元素含量十分敏感，可用于地质单元的划分^[35]。其中红色代表低钛或富玻璃质，蓝色代表高钛，绿色对铁含量敏感。火山碎屑物因含较多的玻璃质物质而呈红色。

月海玄武岩的颜色与基性矿物含量及月壤成熟度有关，钛含量较低时会发橙黄色，较高时发蓝。撞击坑由于大小、年龄差别很大，因此从暗红色、蓝色到亮蓝色都会出现^[20, 35]。

(4) 光学成熟度影像

光学成熟度是衡量月壤空间风化程度的量^[36]，由 Lucey 等基于月壤反射电磁波特性随时间变化的特点提出。由于月壤光学特性会随风化程度加深而减弱，光学成熟度值也随值降低，因此光学成熟度值越低，月壤越成熟，光学成熟度值越高，月壤越不成熟，这与 Is/FeO 的变化趋势相反。

本文采用 Lucey 等提出的光学成熟度算法计算着陆区光学成熟度，该算法如下^[36]：

$$\text{OMAT} = \left[\left(R_{750} - x_0 \right)^2 \times \left(R_{950} / R_{750} - y_0 \right) \right]^{0.5} \quad (3)$$

这里 $x_0=0.08$ ， $y_0=1.19$ ， R_{750} ， R_{950} 分别代表相应波段的反射率值。

由于式（3）由 Clementine UVVIS 数据推导而来，当使用 KAGUYA MI 数据计算光学成熟度时必须进行下列换算^[37]：

$$R_{750\text{corr}} = (R_{750} * 1.51) + 0.020 \tag{5}$$

$$R_{950\text{corr}} = (R_{950} * 1.38) + 0.022 \tag{6}$$

这里 R_{750} ， R_{950} 代表相应波段的反射率值， $R_{750\text{corr}}$ ， $R_{950\text{corr}}$ 代表相应波段修正后的反射率值。

2.3 数据有效性

为了判断本文所用反演算法的有效性，本次研究除了对拟着陆区铁钛元素进行了反演，还反演了以往着陆区的铁钛元素含量。以往着陆区铁钛元素含量的反演结果如下（表 2.5）：

表 2.5 以往着陆区铁钛元素反演结果与实验测量值比较

地区	反演结果		测量值[48]	
	TiO ₂ (%)	FeO (%)	TiO ₂ (%)	FeO (%)
阿波罗-11	10.0	17.0	7.8	15.3
阿波罗-12	4.2	16.4	3	15.1
阿波罗-14	1.7	12.3	1.7	10.4
阿波罗-15	1.9	14.4	1.4	14.3
阿波罗-16	0.9	5.3	0.54	5.1
阿波罗-17	3.8	10.5	4.2	12.2
月球-16	7.1	17.1	3.4	16.7
月球-20	1.4	9.7	0.55	7
月球-24	4.8	17.0	1.3	19.8

从表 2.5 可以看出，本文所用的铁钛含量的反演结果与以往着陆区返回样品的实测值较为一致。TiO₂ 的反演结果与实测值相差多在±2%以内，大部分误差在±1%以内。FeO 的反演结果与实测值相差全部在 3%以内，绝大部分在 2%以内。

此外，从上表还可看出，TiO₂ 与 FeO 的含量越低，则反演结果与实测值相差越大。因此以往着陆区低钛玄武岩或高地单元 TiO₂ 的反演值与实测值的差值往往更大。

第三章 嫦娥五号拟着陆区地质特征

3.1 区域地质背景

嫦娥五号拟着陆区位于风暴洋北部，经度跨度为 69° - 49° W，纬度跨度为 41° - 45° N，面积约 55000km^2 ，平均高程约 -2434m 。

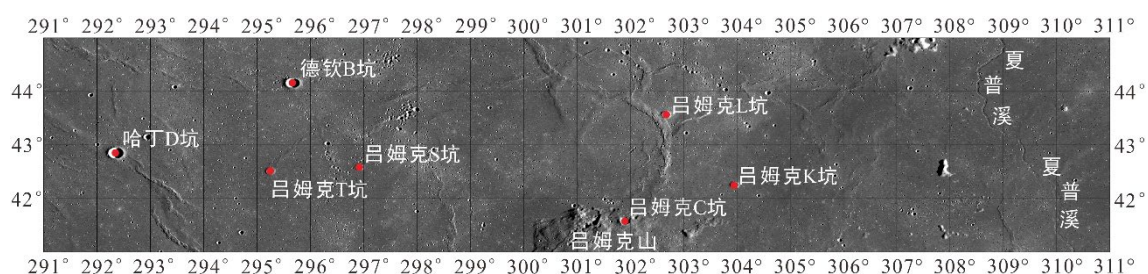


图 3.1 嫦娥五号拟着陆区 TC Morning Map 影像

从拟着陆区 TC Morning Map 影像数据可以看出，月海玄武岩覆盖了拟着陆区大部分地区，仅在南部发育一火山穹丘构造，在东部出露少量疑似高地物质。

拟着陆区范围内具两种典型的线性构造， 69° - 66° W， 60° - 55° W 范围发育大量皱脊， 51.5° - 50° W 范围内的月溪由北向南贯穿整个区域。

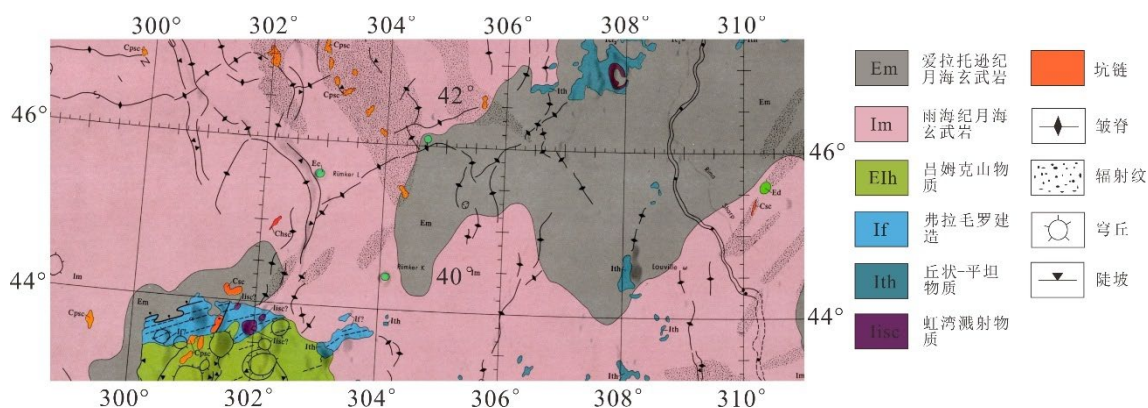


图 3.2 1:100 万吕姆克幅月球地质图局部^[26]

目前为止,1:100 万吕姆克幅月球地质图是该地区比例尺最大的地质图(图 3.2)。Scott 等人^[26]在吕姆克幅月球地质图中基于 LO 获得的影像数据,按行星反射率、颜色和撞击坑分布等的不同将拟着陆区玄武岩划分为 Em 和 Im 两个地质单元。其中 Im 为雨海纪地层单元,具较高的行星反射率(0.085-0.097)和较大的撞击坑密度,整体发暗红色;Em 为爱拉托逊纪地层单元,行星反射率较小(0.080-0.085),发蓝色。Scott 等人^[26]将疑似高地物质划归为 Ith 单元,Page 等人^[38]认为其可能与阿尔卑斯建造相似,是雨海盆地的溅射物。

Scott 等人^[26]还在该地区识别出来大量辐射纹物质,拟着陆区中西部的辐射纹呈北西-南东走向,可能来源于毕达哥拉斯撞击坑的溅射物,东部辐射纹呈北东-南西走向,来源未知。

从该地质图地质单元的切割覆盖关系可以分析得到该地区至少经历了两期月海玄武岩事件,主要的玄武岩活动集中在雨海纪,形成的月海玄武岩覆盖了拟着陆区西北部地区,爱拉托逊纪时又有少量月海玄武岩喷发,并覆盖在雨海纪月海玄武岩之上。

3.2 拟着陆区地形分析

3.2.1 高程分析

本文基于 KAGUYA TC DTM 数据,建立了嫦娥五号拟着陆区数字高程模型(图 3.3),并将其覆盖在拟着陆区山体阴影图之上。从该图可以看出着陆区整体地势较为平坦,平均海拔约-2434m,最高处位于吕姆克山地区,高度约-1350m,最低处位于大型撞击坑中部,高度约-3300m,大部分地区高度低于-2200m。

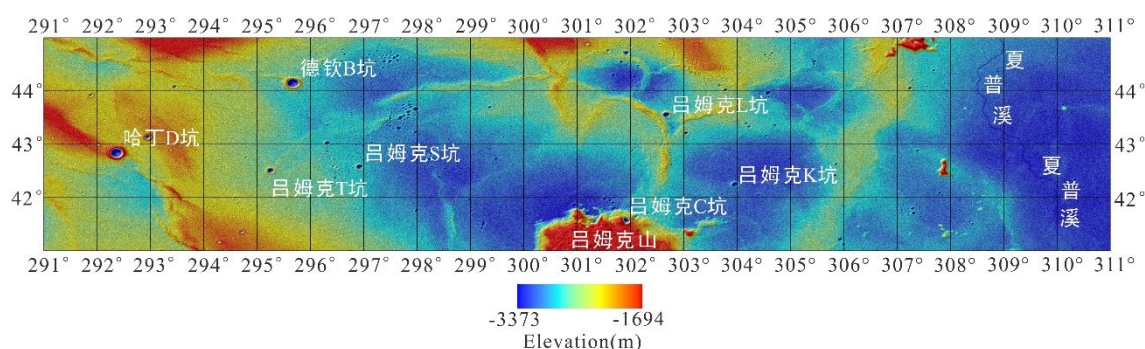


图 3.3 嫦娥五号拟着陆区地形图(附录 2)

如果以 43°N 纬线为剖面线 AA' ，则可以得到拟着陆区地形剖面图 3.4。

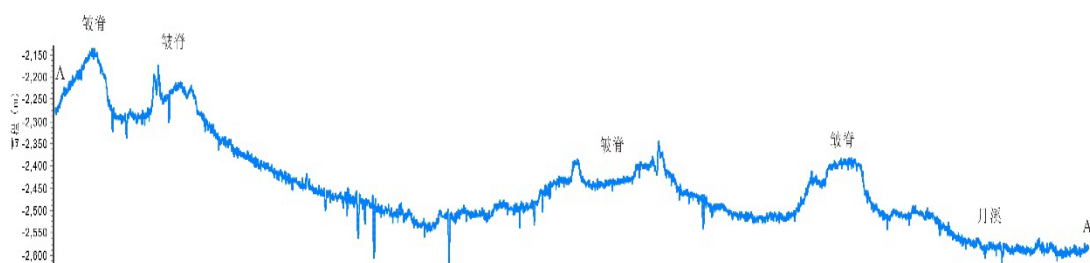


图 3.4 嫦娥五号拟着陆区 AA' 地形剖面图

从拟着陆区数字高程模型和 AA' 地形剖面图可以看出，拟着陆区高度由西往东逐渐降低，按高度变化大致可以划分为西、中、东三个高度单元。月海玄武岩发育地区高度多在 -2550m 到 -2150m 之间，高差不到 500m ；皱脊发育地区比周围月海区域大约高 $100\text{-}200\text{m}$ 。

3.2.2 坡度分析

嫦娥五号拟着陆区坡度特征如图 3.5 所示，由该图可以看出拟着陆区坡度大多不到 3° ，坡度 $5\text{-}10^{\circ}$ 的地区基本都在撞击坑或二次坑边缘，坡度 10° 以上的地区基本都在大型撞击坑边缘。皱脊在坡度图上表现为线状低坡度带，顶部较为平坦，坡度大多在 2° 以下。高地物质和吕姆克山突出于周围月海玄武岩物质，具中等坡度。吕姆克山北部坡度较大，可达 $3\text{-}5^{\circ}$ 。

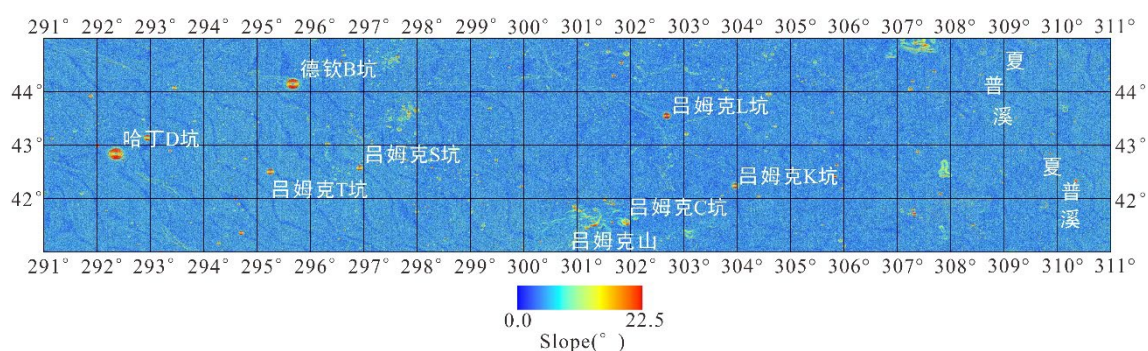


图 3.5 嫦娥五号拟着陆区坡度图（附录 3）

3.3 拟着陆区重要地质特征解译

3.3.1 概述

行星表面地貌单元是行星所受内外力作用的反映，研究行星表面地形地貌是认识行星地质演化过程的重要手段。

通过拟着陆区融合山体阴影图（图 3.6）可以看出拟着陆区主要有撞击坑、皱脊、月溪、穹丘等几个重要的构造和地貌单元，其具体特点将在下文中描述。

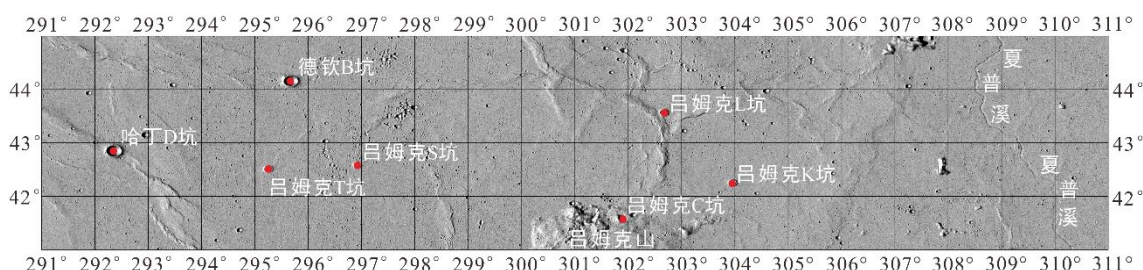


图 3.6 嫦娥五号拟着陆区山体阴影图

3.3.2 撞击坑

撞击坑是类地行星上最为显著、发育最为广泛的构造，撞击坑分布及形态研究对揭示月球表面性质和早期演化历史尤为重要。

本文通过 ARCGIS 的 Crater Helper 插件对拟着陆区大于 500m 的撞击坑进行了统计。

统计结果表明，拟着陆区共有大于 500m 的撞击坑 2407 个，大部分撞击坑都在 1km 以下，仅有 25 个撞击坑大于 2km。德钦 B 撞击坑和哈丁 D 撞击坑是拟着陆区范围内最大的两个撞击坑，直径可以达到 6km，其余所有撞击坑直径都在 3.3km 以下。

如果以每百米为界，统计撞击坑的频数并按撞击坑大小顺序作图就可以得到图 3.7 所示的拟着陆区撞击坑直径-频数分布图。由该图可以看出随着撞击坑直径的增加，撞击坑数量快速减少，仅有少量撞击坑直径大于 2km。

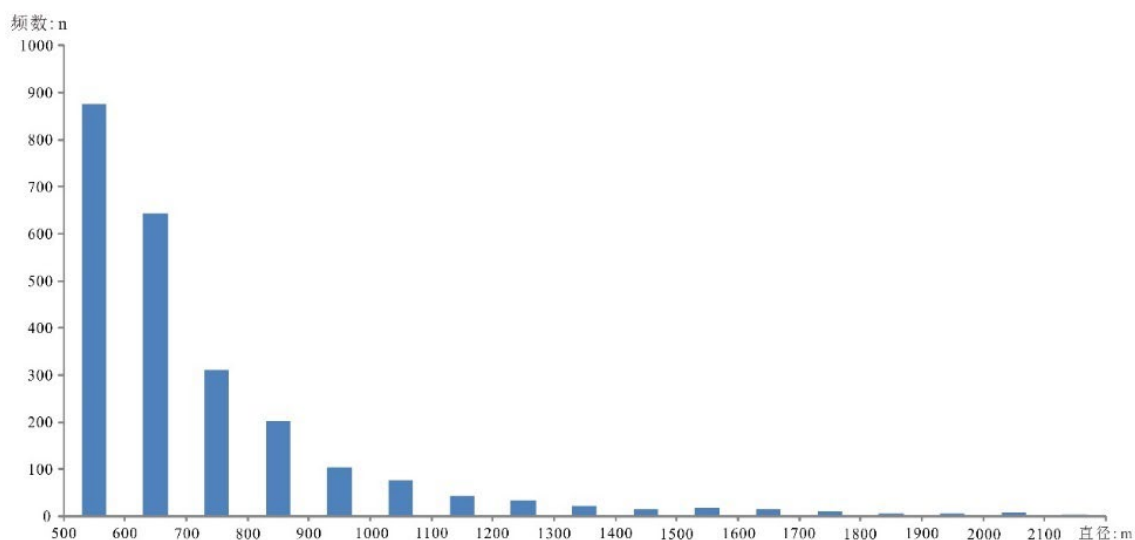


图 3.7 嫦娥五号拟着陆区撞击坑直径-频数分布直方图

如果将统计结果表示在 TC Morning Map 图上, 以不同颜色代表不同直径的撞击坑, 就可以得到图 3.8 所示的较大撞击坑分布图。

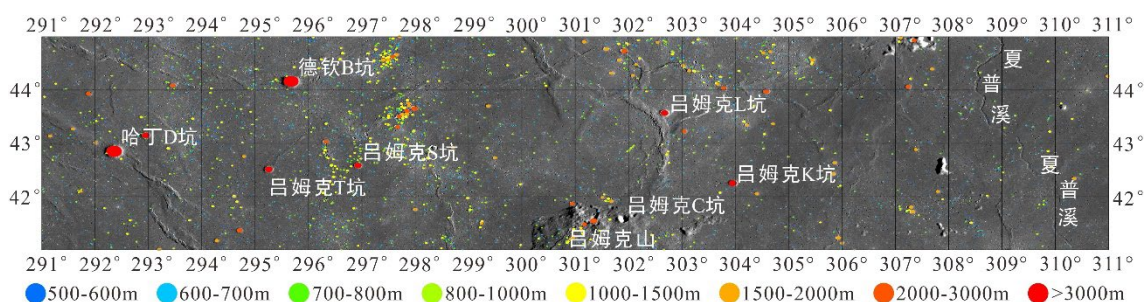


图 3.8 嫦娥五号拟着陆区 500m 以上撞击坑分布 (附录 4)

