

模拟月壤微波介电特性的实验研究与统计分析

李涤徽 姜景山 吴季 张德海 张晓辉

(中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100080. E-mail: dhli@nmrs.ac.cn)

摘要 为配合我国即将发射的绕月星载微波辐射计对月观测资料反演的需要, 在野外采集大量地球玄武岩和斜长岩样品及对其进行主元素化学分析的基础上, 配制了9个模拟月壤样品, 并各制成0.8, 1.0, 1.2, 1.4和1.6 g/cm³五个密度等级; 然后在0.5~20 GHz的频率范围内, 用同轴线终端开路法在HP8722C矢量网络分析仪上对其介电常数进行了测量, 并对测量结果进行了处理和统计分析. 研究表明, 在密度、频率和组分三个参数中, 密度对介电常数的作用最为明显, 频率次之, 组分的影响最小. 三者对介电常数实部的影响所占比例大约为45%, 33%, 22%, 对虚部的影响约为55%, 27%, 19%. 介电常数实部随密度和频率的变化符合较严格的线性关系, 和二者的相关系数分别平均为0.99和-0.73. 虚部和密度或频率在约0.5~10 GHz范围呈线性关系, 但在频率高于10 GHz后, 相关性明显弱化; 组分对介电常数的作用较为复杂, 二者之间很大程度上不遵循简单的函数关系, 相关性最小. 对样品主元素氧化物SiO₂, Al₂O₃, CaO, MgO, TiO₂和Fe百分含量的多元回归显示, 它们和介电常数之间倾向于符合一个多元一次函数, Ti氧化物或Fe氧化物或Ti、Fe氧化物组合均未表现出其在对介电常数贡献上的特征组分的作用.

关键词 模拟月壤样品 介电常数 密度 微波频率 组分 回归分析 相关系数

岩石介电特性的研究始于20世纪30年代^[1,2], 使用的主要是无线电频率. 60年代初, 少数学者如Campbell等对固体和粉末状的地球岩石进行了几个微波频点的介电测量^[3]. 60年代末至70年代初, 随着美国和前苏联探月的成功, 岩石介电特性的研究活动进入了一个空前的高潮. 世界许多国家的介电物理学学者们利用美国Apollo登月和前苏联Luna系列探测器所采回的月球浅表样品对月表物质包括月壤的介电常数进行了测量和研究, 探讨了月球物质介电常数和密度、频率以及化学成分的关系^[4~12]. 尔后, 随着月球探测的告一段落, 人们对岩石介电特性的大规模研究也基本趋于停止. 这种状况持续了大约10年. 直到1989年美国提出“重返月球”的口号后, 出于进一步深入探索月球的需要, 岩石介电特性的研究才再次提上日程. 与过去不同的是, 新一轮的岩石介电特性研究把更多的关注投向了微波领域. 为配合用雷达进行的地质学研究以及雷达和辐射计对金星的探测, Ulaby等^[13]在0.5~18 GHz范围内对地球上的流纹岩、辉绿岩、灰岩等80个固体岩石样品的介电常数进行了详细的测量和相应的数学分析. 紧接着, Heiken, Vaniman和French^[14]出版了Lunar Sourcebook: a User's Guide to the Moon一书, 对过去

包括月球物质介电特性在内的多学科的研究成果进行了总结. 然而, 这些工作和我们今天对月球进行微波观测所需要了解的月球物质、特别是月壤的微波介电特性还有相当大的差距. 如对真实月壤的介电特性研究绝大部分集中在无线电频段, 微波频段的资料很少, 而Ulaby和Campbell等人的研究对象则是地球岩石等. 当然, 要对月壤的微波介电特性进行研究, 必须解决这样一个问题: Apollo和Luna所带回的真实月壤量有限, 不可能满足大规模实验的要求. 但是, 由于地球岩石和月岩在组成上的相似性, 使得我们利用地球岩石成分模拟月壤成为可能^[15,16].

为配合我国即将发射的绕月星载微波辐射计对月观