3.3.3 皱脊

皱脊是广泛发育在月海地区的线性突起构造, 其下部较为宽缓, 上部较为陡峭, 顶部较为平坦, 沿延伸方向常发生弯曲^[39], 皱脊形成可能受构造或岩浆作用控制, 但目前并没有统一认识^[39]。

着陆区发育了大量皱脊构造, 对地形产生很大影响, 本文中对着陆区皱脊分布进行了统计, 得到了着陆区皱脊分布图 (图 3.9)。

从皱脊分布图可以看出，皱脊主要发育在拟着陆区西部地区，53°W 以东地区仅有少量小型皱脊发育。经度范围在 69-65°W 的皱脊主要为北西-南东向；62-55°W 的皱脊在着陆区中部近似呈 120°汇聚；55°W 以东地区皱脊主要为北北东-南南西向。

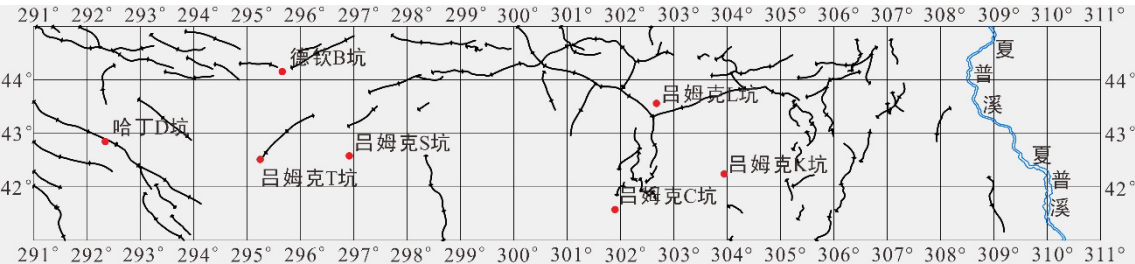


图 3.9 嫦娥五号拟着陆区皱脊分布图（附录 5）

本文中还对皱脊的形态特征进行了研究。图 3.10 是拟着陆区中部一典型皱脊的高分辨率 NAC 影像，空间分辨率为 50cm。图 3.11 是基于 KAGUYA TC DTM 绘制的四个典型皱脊剖面图，剖面长度均取 10km，剖面 BB'是以图 3.11 中 BB'为剖面线绘制所得。

结合嫦娥五号拟着陆区坡度图（图 3.5）和图 3.10 可以看出，皱脊整体坡度不大，大多在 5°以下，在皱脊缓坡底部常有石块分布，是钻探取样需要避免的地点。

从图 3.11 可以看出，皱脊大多一侧平缓，一侧陡峭，皱脊顶部大多平坦，高于两侧底部约 100m。

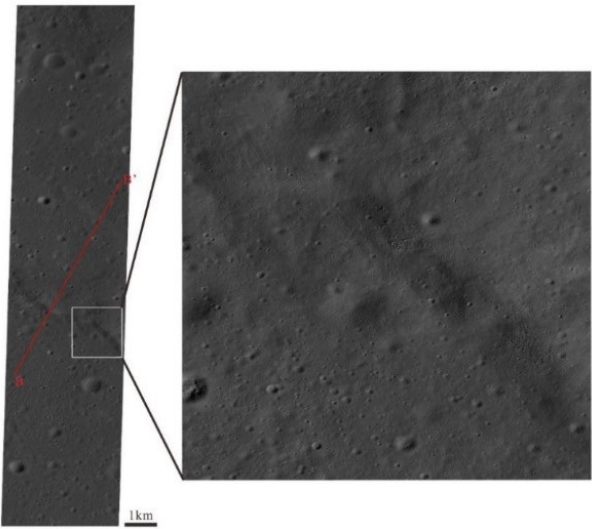


图 3.10 嫦娥五号拟着陆区典型皱脊影像

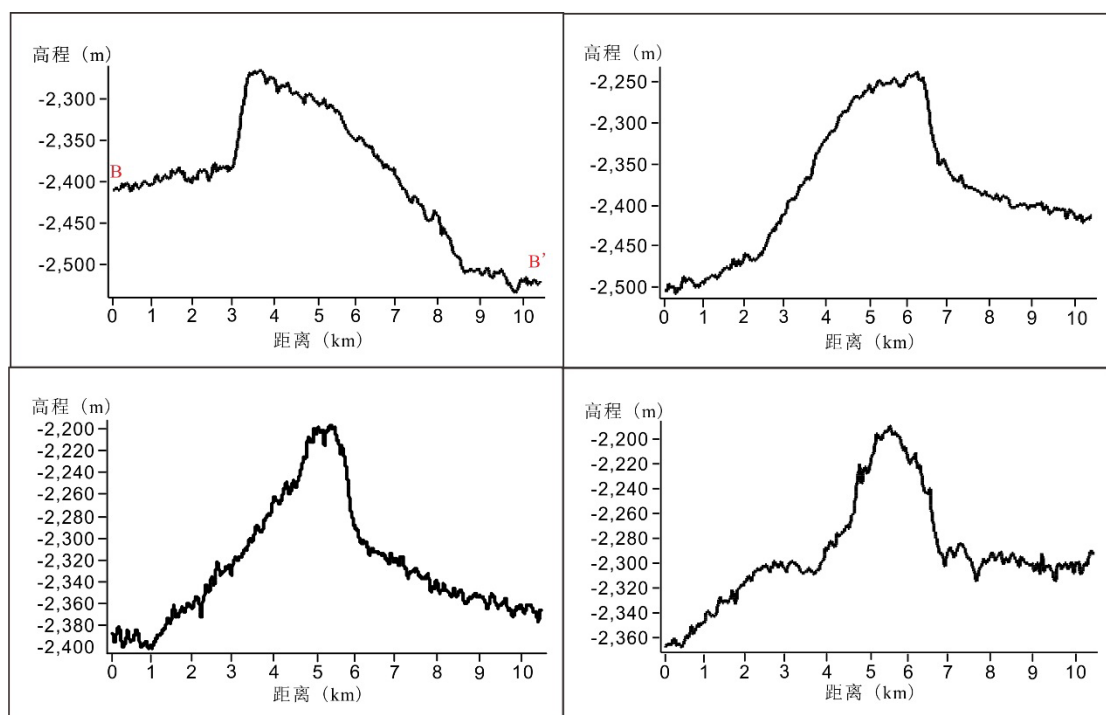


图 3.11 嫦娥五号拟着陆区皱脊典型地形剖面图

3.3.4 夏普溪

月溪是月球表面线状的凹谷，可能是熔岩流动冲刷产生的沟谷^[40]，由北向南贯穿拟着陆区的夏普溪是月球上最典型的月溪之一。

夏普溪起源于拟着陆区北部的露湾，在拟着陆区内多次拐弯，属蜿蜒型月溪。从拟着陆区月溪地区山体阴影图和 TC DTM 影像（图 3.12）可以看出夏普溪位于拟着陆区东部，经度跨度 $51.5-49.4^{\circ}\text{W}$ ，由北向南穿过拟着陆区，在着陆区范围内全长约 150km，平均宽约 1.1km，最窄处约 0.8km，最宽处约 2.2km，夏普溪底部距月表最深约 50m，最浅约 20m。

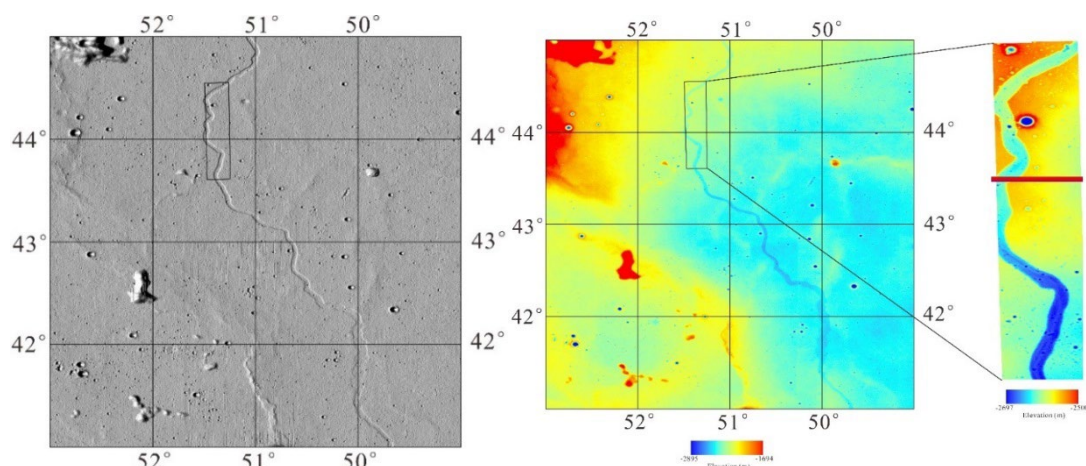


图 3.12 嫦娥五号拟着陆区月溪地区山体阴影图和 TC DTM 影像

除了 KAGUYA 影像之外, LRO NAC 影像也覆盖了夏普溪的局部地区。图 3.12 中黑框所圈范围就有 NAC DTM 影像和其所对应的高分辨率 NAC 影像, 为研究夏普溪的局部特征和剖面形态提供了条件。

图 3.13 是基于 NAC DTM 影像所绘的夏普溪典型剖面图。从该图可以看出, 在拟着陆区范围内夏普溪形态较为稳定, 其底部宽约 0.8-1km, 深约 50m, 与月表一样也发育大量撞击坑。其两壁较为陡峭, 从 NAC 影像上可以看到, 底部靠近两壁处具大量大石块, 可能为滚落产生。

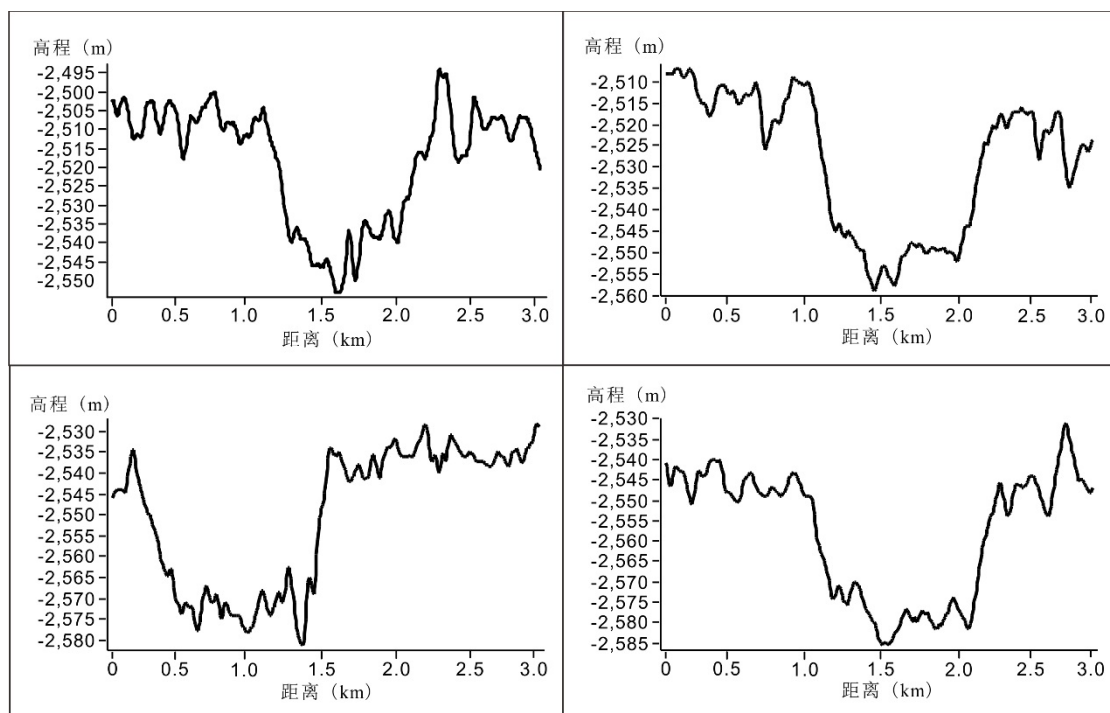


图 3.13 夏普溪典型地形剖面图

3.3.5 吕姆克山

嫦娥五号拟着陆区范围内主要有两个火山穹丘建造，分别是着陆区南部的吕姆克山和着陆区东北部的小型火山穹丘。

吕姆克山有时也称为吕姆克穹丘，是位于嫦娥五号拟着陆区中南部，以若干个穹丘为主体组成部分的环形构造（图 3.14）。从图 3.14 可以清楚地看出吕姆克山整体呈环形，直径约 65-75km，由西南往东北高度逐渐降低，最高约-1276m，西北发育一线状构造带，线理呈北东-南西向，线性构造带撞击坑密度较吕姆克山其他地区低。

从嫦娥五号拟着陆区坡度图（图 3.5），吕姆克山地区大部分区域坡度小于 3°，北部线状构造带大约为 5-10°，仅吕姆克 C 撞击坑的坑壁坡度可达 10°以上。

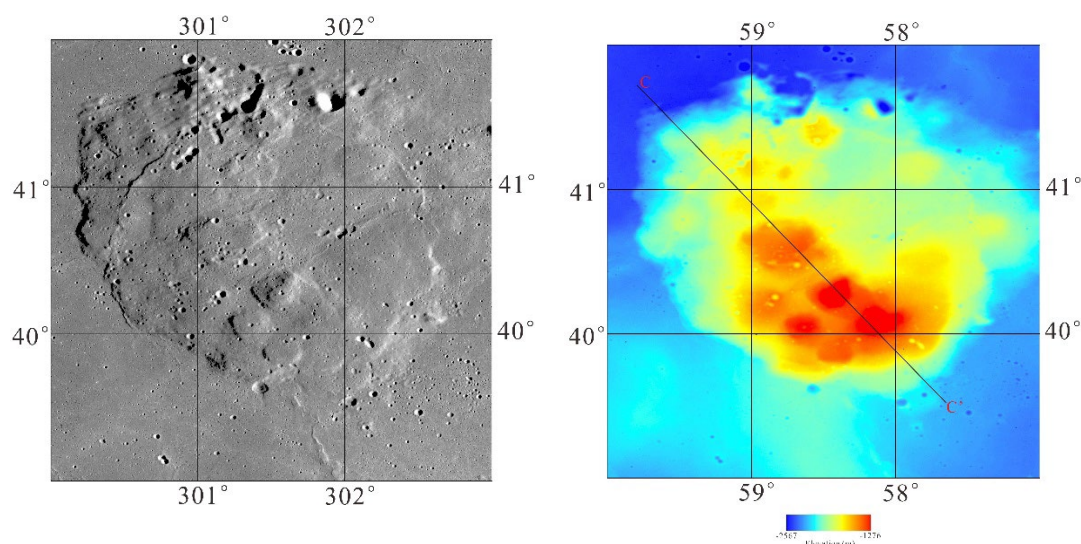


图 3.14 吕姆克山地区 TC Morning Map 影像及 TC DTM 影像

基于 KAGUYA TC DTM 数据，以 CC'为剖面线，可得吕姆克山地区地形剖面图（图 3.15），该剖面长约 83km，横切了吕姆克山三个最大的穹丘构造。从该剖面图中可以看出这吕姆克山比周围月海物质大约高 1300m，内部穹丘则比周围非穹丘物质高 300-500m，穹丘之间宽缓过渡，18-25 km 存在一高度几乎不变的平台。

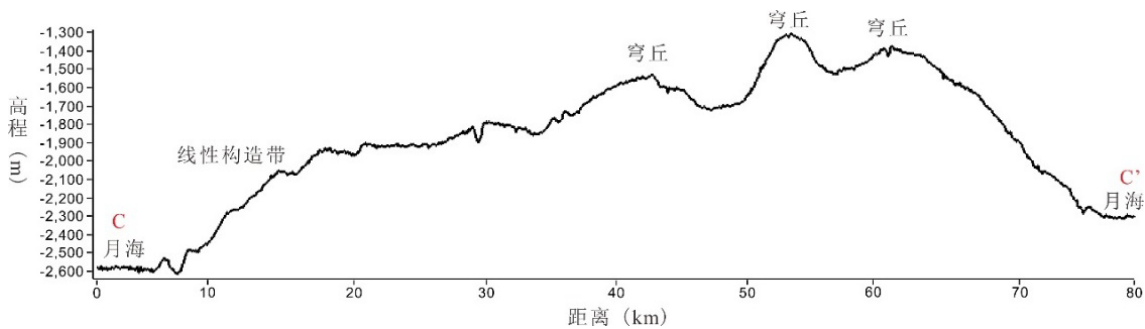


图 3.15 吕姆克山地区 CC'地形剖面图

Scott 等在进行 1:100 万吕姆克幅月球地质图填图时曾对吕姆克山的地质单元进行了划分（图 3.16）^[26]。Scott 等将吕姆克山的主体部分划归为 Elh 单元，即吕姆克山物质，将北部线状构造单元和东北部伸入月海的构造划归为弗拉毛罗建造，并在吕姆克山范围内识别出 16 个较大的火山穹丘构造^[26]。

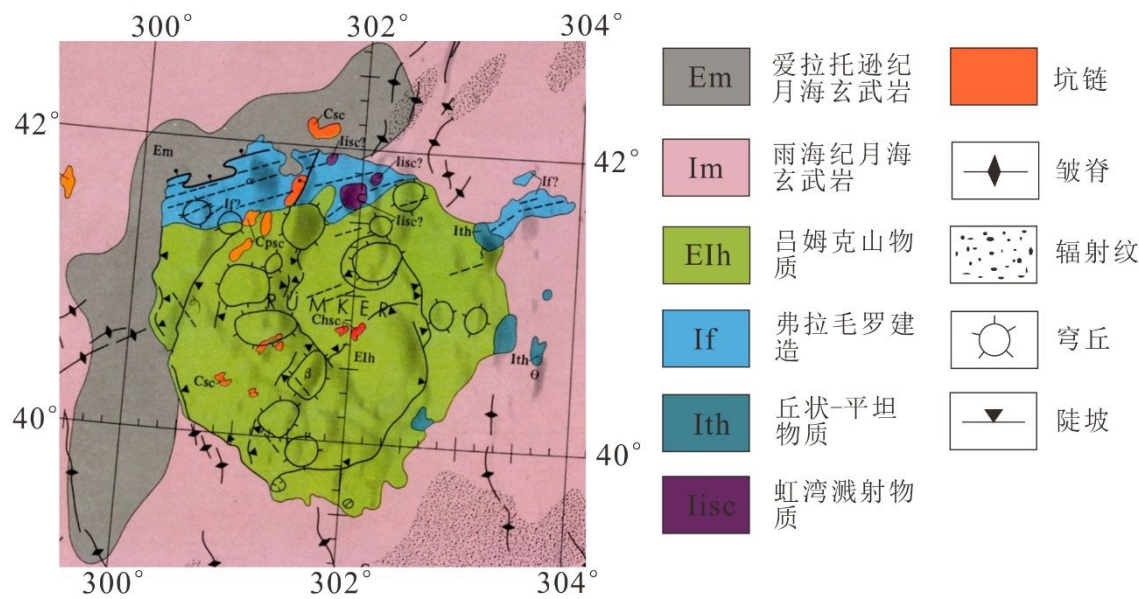


图 3.16 吕姆克山地区地质图^[26]

3.4 拟着陆区物质成分分析及地质单元划分

3.4.1 铁钛元素含量分析

由于月海玄武岩是嫦娥五号拟着陆区最主要的岩石类型，铁钛元素含量是划分月海玄武岩类型最重主要的依据。本文基于 Lucey 等提出的铁钛元素反演算法^[33]（见 2.2.2 小节）反演了嫦娥五号拟着陆区的铁钛元素含量，得到了拟着陆区铁钛元素丰度图（图 3.17，图 3.19）。

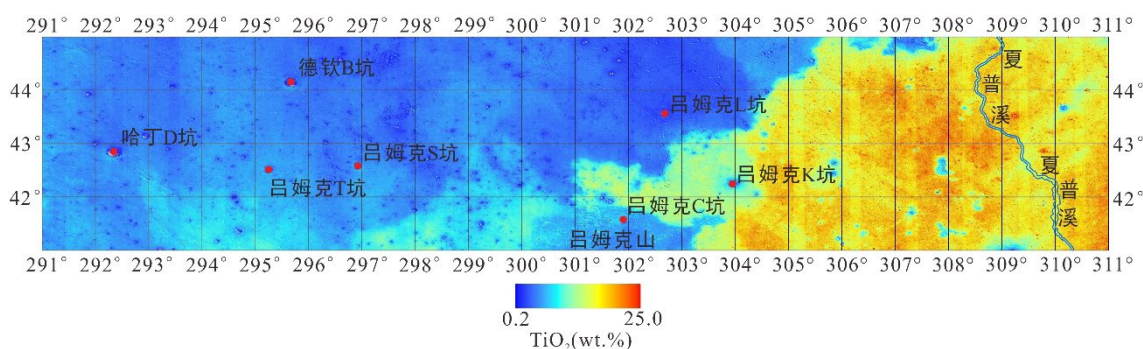
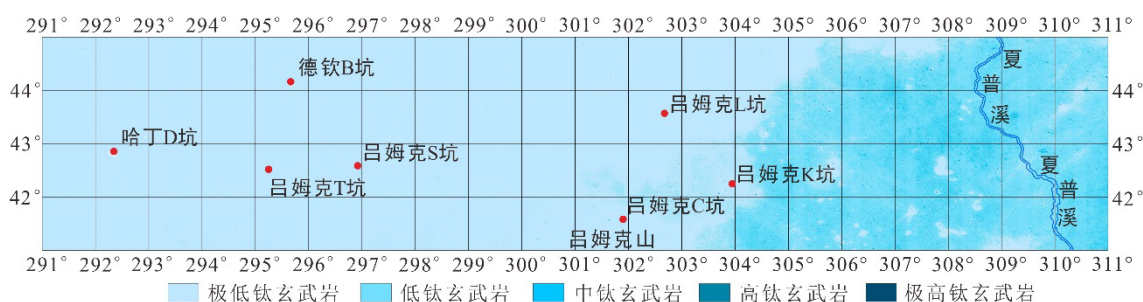


图 3.17 嫦娥五号拟着陆区 TiO_2 丰度图（附录 6）

从嫦娥五号拟着陆区 TiO_2 丰度图可以看出，以吕姆克山为界，嫦娥五号拟着陆区东西两侧 TiO_2 含量存在较大差异。拟着陆区西部地区 TiO_2 含量大多小于 2%，由北向南钛含量逐渐增加，最南端可以达到 2-3.5%，在吕姆克山以西地区达到最大值。

东部地区相对西部地区 TiO_2 含量更高，除高地物质和撞击坑边缘可能小于 3.5% 以外，其余地区大多在 4-7% 之间，少部分地区可以达到 7-8%。拟着陆区西部地区与东部地区之间存在一广泛的过渡地带， TiO_2 含量介于 3-4% 之间，在吕姆克山以北地区伸入西部地区。

相对于地球玄武岩，月海玄武岩最大的特征是 TiO_2 含量变化较大，且蕴含丰富的成因演化信息^[16]，因此常以 TiO_2 含量作为划分月海玄武岩的依据。如果 4%，6%，9% 和 11% 作为划分极低钛、低钛、中钛、高钛和极高钛玄武岩的边界^[12, 14, 41]，可以得到拟着陆区月海玄武岩分布图（图 3.18）。



3.18 嫦娥五号拟着陆区玄武岩分布图（附录 8）

从图 3.19 可以看出拟着陆区西部单元主要为极低钛玄武岩，占拟着陆区面积的 3/4，东部单元为低钛和中钛玄武岩，占拟着陆区面积的 1/4，西部极低钛玄武岩与东部中低钛玄武岩之间界线清晰。

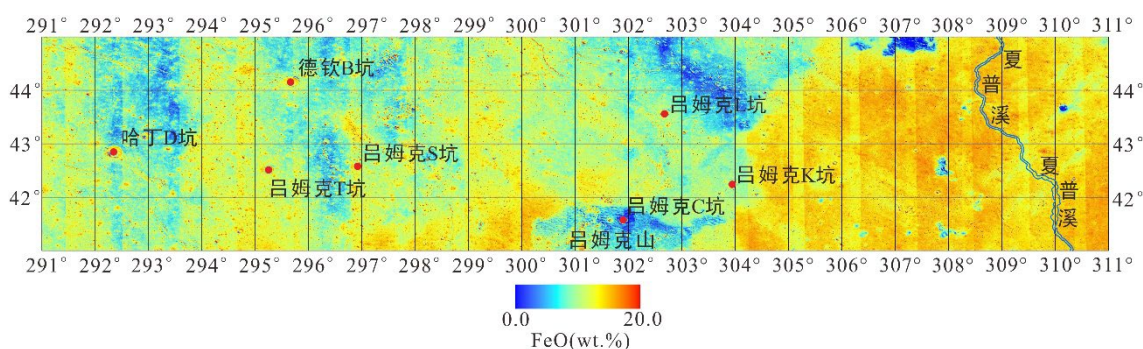


图 3.19 嫦娥五号拟着陆区 FeO 丰度图（附录 7）

在嫦娥五号拟着陆区 FeO 丰度图中依然可以识别出东西两个单元。西部地区 FeO 含量存在一定变化，中、低 FeO 单元相间分布，FeO 含量从南往北逐渐增加。中 FeO 地区 FeO 含量介于 16.0-16.8%之间，在吕姆克山以西地区达到最大值 17.2%；低 FeO 单元 FeO 含量介于 13-15.5%之间，在西部地区东北部达到最小值。东部地区 FeO 含量较为稳定，除高地地区外，其余地区均富铁，FeO 含量介于 16.5-17.5%之间，在东部地区中心略富集。

除铁钛元素丰度图外，拟着陆区假彩色影像也能反应拟着陆区的元素组成特征（图 3.20），该图以 750nm/415nm 为红通道，750nm/950 nm 为绿通道，415/750nm 为蓝通道。

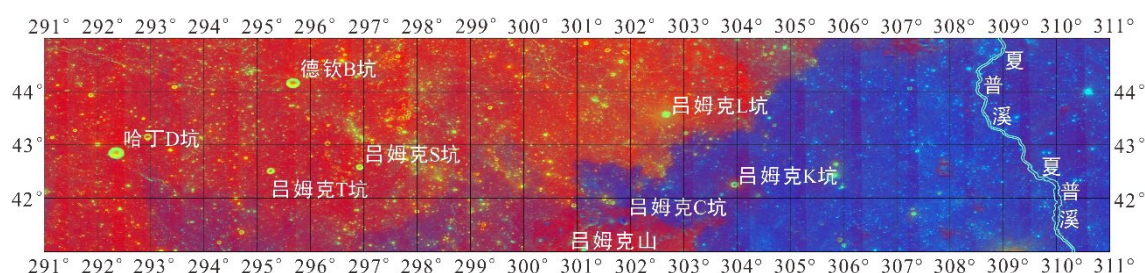


图 3.20 嫦娥五号拟着陆区假彩色影像（附录 9）

从拟着陆区假彩色影像可以看出，着陆区东西单元之间界线清晰，东部地区以蓝紫色调为主，指示其具富钛特征；西部地区以橙红色调为主，指示其钛含量较低。西部地区的橙红色调也可能叠加了较高成熟度带来的红色色调。拟着陆区东部地区和西部地区都发育大量黄、黄绿色的撞击坑物质，西部地区撞击坑数量较多，直径较大，指示其较老的地质年龄。吕姆克山在假彩色影像中呈暗红色，指示其为具较高玻璃质含量的火山岩。

综上所述，拟着陆区西部地区主要为极低钛中低铁月海玄武岩，拟着陆区东部地区主要为中低钛高铁月海玄武岩，拟着陆区中部过渡地区主要为极低钛低钛中铁月海玄武岩，吕姆克山地区主要为富玻璃质火山岩，高地地区可能为低钛低铁高地斜长岩。

3.4.2 地质单元划分

通过以上分析可以看出，拟着陆区东西两个单元在物质组成、撞击历史、地质年龄、玄武岩厚度等方面存在重大差异，因而可以将其划分为 Region1 和 Region3 两个地质单元。其中 Region1 为极低钛中低铁月海玄武岩，形成早、面积广、厚度大；Region3 为中低钛高铁月海玄武岩，形成晚、厚度小。

根据地质单元的切割和覆盖关系，Region3 地区月海玄武岩覆盖在 Region1 极低钛月海玄武岩之上，其过渡区域与 Region3 和 Region1 玄武岩均存在一定差异，可以作为 Region2 单元。

在吕姆克山以西存在一高铁、低撞击坑密度的区域，与周围地区在物质组成、年龄等方面差异较大，可以作为 Region4 单元。

东部单元内还发育少量低钛低铁突起物质，初步推测其为受月海玄武岩物质混染的高地物质，可将其划分为 Hm 单元。

除此以外，Region3 地区内部的小型环状穹丘和吕姆克山是拟着陆区内最显著地火山构造，可以将其划分为 Dm 和 Rm 地质单元。

综上所述，拟着陆区可以划分为 7 个主要的地质单元（表 3.1）。

表 3.1 嫦娥五号拟着陆区地质单元划分及依据

地质单元	钛含量	铁含量	岩性	撞击坑密度
Region1	极低钛	中低铁	极低钛玄武岩	大
Region2	极低钛低钛	中铁	极低钛低钛玄武岩	小
Region3	中低钛	高铁	中低钛玄武岩	小
Region4	极低钛	高铁	极低钛玄武岩	小
Rm	极低钛	低铁	富玻璃质火山岩	/
Hm	极低钛	低铁	高地斜长岩	/
Dm	极低钛	低铁	火山岩	/

本文的地质单元划分方案如图 3.21 所示：

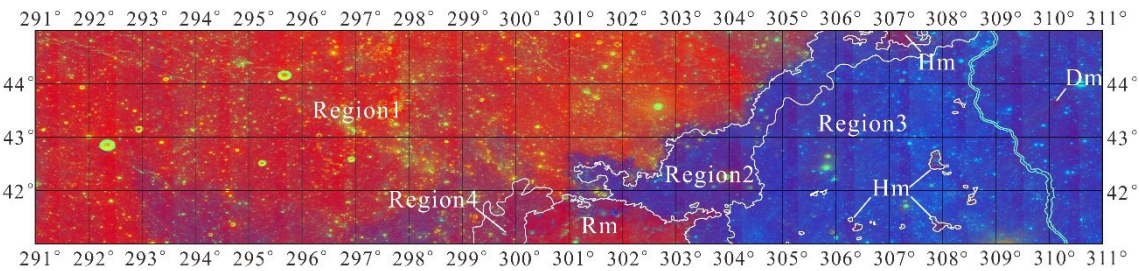


图 3.21 嫦娥五号拟着陆区地质单元划分

本文的划分方案与 Hiesinger 等基于 Clementine 假彩色影像的划分方案较为一致^[20, 28, 42]，其中 Region2 和 Region3 代表 Hiesinger 划分方案中的 P10，Region1 代表 Hiesinger 划分方案中的 P58。

3.5 拟着陆区模式年龄

撞击坑大小-频率分布定年法是目前为止进行行星表面定年的唯一方法，该方法的原理可以概括为：行星表面自形成以来，不断遭受着撞击作用，越老的区域具有越高的撞击坑密度。基于这个原理可以使用累积分布法和相对分布法计算行星表面年龄^[43]。

本文基于月亮女神号 TC Morning Map 数据（空间分辨率为 10m），使用 ARCGIS 的 Cratertools 插件^[44]对拟着陆区进行了撞击坑统计，统计时尽量避开了二次撞击坑集中、辐射纹覆盖或皱脊发育的地区。由于当二次撞击坑直径较小时很难与原始坑区分开来，因此本文中只对直径大于 150m 的撞击坑进行了统计。

为了限定拟着陆区不同单元的模式年龄，本文首先统计了 Region1 和 Region3 地区大于 300m 的撞击坑并通过 craterstats2 专业分析软件^[45]对统计结果进行了分析，基于 Neukum 等提出的撞击坑产生函数和年代函数进行了累积分布法定年^[46]。

参与统计的区域及定年结果如图 3.22、3.23 和表 3.2 所示。

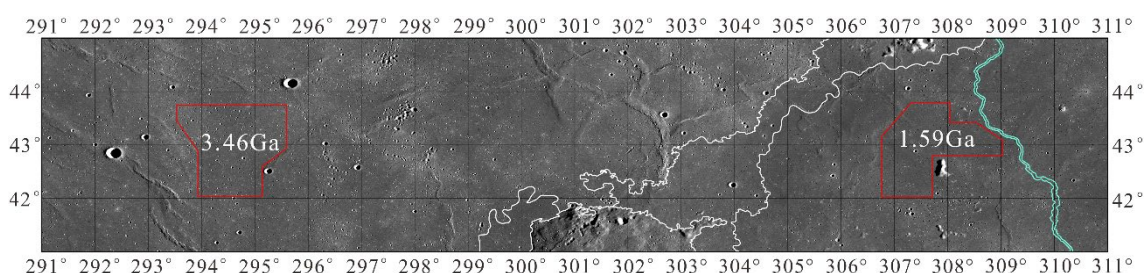


图 3.22 拟着陆区 300m 以上撞击坑统计区域及定年结果

表 3.2 拟着陆区 300m 以上撞击坑定年结果

区域	面积(km ³)	撞击坑总数	定年结果	年代单位
Region1	1835.59	555	$3.46^{+0.02}_{-0.02}$ Ga	I ₂
Region3	1584.53	357	$1.59^{+0.08}_{-0.08}$ Ga	E ₂

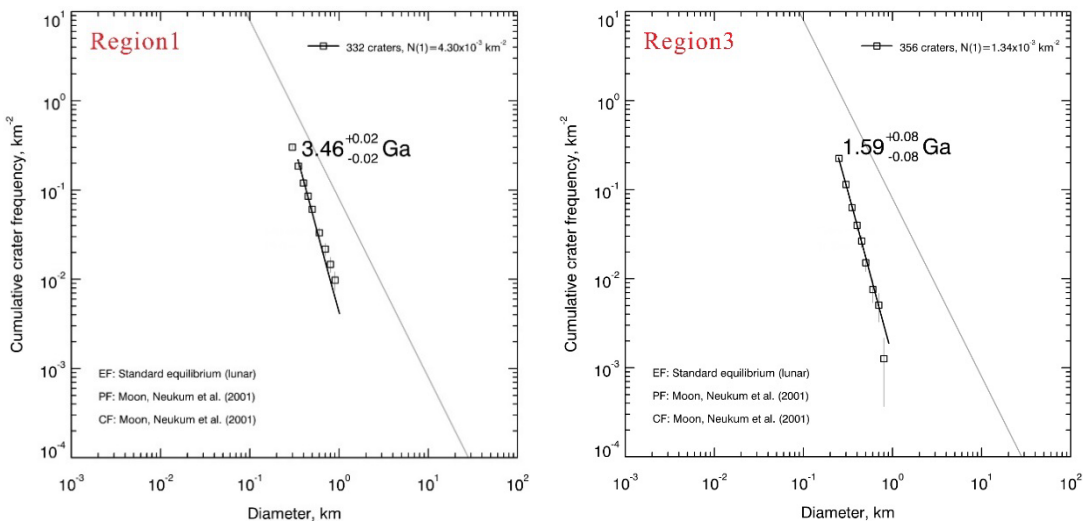


图 3.23 拟着陆区 300m 以上撞击坑累积分布曲线

为了进一步限定各个地质单元内部年龄，本文对各主要地质单元内部区域大于 150m 的撞击坑进行了统计。统计过程中同样排除了明显二次撞击坑。

参与统计的区域及定年结果如图 3.24、3.25 和表 3.3 所示：

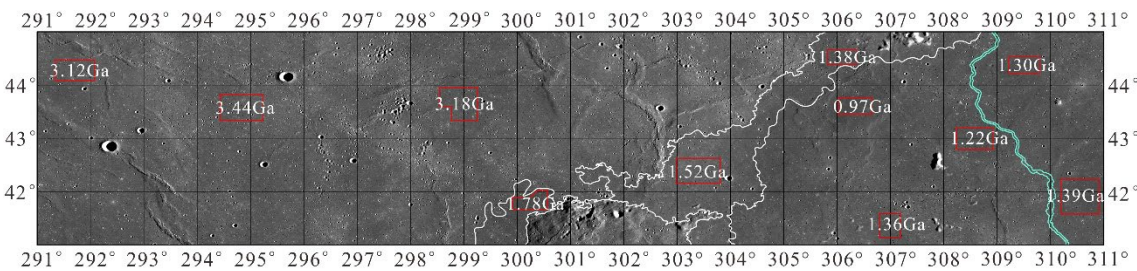
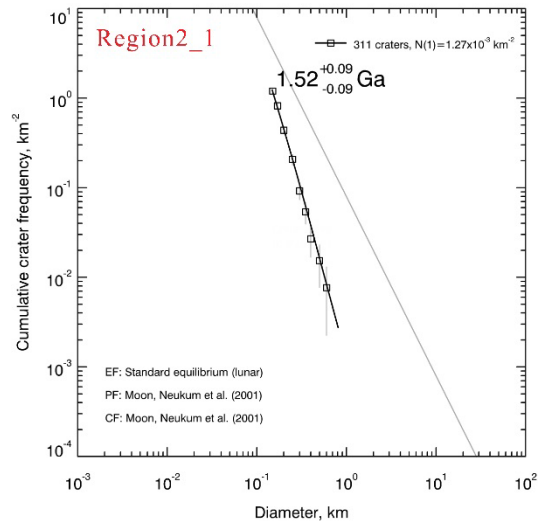
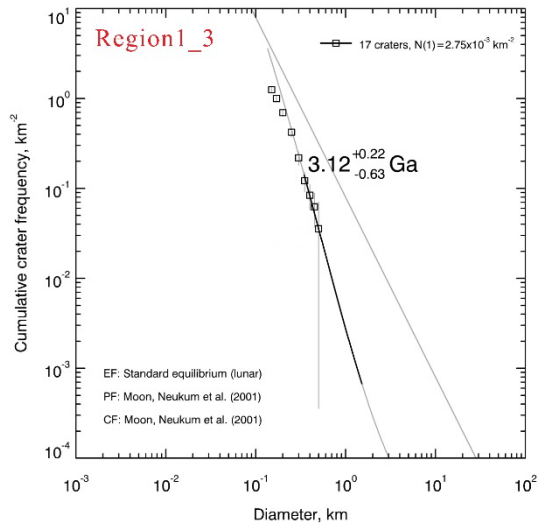
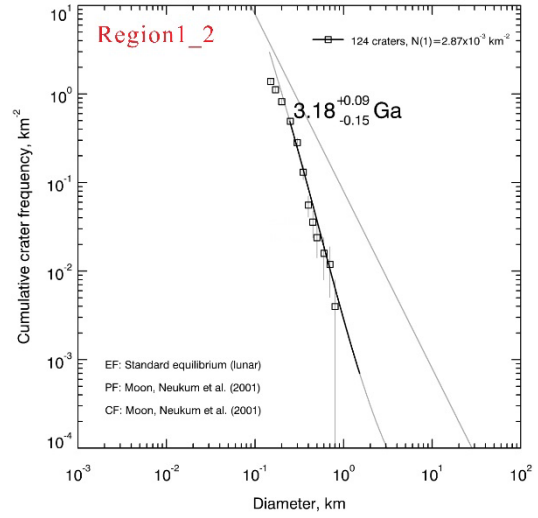
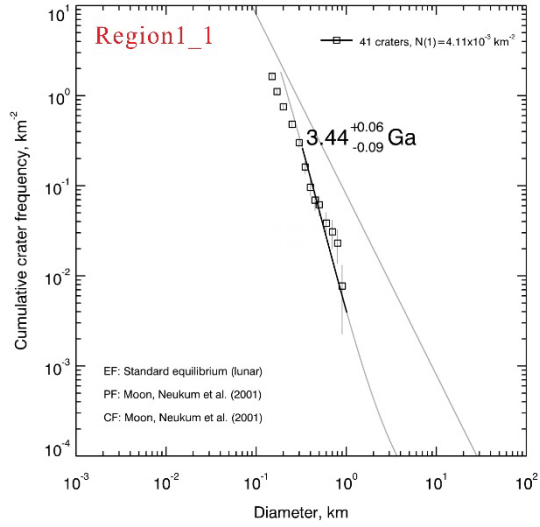


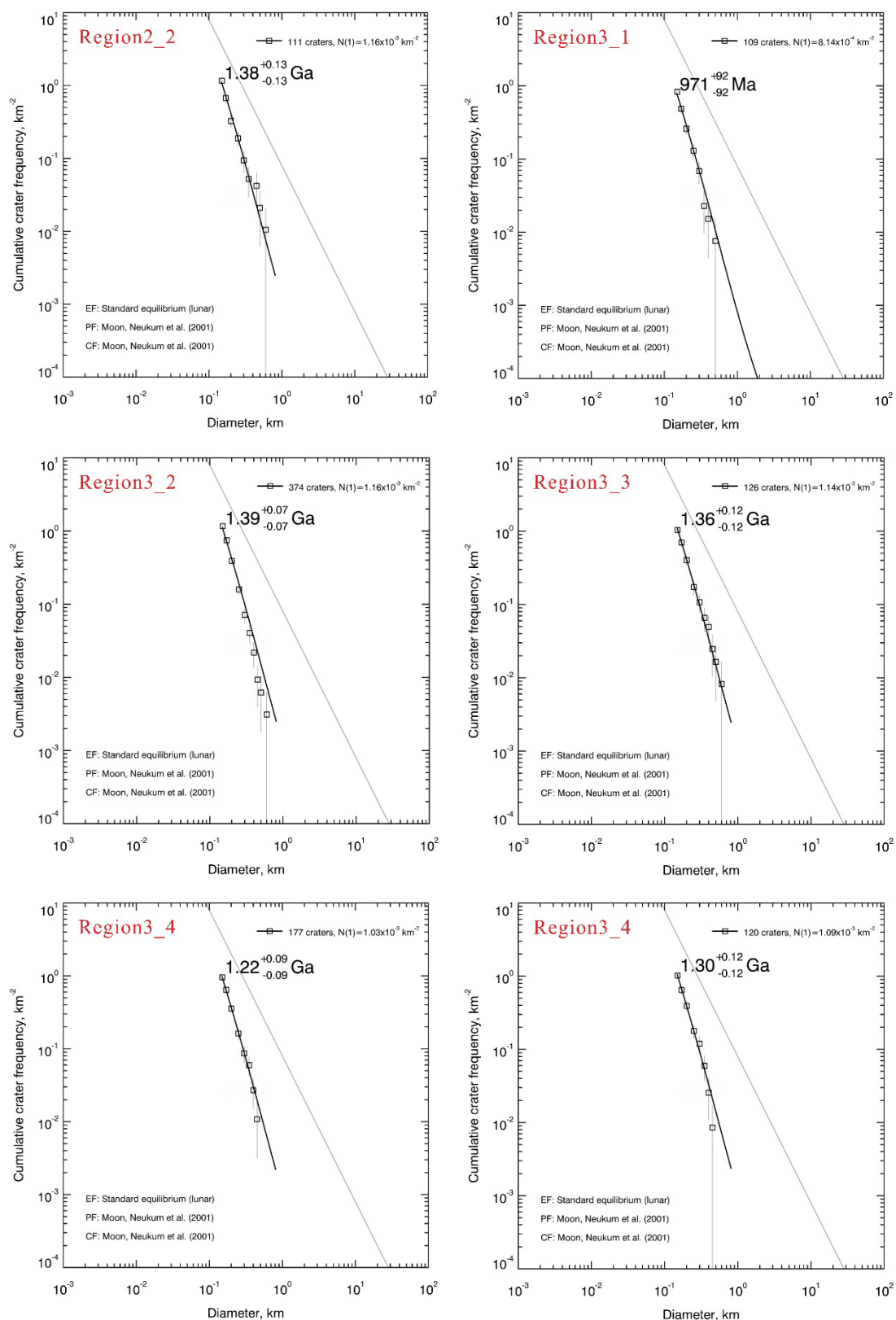
图 3.24 拟着陆区 150m 以上撞击坑统计区域及定年结果

表 3.3 拟着陆区 150m 以上撞击坑定年结果

区域	面积(km ³)	撞击坑总数	定年结果	年代单位
Region1_1	259.49	424	3.44 ^{+0.06} _{-0.09} Ga	I ₂
Region1_2	251.68	349	3.18 ^{+0.09} _{-0.15} Ga	I ₂
Region1_3	186.11	228	3.12 ^{+0.22} _{-0.63} Ga	E ₁
Region2_1	260.66	312	1.52 ^{+0.09} _{-0.09} Ga	E ₂
Region2_2	95.18	111	1.38 ^{+0.13} _{-0.13} Ga	E ₂
Region3_1	131.40	109	971 ⁺⁹² ₋₉₂ Ma	E ₂
Region3_2	320.58	374	1.39 ^{+0.07} _{-0.07} Ga	E ₂
Region3_3	121.21	126	1.36 ^{+0.12} _{-0.12} Ga	E ₂
Region3_4	184.55	177	1.22 ^{+0.09} _{-0.09} Ga	E ₂

区域	面积(km ³)	撞击坑总数	定年结果	年代单位
Region3_5	117.30	120	$1.30^{+0.12}_{-0.12}$ Ga	E ₂
Region4_1	124.82	179	$1.78^{+0.13}_{-0.13}$ Ga	E ₂





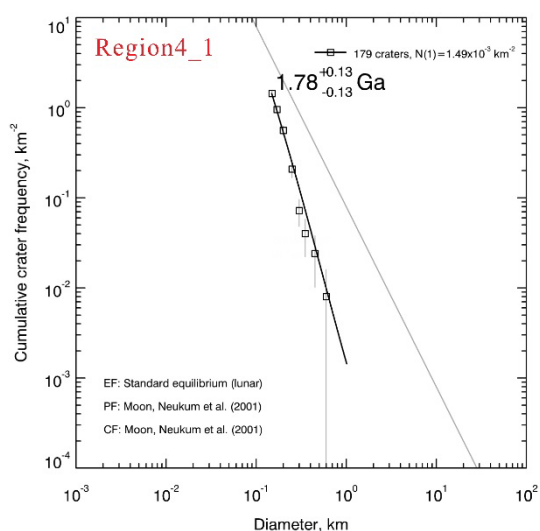


图 3.25 拟着陆区 150m 以上撞击坑累积分布曲线

综上所述，本文认为 Region1 地区年龄约 3.46Ga。尽管二次撞击坑会对小型撞击坑的统计产生影响，但对 Region1 地区大于 150m 以上撞击坑的统计结果都表明 Region1 为晚雨海世地质单元。

本文对大于 300m 以上撞击坑的统计表明 Region3 地区年龄为 1.59Ga，而对大于 150m 以上撞击坑统计得到的年龄差异较大，最小为 971Ma，最大为 1.39Ga，差值达 4 亿年。由于对较大撞击坑的统计可以有效排除二次坑的影响，因此本文采用对 300m 以上撞击坑统计所得的年龄值代表 Region3 地区的年龄。

本文通过对大于 150m 撞击坑的统计得到 Region4 地区年龄约 1.78Ga，该年龄明显小于其周围地区，与其较低的撞击坑密度特征相符。

表 3.4 归纳了拟着陆各个地质单元的地质年龄及地质代号，其中吕姆克山地区年龄来自 Scott 等人研究^[26]，高地单元年龄为基于区域演化特点给出的推测值。

表 3.4 嫦娥五号拟着陆区主要地质单元模式年龄及地质代号

地质单元	地质年龄 (Ga)	地质代号
Region1	3.46	I2m
Region2	1.48	E2m
Region3	1.59	E2m
Region4	1.78	E2m
吕姆克山	<3.4	Rm
高地单元	>3.8	Hm

Hiesinger 等在划分地质单元的同时也曾对相关单元进行了定年，其得到 P10 年龄约 3.44Ga，P58 年龄约 1.33Ga^[20, 28, 47]。Morota 等采用相同的地质单元划分方案，通过 KAGUYA 数据得到的年龄分别为 3.46Ga 和 1.91Ga^[29]。本文的年龄结果与 Hiesinger 和 Morota 等的结果较为一致。

3.6 本章小结

本章主要利用月球影像数据、多光谱影像和地形数据对嫦娥五号拟着陆区的地形地貌、铁钛元素含量进行了分析，并划分了地质单元，对各个地质单元进行了年代学研究。本章主要结论如下：

(1) 拟着陆区地势平坦，平均高差不到 500m，大部分区域坡度在 3°以下，区域内主要发育撞击坑、皱脊、月溪、火山穹丘等构造。

(2) 拟着陆区可以划分为 7 个地质单元。Region1 地区主要为极低钛中低铁月海玄武岩，年龄约 3.46Ga，属晚雨海世地层单元；Region2 地区为 Region1 和 Region3 地区的过渡地区，属晚爱拉托逊世地层单元；Region3 地区主要为中钛高铁月海玄武岩，年龄约 1.56Ga，属晚爱拉托逊世地层单元；Region4 地区属低钛高铁月海玄武岩，年龄约 1.78Ga，属晚爱拉托逊世地层单元。此外，本文中将吕姆克山和高地斜长岩独立划分为两个地质单元。

(3) 拟着陆区主要经历了两期月海玄武岩事件和一期火山穹丘喷发事件。该地区主要的月海玄武岩喷发于晚雨海世，年龄约 3.46Ga，此次喷发形成了厚达数百米的极低钛月海玄武岩。第二期月海玄武岩喷发于 1.33-1.56Ga 之间的晚爱拉托逊世，此次喷发形成了厚约 50-100m 的中低钛月海玄武岩。晚爱拉托逊世中低钛月海玄武岩可能覆盖于晚雨海世极低钛低钛月海玄武岩之上，而中低钛和极低钛玄武岩可能都覆盖在高地物质之上。

吕姆克山地区的数个火山穹丘在晚雨海世-晚爱拉托逊世之间陆续喷发，形成了高达数百米的环形构造。

(4) 本文将拟着陆区上述撞击坑分布，皱脊分布，地质单元划分方案和定年结果综合归纳成了“嫦娥五号拟着陆区地质简图”（见附录 1）。

第四章 嫦娥五号拟着陆区月壤特性

4.1 月壤成分分析

对阿波罗样品的研究表明，月壤成分主要由下伏基岩决定，下伏基岩是月壤中大部分物质的来源，100km 以外的物质成分仅占不到 5%，1000km 以外物质对月壤成分影响可以忽略不计^[48]。

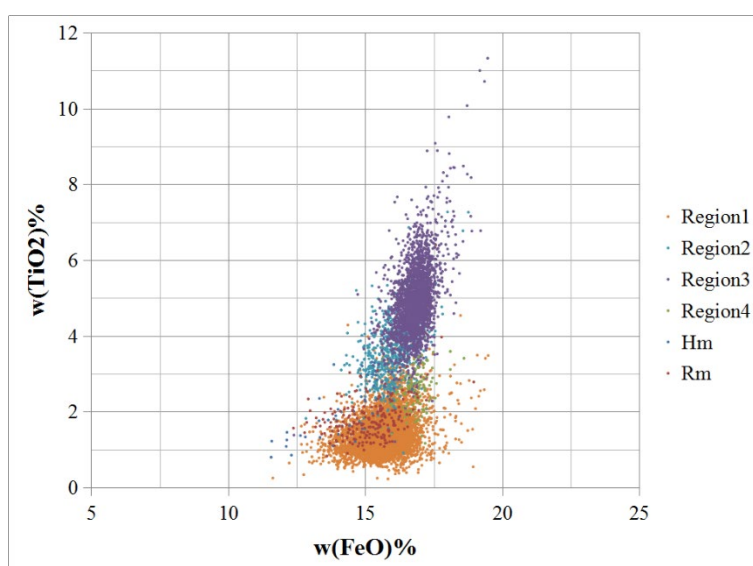
由于嫦娥五号 Region1 地区主要发育极低钛月海玄武岩，因此该地区主要为极低钛月壤。同理，Region2 地区主要发育极低钛低钛月壤，Region3 地区主要发育中低钛月壤，Region4 地区主要发育极低钛月壤。拟着陆区月壤成分特性图如图 4.1 所示。



图 4.1 嫦娥五号拟着陆区月壤成分特性图（附录 11）

吕姆克山地区由于分布大量富玻璃质火山岩，因而月壤稍偏酸性；高地地区由于发育斜长岩，因而为斜长质月壤，不过由于高地地区位于月海之中，肯定会混入。除此之外，由于拟着陆区西部边界距最近的高地单元约 150km，其东部边界距侏罗山不到 30km，因此月壤成分中可能含有的高地成分。

如果以上述地区的 FeO 、 TiO_2 的质量百分含量为横纵坐标作图，可以得到图 4.2 所示的拟着陆区铁钛元素含量分布图。从图 4.2 可以看出拟着陆区中不同地质单元月壤成分存在较大差异。

图 4.2 嫦娥五号拟着陆区月壤 FeO、TiO₂ 含量

4.2 月壤厚度分析

4.2.1 月壤厚度分析方法

月壤厚度不仅是制约月球钻探取样的重要因素，也对月球资源开发和恢复月球演化历史具有重要意义^[49]，确定拟着陆区月壤厚度可以为嫦娥五号任务钻探取样提供重要参考。

目前为止，除了“阿波罗”和“月球”任务的月震实验可以直接限定月壤厚度外^[50]（表 4.1），其他地区均只能通过间接方法确定月壤厚度。间接确定月壤厚度的方法可以分为两类，一类主要基于撞击坑形态限定月壤厚度，如撞击坑形态法^[51, 52]、碎块法^[53, 54]和均衡直径法^[55]；另一类主要基于遥感或地基雷达数据反演月壤厚度，如月壤成熟度法^[36, 54]、地基雷达法^[56, 57]和微波辐射法^[58-60]。

本文中将通过撞击坑形态法反演月壤厚度。

表 4.1 以往着陆区地质年龄及月壤厚度

任务	着陆区域	绝对年龄 ^[61] (Ga)	月壤厚度 ^[50, 62, 63]
阿波罗-11	静海	3.58-3.85	4.4
阿波罗-12	风暴洋	3.15-3.22	3.7
阿波罗-14	弗拉毛罗建造	3.77-3.85	8.5
阿波罗-15	哈德利-亚平宁地区	3.25-3.62	4.4
阿波罗-16	凯利建造	3.77-3.85	12.2
阿波罗-17	金牛-利特罗大峡谷	3.5-3.85	4.0/8.5

撞击坑形态法最早由 Quaide 和 Obertake 等通过模拟撞击实验得出^[51, 52, 64], 他们发现月球表面小型新鲜撞击坑的形态 (<250m) 与月壤厚度存在一定关联。当撞击坑直径与月壤厚度的比值 R 小于 3.8-4.2 时, 撞击作用限于月壤表层, 将形成普通碗形撞击坑; 当 R 大于 8-10 时, 将形成同心环状撞击坑; 当 R 介于上述值时将形成底部平坦型撞击坑^[52, 64, 65]。因此统计某个地区撞击坑的形态和直径的关系就可以推测该地区的月壤厚度。

本文将分别对 Region1 和 Region3 地区内典型区域的小型新鲜撞击坑进行统计, 分别确定普通碗形、底部平坦型和同心环状撞击坑的在这两个区域的主要直径范围, 进而基于通过 R 值与撞击坑形态的关系限定拟着陆区月壤厚度。

Quaide 等通过模拟撞击试验同时给出了月壤厚度的实验拟合公式, 该公式如下^[52]:

$$\text{thickness} = \frac{(k - D_F / D_A) D_A \tan(\alpha)}{2} \quad (7)$$

这里 thickness 代表月壤厚度, D_A 代表撞击坑直径, D_F 代表撞击坑内部构造直径 (图 4.3), k 代表常数 0.86, α 代表响应角 (31°)。

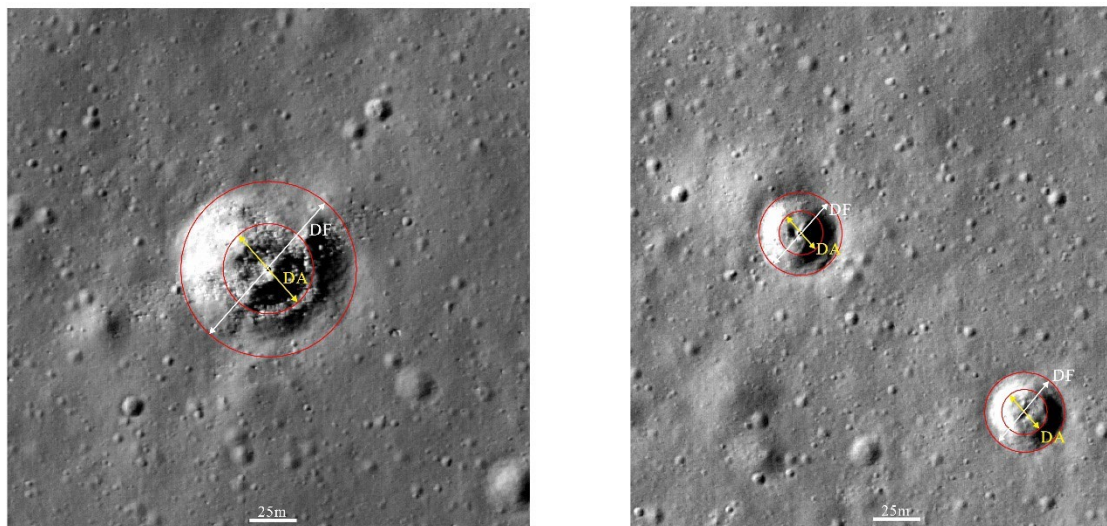


图 4.3 撞击坑形态法 D_A 、 D_F 示意图

由于计算机条件及遥感数据分辨率的限制, 当时并不能直接通过上述公式直接计算月壤厚度, 只能通过撞击坑形态的边界条件限定月壤厚度。然而随着计算

机技术的进步和更高分辨率遥感影像的获得,尤其是空间分辨率达到 50cm 的 NAC 数据的获得,为直接使用上述公式计算月壤厚度提供了可能^[66]。

本文将基于 NAC 数据,使用 ARCGIS 的 CraterHelper 插件统计拟着陆区典型区域同心环状和底部平坦型撞击坑的 D_A 和 D_F ,进而计算拟着陆区月壤厚度,并分析相关统计值。

4.2.2 拟着陆区月壤厚度

本文分别选取了 Region1 和 Region3 地区两个 $2\times 2\text{km}$ 正方形区域,通过 ARCGIS 的 CraterHelper 插件统计了 $<250\text{m}$ 新鲜撞击坑的直径和形态。统计区域远离地质单元边界、大型构造和大型撞击坑,力求具有充分代表性。图 4.4 是上述两个区域的统计结果,图中黄色圆圈代表普通碗形撞击坑,红色圆圈代表底部平坦型撞击坑,绿色圆圈代表同心环状撞击坑。

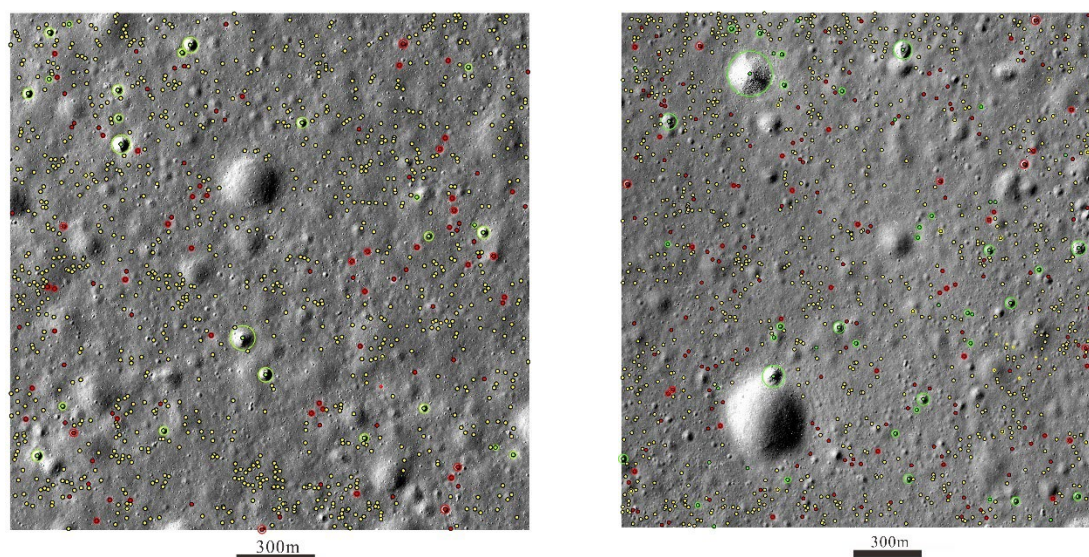


图 4.4 Region1、Region3 地区撞击坑形态法统计结果

如果将上述两个区域不同直径撞击坑出现撞击坑类型的频率进行投图，可以得到图 4.5。

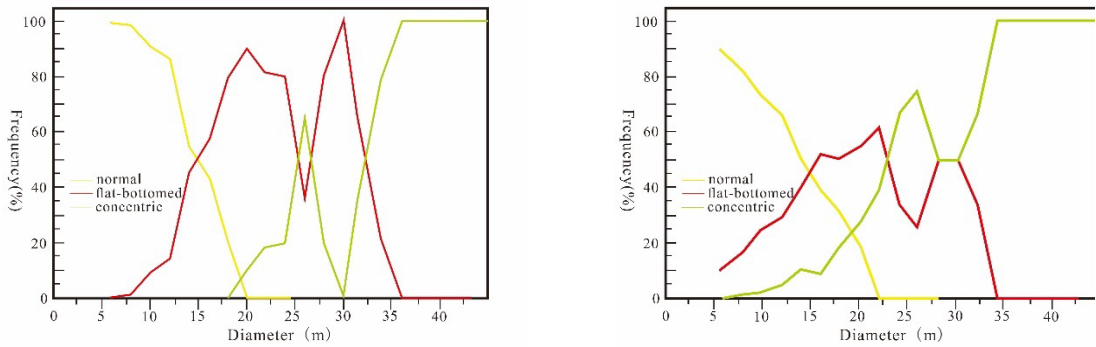


图 4.5 Region1、Region3 地区撞击坑直径-频率分布图

通过图 4.5 可以看出，Region1 地区普通碗装撞击坑直径大多小于 15m，同心环状撞击坑直径大多大于 33m，底部平坦型撞击坑直径大多介于 15-33m 之间。基于撞击坑直径与月壤厚度比值 R 的关系可以推测^[51, 52]，Region1 地区月壤厚度约为 3-4m。

同理可以看出，Region3 地区普通碗形撞击坑直径大多小于 15m，环状撞击坑直径大多大于 28m，底部平坦型撞击坑直径大多介于 2.5-3m 之间，因此可以推测 Region3 地区月壤厚度约为 2.5-3m。

本文还在拟着陆区中选取了 7 幅空间分辨率达到 50cm 的 NAC 影像，统计了各个影像范围内底部平坦型撞击坑和同心环状撞击坑的 D_A 和 D_F ，通过月壤厚度的实验拟合公式分别计算了每个撞击坑月壤厚度，并分析了每个区域月壤厚度的统计值，统计结果如表 4.2 所示。

表 4.2 嫦娥五号拟着陆区部分区域月壤厚度估计值

区域	地质单元	NAC 影像	月壤厚度 (m)						
			min	1/4	1/2	3/4	max	average	
Area1	Region1	M114382204RC	0.9	2.7	4.5	6.1	34.5	5.0	
Area2	Region1	M142658319RC	0.6	1.7	2.3	3.8	16.9	3.0	
Area3	Region1	M144992169RC	0.9	2.0	3.0	4.6	89.2	4.6	
Area4	Region2	M166215270RC	0.6	1.9	2.6	3.5	20.3	3.1	
Area5	Region3	M144971839RC	0.5	1.7	2.3	3.3	7.4	2.8	
Area6	Region3	M144951466LC	0.2	1.6	2.5	3.7	6.3	2.9	
Area7	Region4	M160350468RC	0.4	1.2	1.9	3.0	8.1	2.3	

如果将上述每个区域的月壤厚度按地质单元进行整理可以得到各个地质单元月壤厚度的统计值（表 4.3 和图 4.6）。

表 4.3 嫦娥五号拟着陆区主要地质单元月壤厚度估计值

地质单元	月壤厚度 (m)					
	min	1/4	1/2	3/4	max	average
Region1	0.6	2.0	2.9	4.8	89.2	4.0
Region2	0.6	1.9	2.6	3.5	20.3	3.1
Region3	0.2	1.6	2.4	3.5	17.4	2.9
Region4	0.4	1.2	1.9	3.0	8.1	2.3

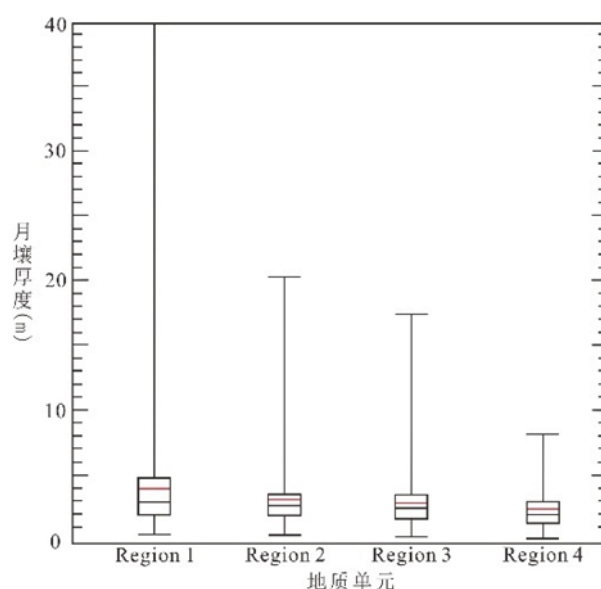


图 4.6 嫦娥五号拟着陆区月壤厚度估计值

可以看出嫦娥五号拟着陆区 Region1 地区月壤厚度的平均值约为 4.0m，Region2 地区约为 3.1m，Region3 地区约为 2.9m，Region4 约为 2.3m，这与通过撞击坑类型的边界条件限定的月壤厚度值较为一致。

一般来说，月壤厚度与月球表面的地质年龄密切相关，表面年龄越大，月壤厚度也越大^[57, 68]。如果将本次研究中所得的各个地质单元的地质年龄及月壤厚度（表 4.4）投入 Di 等所得的阿波罗和嫦娥三号地区地质年龄与月壤厚度分布图^[68]，可以看出本文所得的嫦娥五号拟着陆区地质年龄与月壤厚度关系与月壤厚度随月球表面年龄变化的关系相符（图 4.7）。在 3.5Ga 之前由于较大的撞击通量月壤厚

度随表面年龄增加快速增长，老于 3.7Ga 的地质单元大多具有较厚的月壤；随着撞击通量的快速减小，3.5Ga 以来月壤厚度随年龄增长增大并不明显^[57, 68]。

表 4.4 嫦娥五号拟着陆区主要地质单元模式年龄与月壤厚度估计值

地质单元	年龄（Ga）	月壤厚度（m）
Region1	3.46	4.0
Region2	1.48	3.1
Region3	1.59	2.9
Region4	1.78	2.3

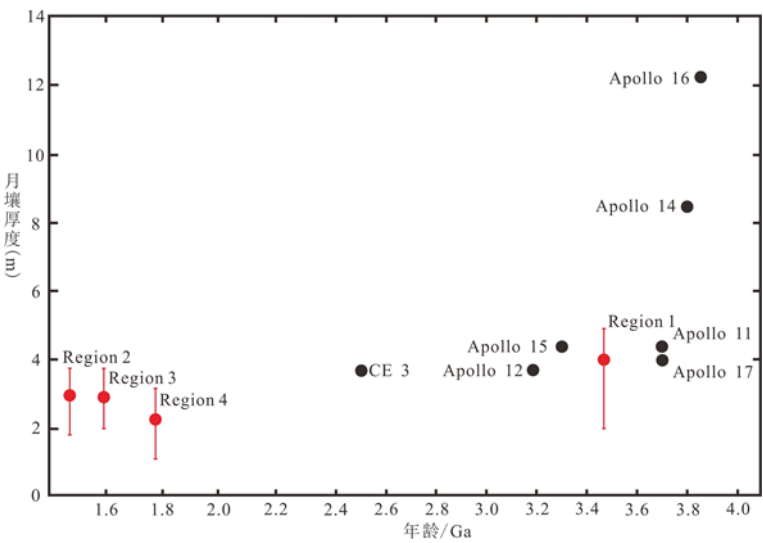


图 4.7 嫦娥五号拟着陆区月壤厚度估计值与以往着陆区比较

4.3 月壤成熟度分析

月壤成熟度是衡量月壤空间风化程度的量，一般可以采用月壤中太阳风粒子的浓度、粘结集块岩含量、月壤均值粒径和 Is/FeO 比值等指标定量描述月壤的成熟度^[36]。目前为止，除了以往月球任务返回样品测得了相关成熟度指标外，并无法直接测量其他地区的成熟度指标。因此对嫦娥五号拟着陆区月壤成熟度的研究只能通过光学成熟度展开。

光学成熟度（OMAT）是衡量月壤相对成熟程度的物理量。由于月壤光学特性随月壤空间风化程度的加深而减弱，因此月壤空间风化程度越高，光学成熟度

数值越低，月壤空间风化程度越低，光学成熟度数值越高。这与月壤其他成熟度指标相反（图 4.8）。

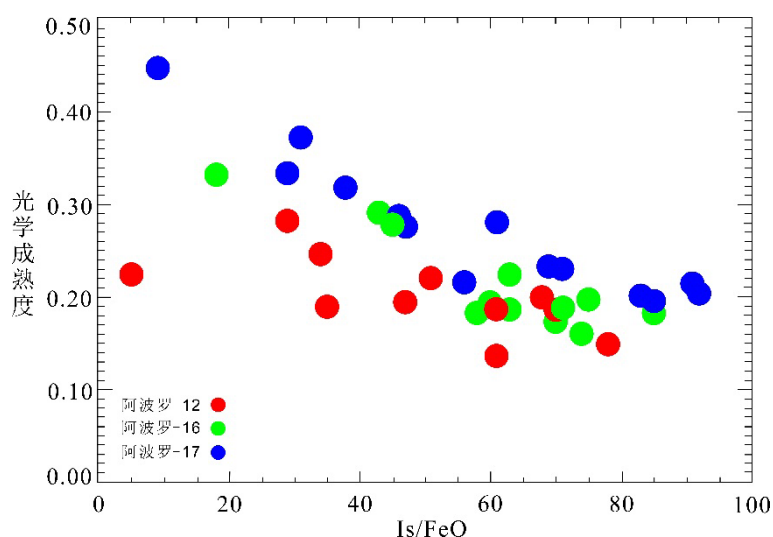


图 4.8 阿波罗地区光学成熟度与 Is/FeO 关系

本文利用 KAGUYA MI 数据及相关算法（见 2.2.2 节）反演了得到了拟着陆区光学成熟度影像（图 4.9）。

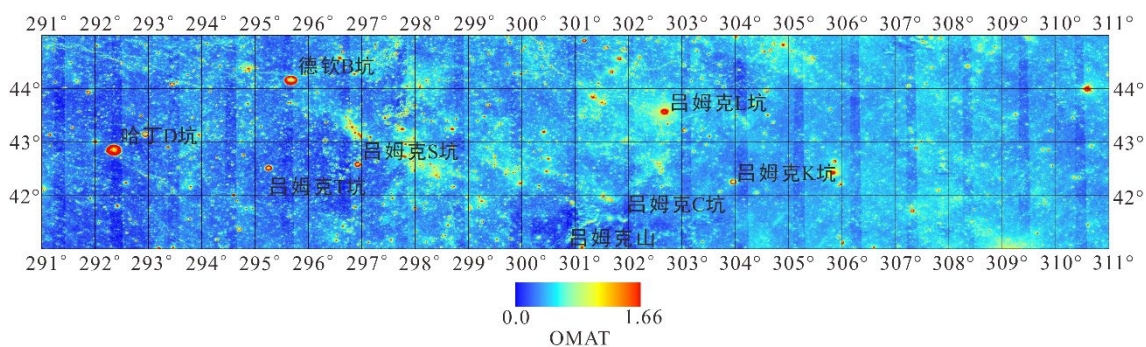


图 4.9 嫦娥五号拟着陆区光学成熟度影像（附录 10）

分析拟着陆区光学成熟度数据可以得到，Region1 大部分地区具较低的光学成熟度，平均约 0.15，与其较老的地质年龄相对应。在 Region1 西部由于受二次坑影响较小，其光学成熟度可以达到拟着陆区的最小值，平均约为 0.14，与之相反坑链发育的东部地区，光学成熟度值平均约为 0.18。

Region2 地区由于撞击坑较少, 虽然形成较晚, 但其光学成熟度值也较小, 平均约 0.16。Region3 作为拟着陆区内最年轻的地质单元, 加之被大量辐射纹所覆盖, 因此光学成熟度较大, 平均约 0.17。

此外吕姆克山作为拟着陆区内最特殊的地质单元之一, 虽然其年龄比 Region1 小, 但是其光学成熟度与 Region1 地区相当, 平均约 0.15, 在北部线性构造带约为 0.14。

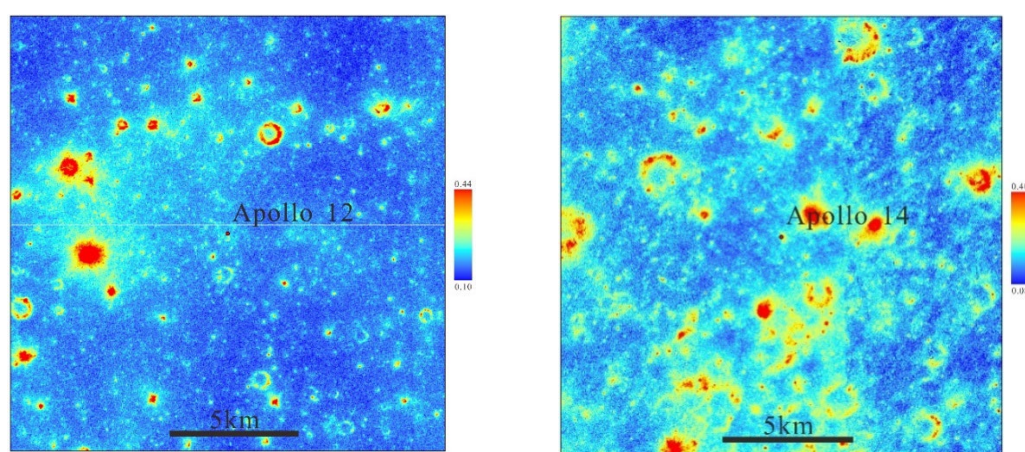
从图 4.8 还可看出拟着陆区光学成熟度最高的地区主要集中在新鲜撞击坑中心, 大部分撞击坑中心光学成熟度在 0.30 以上, 部分甚至达到 0.50 以上。

4.4 月壤粒度分析

目前为止, 除以往着陆区有少量月球样品返回, 可以直接在实验室测得月壤粒度外, 其余广大地区并无法直接测得月壤粒度分布。因此, 对拟着陆区月壤粒度的研究只能通过有关遥感数据展开。

光学成熟度是衡量月壤成熟程度的指标, 也是与月壤粒度密切相关的量, 一般来说, 月壤光学成熟度越低, 月壤越成熟, 月壤颗粒粒径越细。因此本文试图通过对以往着陆区光学成熟度与月壤粒度关系的研究, 确定光学成熟度与月壤粒径之间的关系, 进而通过光学成熟度数据限定拟着陆区月壤均值粒径的范围。

为了比较拟着陆区与以往着陆区的光学成熟度数据, 本文利用相关算法 (见 2.2.2 节) 反演了以往着陆区的光学成熟度值, 得到了以往着陆区光学成熟度影像。



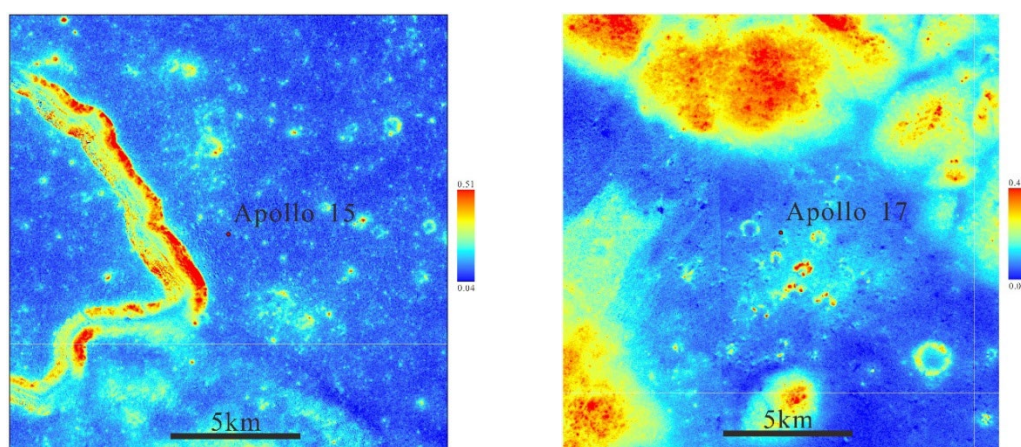


图 4.10 以往着陆区光学成熟度影像

如果将反演所得的“阿波罗”和“月球”地区光学成熟度与对应的月壤均值粒径 M_z ，模式年龄进行比较，可得下表：

表 4.5 以往着陆区地质年龄及光学成熟度值

着陆点	地质年龄 ^[61]	均值粒径 ^[69]	OMAT
	Ga	μm	
阿波罗-11	3.58-3.85	98	0.145
阿波罗-12	3.15-3.22	118	0.170
阿波罗-14	3.77-3.85	138	0.161
阿波罗-15	3.28-3.33	61	0.149
阿波罗-16	3.77-3.85	153	0.195
阿波罗-17	3.5-3.85	79	0.119
月球-16	3.41	85	0.131
月球-17	3.84-4.42/3.62-3.8	77	0.140

将上表数据按光学成熟度值大小进行排序见图 4.11。

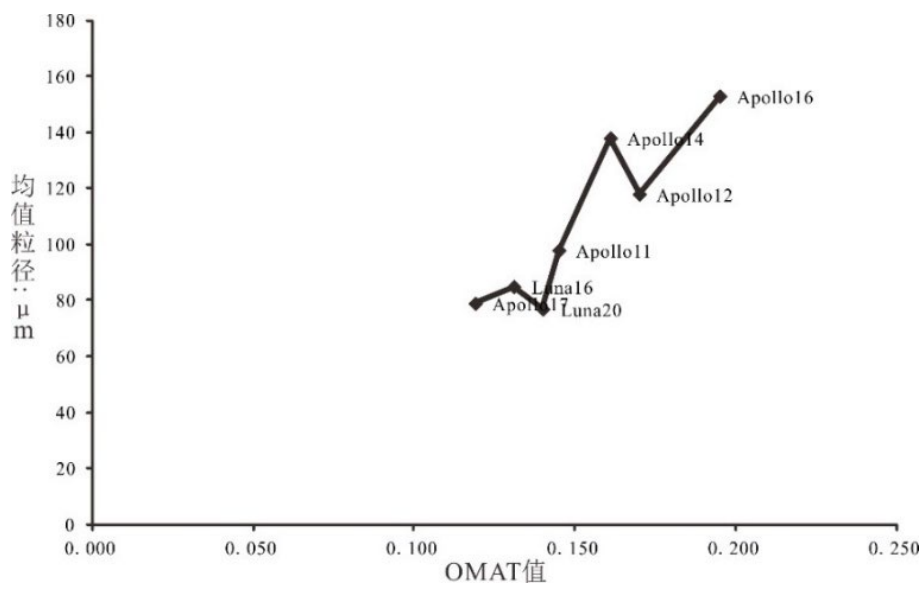


图 4.11 以往着陆区光学成熟度值与均值粒径关系

由此可见，随着着陆区光学成熟度值的增加，月壤均值粒径也随之增加，这与月球表面空间风化作用的整体趋势相符。在综合考虑了“阿波罗”和“月球”地区光学成熟度值和月壤平均粒径之间关系及变化趋势之后，可以将以往着陆区按光学成熟度值划分为以下四类：

表 4.6 以往着陆区光学成熟度、均值粒径划分

着陆区	OMAT	均值粒径(μm)
阿波罗-17、月球-16、20	0.10-0.14	70~90
阿波罗-11、15	0.14-0.16	90~110
阿波罗-12、14	0.16-0.18	110~140
阿波罗-16	0.18-0.20	>150

如果将上述对“阿波罗”及“月球”地区的月壤划分方案运用到嫦娥五号拟着陆区，并考虑光学成熟度值小于 0.1 和大于 0.20 的情况，则可将拟着陆区月壤划分为表 4.7 所示的 7 种类型。

表 4.7 嫦娥五号拟着陆区月壤均值粒径划分

类型	OMAT	均值粒径	面积	比例(%)	特点
A	<0.10	50-70	4	0.0%	/
B	0.10-0.14	70-90	7132	13.0%	阿波罗-17, 月球-16、20
C	0.14-0.16	90-110	10751	19.5%	阿波罗 11、15
D	0.16-0.18	110-140	26596	48.2%	阿波罗 12、14
E	0.18-0.20	140-200	6002	10.9%	阿波罗 16
F	0.20-0.28	>200	4084	7.4%	/
G	>0.28	/	600	1.1%	撞击坑内部

本文认为, A 类着陆区月壤均值粒径约 50-70 μm , B 类着陆区约 70-90 μm , C 类着陆区与约 90-110 μm , D 类着陆区约 110-140 μm , E 类着陆区约 140-200 μm , F 类着陆区在 200 μm 以上。由于以往月球任务并无返回撞击坑内部月壤, 因而无法评估 G 类着陆区月壤均值粒径, 但 G 类着陆区月壤肯定是拟着陆区内最初的部分。

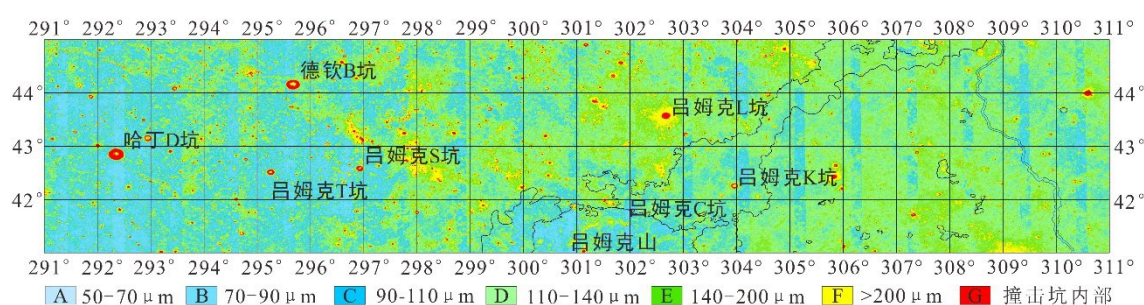


图 4.12 嫦娥五号拟着陆区均值粒径分布图 (附录 12)

A、B、C、D、E、F、G 七类区域的分布如图 4.12 所示, 从该图可以看出 Region1、Region2、Region3 蓝色部分依次减少, 绿色部分逐渐增加。Region1 地区相对于其他地区月壤更细, 其西部地区月壤均值粒径大多在 70-110 μm 之间, 而东部则由于受坑群的影响而有所增大。

Region2 和 Region3 地区月壤均值粒径依次增加, Region2 地区月壤均值粒径多在 90-140 μm 之间, Region3 地区多大于 110 μm 。Region4 和吕姆克山地区可能因特殊的性质因具较细的月壤。如果取每个地质单元月壤均值粒径的平均值可得表 4.8。

表 4.8 嫦娥五号拟着陆区月壤均值粒径及光学成熟度值

着陆点	地质年龄 (Ga)	均值粒径 (μm)	OMAT
Region1	3.46	80-100	0.14
Region2	1.48	100-120	0.16
Region3	1.59	110-140	0.17
Region4	1.78	100-120	0.16
吕姆克山	<3.4	80-100	0.14
高地单元	>3.8	120-160	0.18

4.5 本章小结

本章主要基于以往着陆区月壤样品的性质、拟着陆区 NAC 数据 (50cm/ppx) 和 OMAT 数据, 对拟着陆区月壤的成分、厚度和粒度进行了分析, 本章所得的主要结论如下:

(1) 拟着陆区 Region1、Region4 地区主要为极低钛月壤, Region2 主要为极低钛低钛月壤, Region3 地区主要为中低钛月壤, 高地单元主要为斜长质月壤, 吕姆克山地区可能为富玻璃质火山岩型月壤。着陆区东西两端可能含少量高地物质。

(2) 拟着陆区 Region1 地区月壤平均厚度约 4m, Region2 地区约为 3.1m, Region3 地区约为 2.9m, Region4 地区约为 2.3m, 证明了月壤厚度的增长与月球表面撞击通量的变化密切相关, 月壤厚度在 3.5Ga 之前具较大的增长速度, 3.7Ga 之前形成的地质单元大多具较厚的月壤。

(3) 月壤均值粒径随光学成熟度减小而减小。拟着陆区可以按光学成熟度值划分为 A、B、C、D、E、F、G 七类地区, 每类地区对应了不同的均值粒径范围, 面积分别占到了 0.0%、13.0%、19.5%、48.2%、10.9%、7.4%和 1.1%, 其对应的均值粒径范围分别为 50-70 μm 、70-90 μm 、90-110 μm 、110-140 μm 、140-200 μm 和大于 200 μm 。

第五章 结论与展望

5.1 主要结论

本文基于 KAGUYA、LRO 等探测器获取的影像数据、地形数据和多光谱数据及以往着陆区月壤样品资料，对嫦娥五号拟着陆区地质特征及月壤特性进行了研究。本文的主要结论如下：

(1) 将拟着陆区可划分为 Region1 (I₂m)、Region2 (IE_m)、Region3 (E₂m)、Region4 (E₂m)、吕姆克山和高地物质六个地质单元，并确定其分别为极低钛低钛中低铁玄武岩、低钛极低钛中铁玄武岩、中低钛高铁玄武岩、极低钛高铁玄武岩、富玻璃质火山岩和高地斜长。四个主要的月海玄武岩单元的地质年龄分别为 3.46Ga、1.48Ga、1.59Ga 和 1.78Ga。

(2) 限定了拟着陆区玄武岩浆活动的时间及演化历程。确定拟着陆区的岩浆活动至少从 3.46Ga 开始，1.48Ga 才逐渐结束，持续时间长达 1.98Ga，主要可划分为两期月海玄武岩事件和一期火山穹丘事件。Region1 地区月海玄武岩主要喷发于晚雨海世，厚达数百米，Region3 地区月海玄武岩主要喷发于晚爱拉托逊世，厚约几十米，晚爱拉托逊世的岩浆活动强度明显小于晚雨海世。晚爱拉托逊世月海玄武岩可能覆盖于晚雨海世月海玄武岩之上，而晚爱拉托逊世月海玄武岩和晚雨海世月海玄武岩可能都覆盖在原始高地物质之上。

(3) 拟着陆区月壤成分主要取决于下伏基岩的成分，Region1、Region4 地区发育极低钛月壤，Region3 主要发育中低钛月壤。

(4) 拟着陆区月壤粒度、厚度与地质单元年龄密切相关，月壤粒度随年龄增大而减小，月壤厚度随年龄增大而增大，3.5Ga 之前月壤厚度随年龄变大增加更快。Region1 地区月壤厚度约 4.0m，Region2 地区月壤厚度约 3.1m，Region3 地区月壤厚度约 2.9m，Region4 地区月壤厚度约 2.3m。如果按均值粒径的估计值范围将拟着陆区划分为 A、B、C、D、E、F、G 等七类地区，其面积分别占到 0.0%、13.0%、19.5%、48.2%、10.9%、7.4%和 1.1%。

5.2 展望

本文中建立了拟着陆区的整体地质框架，进行了地质单元划分，但仅将吕姆克山地区划分为一个地质单元，在未来的研究中需要对其进行更为细致的划分以满足未来 1:25 万地质图填图的需要；本文中虽然通过铁钛元素丰度数据大致判断拟着陆区东部地区的非月海物质可能为高地物质，但缺乏进一步的证据，因此需要通过进一步研究，具体确定其归属。

此外，对整个区域而言虽然进行了元素含量研究，但无法得到月表的矿物组成信息，因此未来的研究中需要通过 M^3 等高光谱数据，确定月表矿物组成特征，为研究月表性质及拟着陆区的岩浆演化提供依据。

最后，本文中虽然建立了拟着陆区岩浆演化序列，但对岩浆来源、岩浆成分的变化及原因、岩浆活动的驱动因素及与风暴洋岩浆演化的关系等问题并没有得到充分的认识，需要在未来的研究中进一步剖析。

致谢

参考文献

- [1] LEWIS JS. Mining the sky: untold riches from the asteroids, comets, and planets [J]. Reading, Mass: Addison-Wesley Pub Co, c1996.
- [2] GAFFEY MJ, MCCORD TB. Mining outer space [J]. Technol Rev;(United States), 1977, 79(7).
- [3] 欧阳自远. 月球探测的进展与中国的月球探测 [J]. 地质科技情报, 2004, 23(4): 1-5.
- [4] 欧阳自远, 李春来, 邹永廖, 等. 绕月探测工程的初步科学成果 [J]. 中国科学: 地球科学, 2010, 40(3): 261-80.
- [5] 乔乐, 肖龙, 赵健楠, 等. 月球虹湾地区地质特征解译及岩浆活动历史研究[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2013, 11): 1370-86.
- [6] XIAO L, ZHU P, FANG G, et. al. A young multilayered terrane of the northern Mare Imbrium revealed by Chang'E-3 mission [J]. Science, 2015, 347(6227): 1226-9.
- [7] 姜景山, 王振占, 张晓辉, 等. 微波月亮——人类对月球的全新视角——中国“嫦娥一号”卫星微波探测仪若干探测结果 [J]. 遥感技术与应用, 2009, 24(4): 409-22.
- [8] LI C, LIU J, REN X, et. al. The Chang'e 3 Mission Overview [J]. Space Science Reviews, 2015, 190(1-4): 85-101.
- [9] 欧阳自远. 嫦娥二号的初步成果 [J]. 自然杂志, 2013, 35(6): 391-5.
- [10] 中国探月与深空探测网. 胡浩代表: 嫦娥五号四个“首次”三个“全新” [OL]. (2016)[2017-05-15]. <http://www.clep.org.cn/n5982019/c6355526/content.html>
- [11] SHOEMAKER EM, HACKMAN RJ. Stratigraphic basis for a lunar time scale: proceedings of the Symposium-International Astronomical Union, F, 1962 [C]. Cambridge Univ Press.
- [12] 欧阳自远, 刘建忠. 月球形成演化与月球地质图编研 [J]. 地学前缘, 2014, 21(6): 1-6.

- [13] 郭弟均, 刘建忠, 张莉, 等. 月球地质年代学研究方法及月面历史划分 [J]. 地学前缘, 2014, 21(6): 45-61.
- [14] 丁孝忠, 王梁, 韩坤英, 等. 基于 ArcGIS 的月球数字地质填图:以月球北极地区为例 [J]. 地学前缘, 2014, 21(6): 19-30.
- [15] 王梁. 月球北极地区数字地质编图研究 [D]. 中国地质大学(北京)博士学位论文, 2015.
- [16] 欧阳自远. 月球科学概论 [M]. 中国宇航出版社, 2005.
- [17] 肖龙. 行星地质学 [M]. 地质出版社, 2013.
- [18] WHITAKER E. The lunar Procellarum basin; proceedings of the Multi-ring basins: Formation and Evolution, F, 1981 [C].
- [19] NAKAMURA R, YAMAMOTO S, MATSUNAGA T, et. al. Compositional evidence for an impact origin of the Moon's Procellarum basin [J]. Nature Geoscience, 2012, 5(11): 775-8.
- [20] HIESINGER H, HEAD J, WOLF U, et. al. Ages and stratigraphy of mare basalts in oceanus procellarum, mare nubium, mare cognitum, and mare insularum [J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2003, 108(E7).
- [21] WHITFORD - STARK JL, HEAD JW. Stratigraphy of Oceanus Procellarum basalts: Sources and styles of emplacement [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1980, 85(B11): 6579-609.
- [22] HEATHER D, DUNKIN S. A stratigraphic study of southern Oceanus Procellarum using Clementine multispectral data [J]. Planetary and Space Science, 2002, 50(14): 1299-309.
- [23] WIECZOREK MA, PHILLIPS RJ. The "Procellarum KREEP Terrane": Implications for mare volcanism and lunar evolution [J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2000, 105(E8): 20417-30.
- [24] SCOTT DH, MCCAULEY JF. Geologic map of the west side of the Moon [M]. Citeseer, 1977.
- [25] WILHELMS DE, MCCAULEY JF. Geologic map of the near side of the Moon [M]. US Geological Survey Reston, 1971.
- [26] SCOTT DH, EGGLETON RE. Geologic map of the Rumker quadrangle of the Moon [M]. 1973.

- [27] HIESINGER H, HEAD III J, WOLF U, et. al. New age determinations of lunar mare basalts in Mare Cognitum, Mare Nubium, Oceanus Procellarum, and other nearside mare [M]. Lunar Planet Sci XXXII. 2001.
- [28] HIESINGER H, JAUMANN R, NEUKUM G, et. al. Ages of mare basalts on the lunar nearside [J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2000, 105(E12): 29239-75.
- [29] MOROTA T, HARUYAMA J, OHTAKE M, et. al. Timing and characteristics of the latest mare eruption on the Moon [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2011, 302(3): 255-66.
- [30] KODAMA S, OHTAKE M, YOKOTA Y, et. al. Characterization of multiband imager aboard SELENE [J]. Space science reviews, 2010, 154(1): 79-102.
- [31] LUCEY PG, TAYLOR GJ, MALARET E. Abundance and distribution of iron on the Moon [J]. Science, 1995, 268(5214): 1150.
- [32] LUCEY PG, BLEWETT DT, HAWKE B. Mapping the FeO and TiO₂ content of the lunar surface with multispectral imagery [J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 1998, 103(E2): 3679-99.
- [33] LUCEY PG, BLEWETT DT, JOLLIFF BL. Lunar iron and titanium abundance algorithms based on final processing of Clementine ultraviolet - visible images [J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2000, 105(E8): 20297-305.
- [34] OHTAKE H, OHTAKE M, HIRATA N. Lunar iron and titanium abundance algorithms based on SELENE (Kaguya) Multiband Imager data; proceedings of the Lunar and Planetary Science Conference, F, 2012 [C].
- [35] PIETERS C, STAUD M, FISCHER E, et. al. A sharper view of impact craters from Clementine data [J]. Science, 1994, 266(5192): 1844.
- [36] LUCEY PG, BLEWETT DT, TAYLOR GJ, et. al. Imaging of lunar surface maturity [J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2000, 105(E8): 20377-86.
- [37] LEMELIN M, LUCEY P, GADDIS L, et. al. Global Map Products from the Kaguya Multiband Imager at 512 ppd: Minerals, FeO, and OMAT; proceedings of the Lunar and Planetary Science Conference, F, 2016 [C].
- [38] PAGE NJ. Geologic map of the Cassini quadrangle of the Moon [M]. US Geological Survey, 1969.

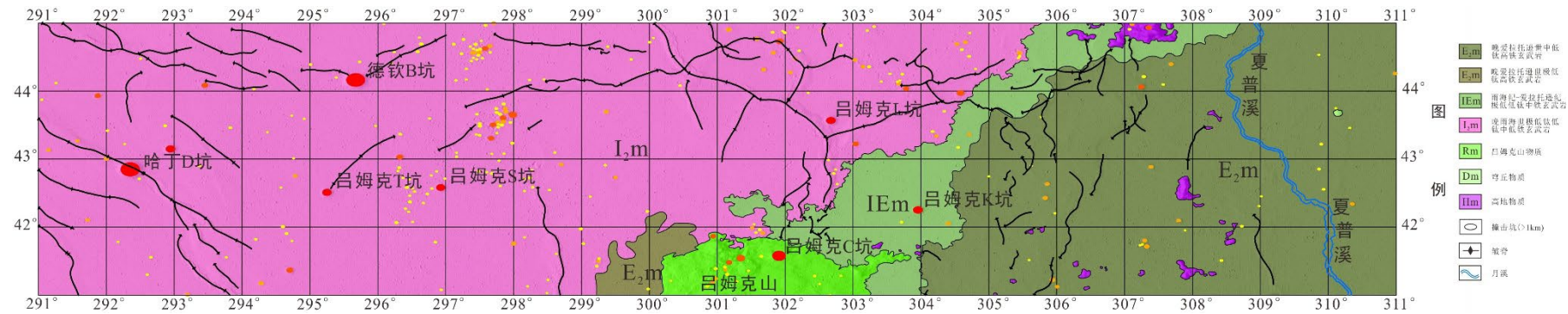
- [39] YUE Z, OUYANG Z, LI H, et. al. The origin and geological significance of lunar ridges [J]. Chinese Journal of Geochemistry, 2007, 26(4): 418-24.
- [40] GREELEY R. Lava tubes and channels in the lunar Marius Hills [J]. Earth, Moon, and Planets, 1971, 3(3): 289-314.
- [41] 王梁, 丁孝忠, 韩坤英, 等. 月球数字地质图的编制与研究 [J]. 中国地质, 2015, 1): 331-40.
- [42] HIESINGER H, HEAD J, Wolf U, et. al. Ages of mare basalts on the lunar nearside: a synthesis; proceedings of the Lunar and Planetary Science Conference, F, 2008 [C].
- [43] GROUP CATW. Standard techniques for presentation and analysis of crater size-frequency data [J]. Icarus, 1979, 37(2): 467-74.
- [44] KNEISSL T, VAN GASSELT S, NEUKUM G. Map-projection-independent crater size-frequency determination in GIS environments—New software tool for ArcGIS [J]. Planetary and Space Science, 2011, 59(11): 1243-54.
- [45] MICHAEL G, NEUKUM G. Planetary surface dating from crater size–frequency distribution measurements: Partial resurfacing events and statistical age uncertainty [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2010, 294(3): 223-9.
- [46] NEUKUM G, IVANOV BA, HARTMANN WK. Cratering records in the inner solar system in relation to the lunar reference system [J]. Space Science Reviews, 2001, 96(1-4): 55-86.
- [47] HIESINGER H, HEAD JW, WOLF U, et. al. Ages and stratigraphy of lunar mare basalts in Mare Frigoris and other nearside maria based on crater size - frequency distribution measurements [J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2010, 115(E3).
- [48] HEIKEN G, VANIMAN D, FRENCH BM. Lunar sourcebook: A user's guide to the Moon [M]. CUP Archive, 1991.
- [49] 李雄耀, 王世杰, 陈丰, 等. 月壤厚度的研究方法进展 [J]. 矿物学报, 2007, 27(1): 64-8.
- [50] NAKAMURA Y, DORMAN J, DUENNEBIER F, et. al. Shallow lunar structure determined from the passive seismic experiment [J]. The Moon, 1975, 13(1-3): 57-66.

- [51] OBERBECK VR, QUAIDE WL. Estimated thickness of a fragmental surface layer of Oceanus Procellarum [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1967, 72(18): 4697-704.
- [52] QUAIDE WL, OBERBECK VR. Thickness determinations of the lunar surface layer from lunar impact craters [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1968, 73(16): 5247-70.
- [53] DRAGG J, MORRIS E, RENNILSON J, et. al. Lunar surface topography(Surveyor I spacecraft photographs evaluated for lunar surface topography) [J]. 1966, 1966, 7-44.
- [54] WILCOX B, ROBINSON M, THOMAS P, et. al. Constraints on the depth and variability of the lunar regolith [J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2005, 40(5): 695-710.
- [55] SHOEMAKER E, BATSON R, HOLT H, et. al. Observations of the lunar regolith and the Earth from the television camera on Surveyor 7 [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1969, 74(25): 6081-119.
- [56] BONDARENKO N, SHKURATOV YG. A map of regolith-layer thickness for the visible lunar hemisphere from radar and optical data [J]. *Solar System Research*, 1998, 32(264).
- [57] SHKURATOV YG, BONDARENKO NV. Regolith layer thickness mapping of the Moon by radar and optical data [J]. *Icarus*, 2001, 149(2): 329-38.
- [58] 法文哲, 金亚秋. “嫦娥”1 号对月球表面微波辐射观测分析及其月壤厚度反演 [J]. *中国科学:信息科学*, 2010, 40(1): 115-27.
- [59] FA W, JIN YQ. Simulation of brightness temperature from lunar surface and inversion of regolith - layer thickness [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2007, 112(E5).
- [60] 王振占, 李芸, 姜景山, 等. 用“嫦娥一号”卫星微波探测仪亮温反演月壤厚度和³He 资源量评估的方法及初步结果分析 [J]. *中国科学:地球科学*, 2009, 39(8): 1069-84.
- [61] STÖFFLER D, RYDER G. Stratigraphy and isotope ages of lunar geologic units: Chronological standard for the inner solar system [M]. *Chronology and evolution of Mars*. Springer. 2001: 9-54.

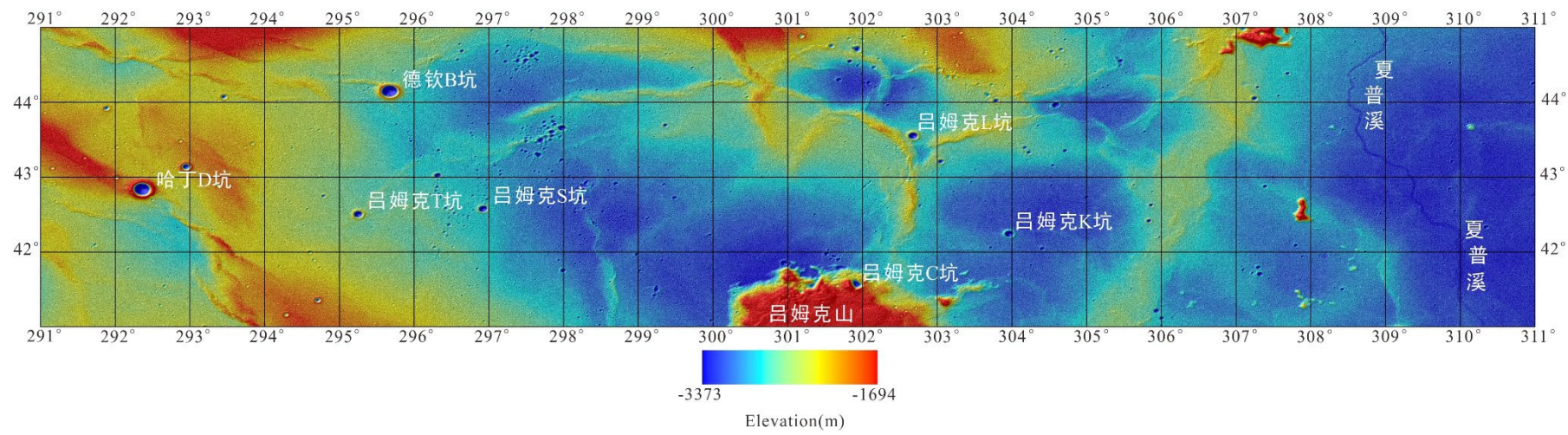
-
- [62] COOPER MR, KOVACH RL, Watkins JS. Lunar near - surface structure [J]. *Reviews of Geophysics*, 1974, 12(3): 291-308.
- [63] DUENNEBIER F, WATKINS J, KOVACH R. Results from the lunar surface profiling experiment; proceedings of the Lunar and Planetary Science Conference, F, 1974 [C].
- [64] OBERBECK VR, QUAIDE WL. Genetic implications of lunar regolith thickness variations [J]. *Icarus*, 1968, 9(1-3): 446-65.
- [65] FA W, LIU T, ZHU MH, et. al. Regolith thickness over Sinus Iridum: Results from morphology and size - frequency distribution of small impact craters [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2014, 119(8): 1914-35.
- [66] BART GD, NICKERSON RD, LAWDER MT, et. al. Global survey of lunar regolith depths from LROC images [J]. *Icarus*, 2011, 215(2): 485-90.
- [67] MCKAY D, FRULAND R, HEIKEN G. Grain size and the evolution of lunar soils; proceedings of the Lunar and Planetary Science Conference Proceedings, F, 1974 [C].
- [68] DI K, SUN S, YUE Z, ET. AL. Lunar regolith thickness determination from 3D morphology of small fresh craters [J]. *Icarus*, 2016, 267(12-23).
- [69] GROMOV V. Physical and mechanical properties of lunar and planetary soils [J]. *Earth, Moon, and Planets*, 1998, 80(1): 51-72.

附录

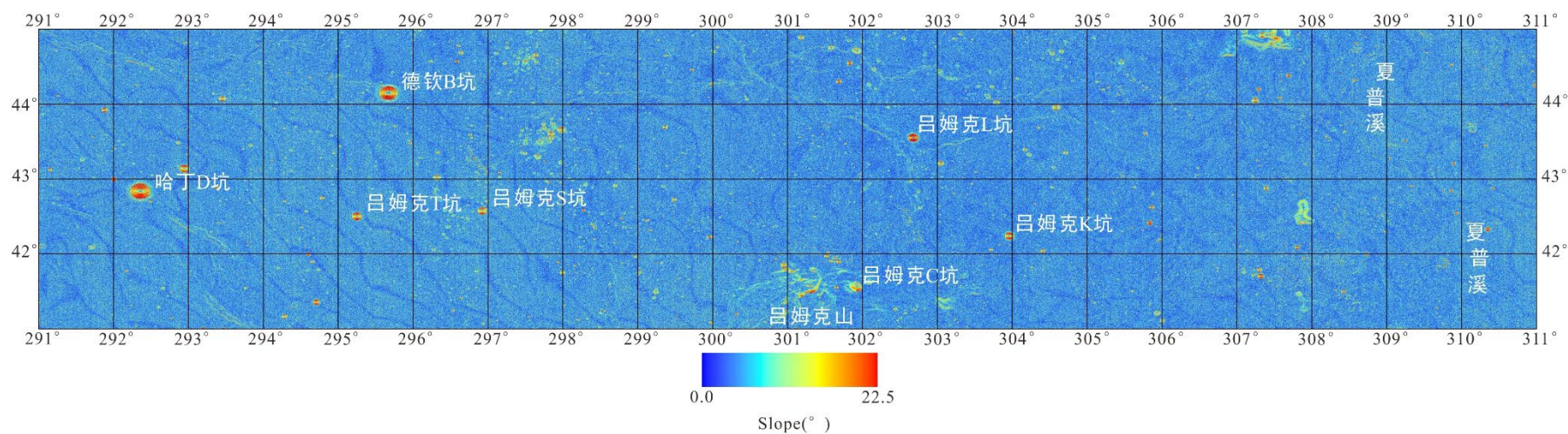
1. 嫦娥五号拟着陆区地质简图



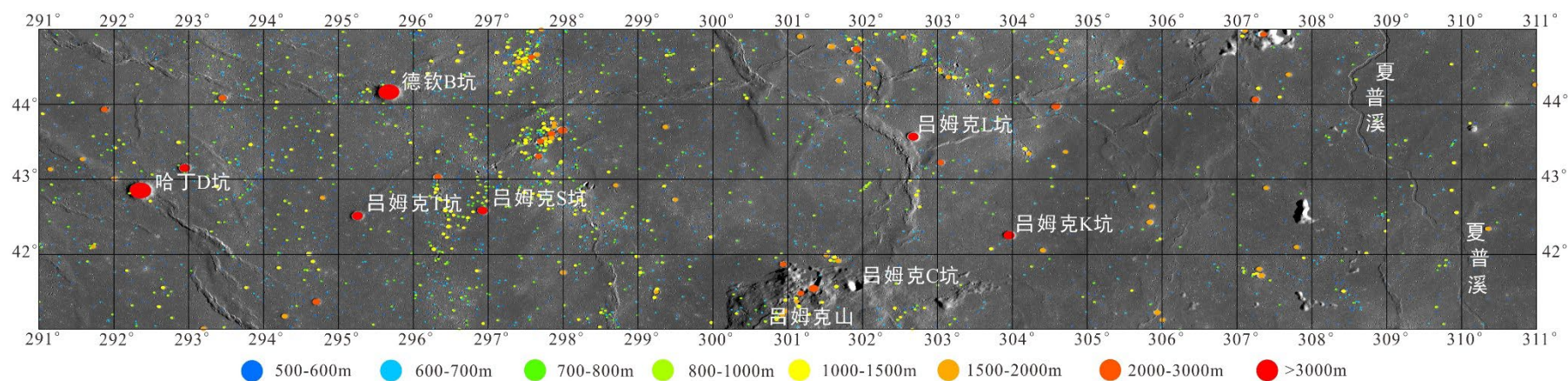
2. 嫦娥五号拟着陆区地形地貌图



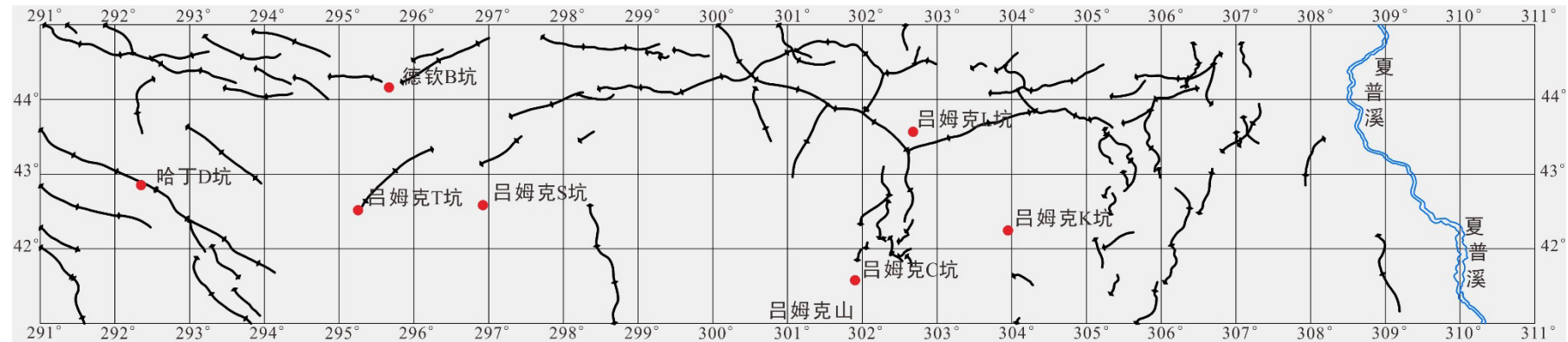
3. 嫦娥五号拟着陆区坡度图



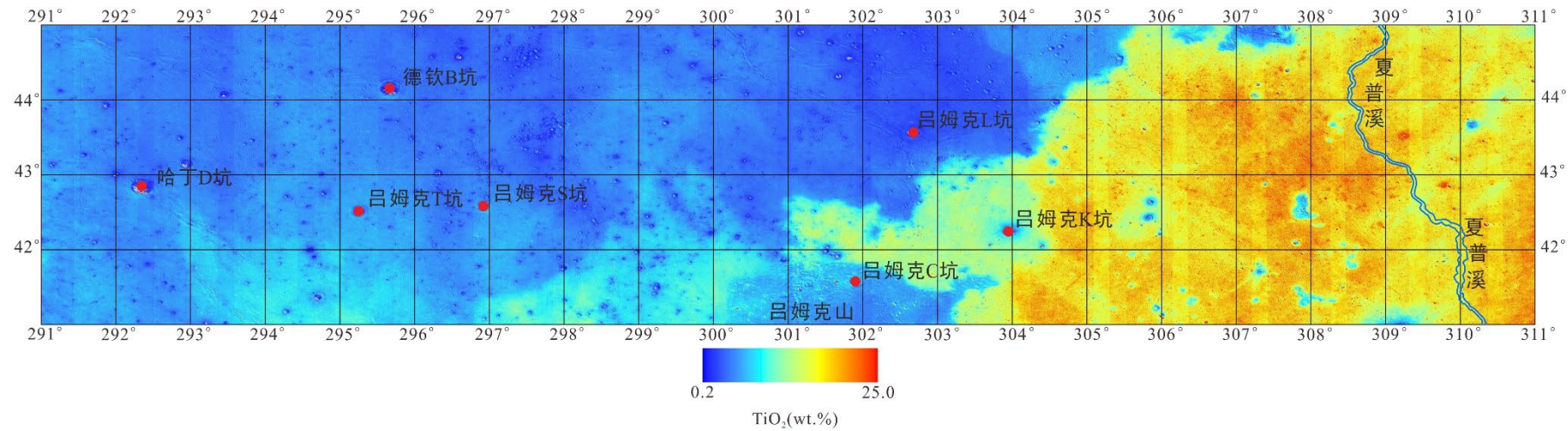
4. 嫦娥五号拟着陆区较大撞击坑分布图



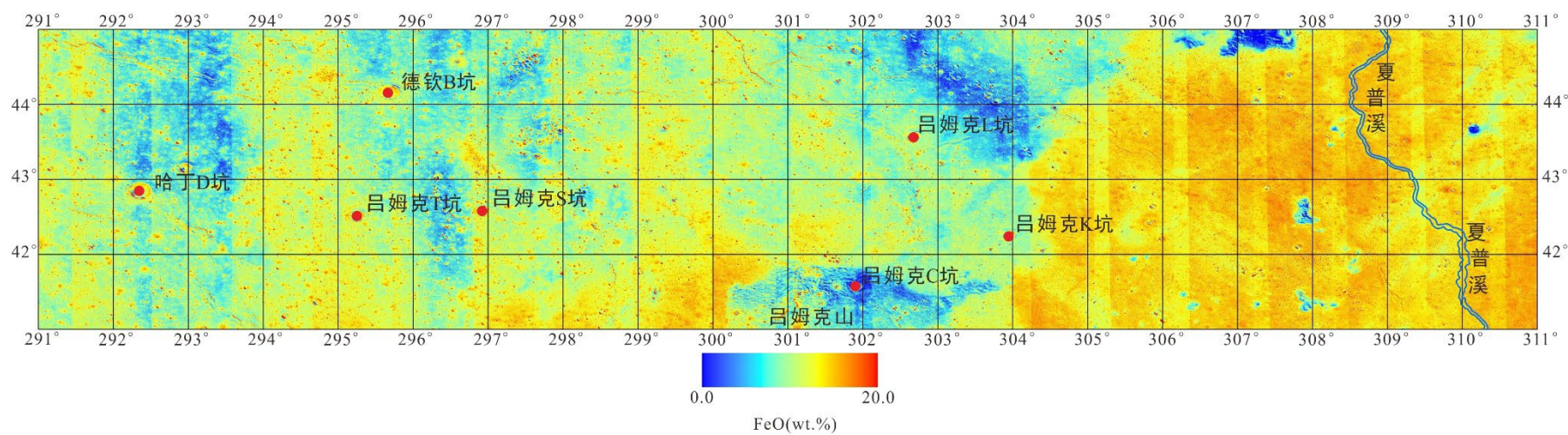
5. 嫦娥五号拟着陆区皱脊分布图



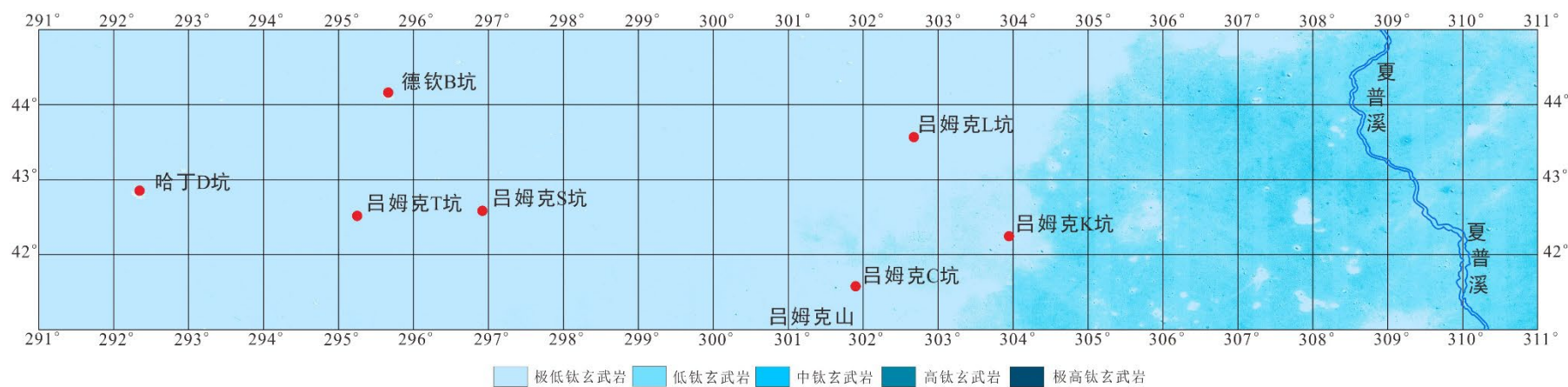
6. 嫦娥五号拟着陆区 TiO₂ 丰度图



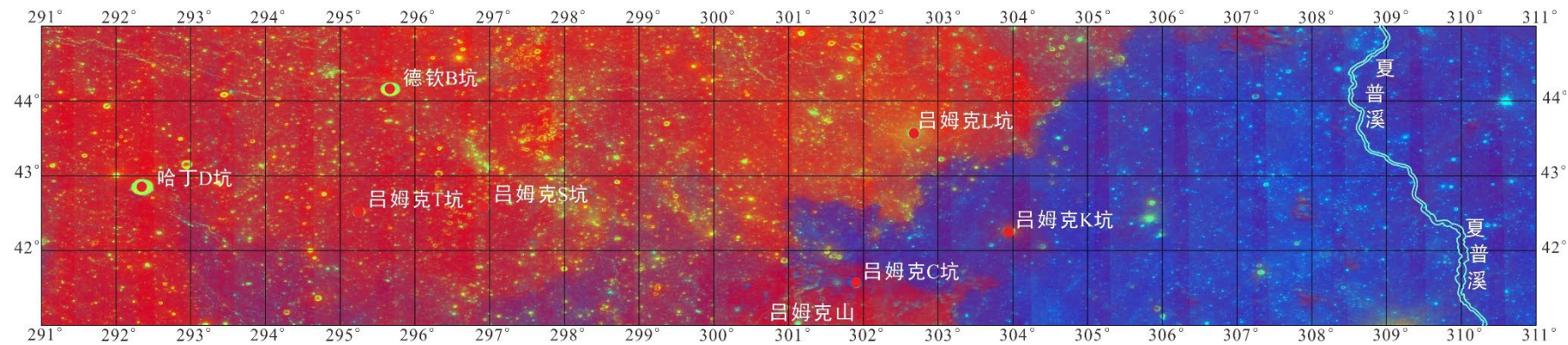
7. 嫦娥五号拟着陆区 FeO 丰度图



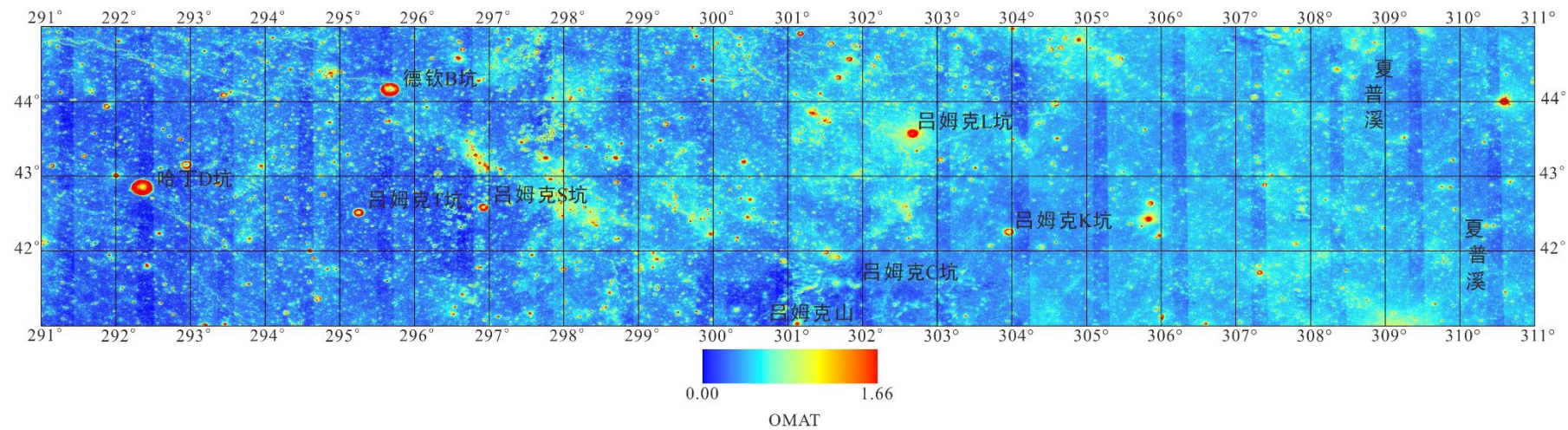
8. 嫦娥五号拟着陆区玄武岩划分图



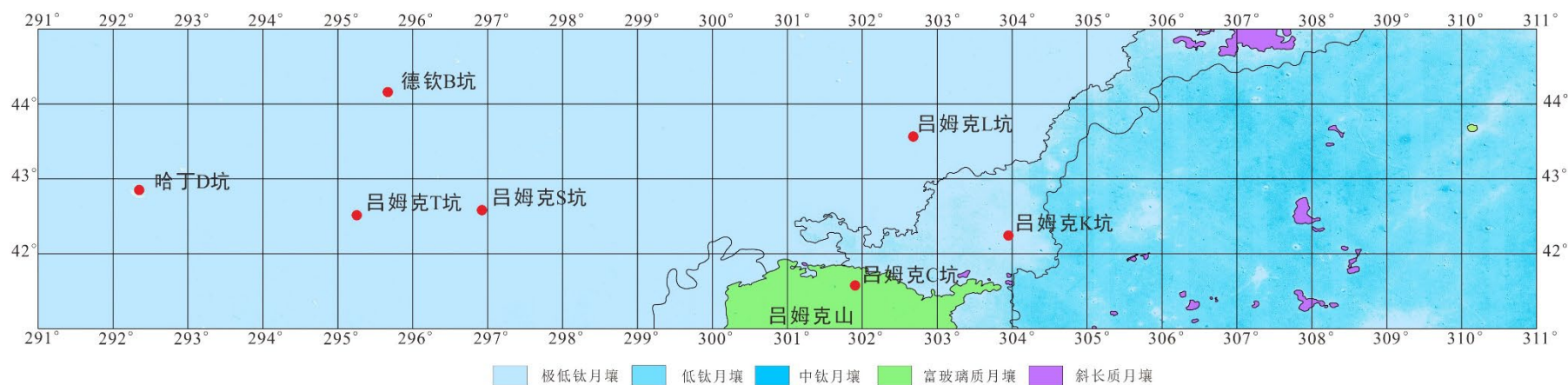
9. 嫦娥五号拟着陆区假彩色影像



10. 嫦娥五号拟着陆区光学成熟度图



11. 嫦娥五号拟着陆区月壤成分特性图



12. 嫦娥五号拟着陆月壤均值粒径分布图

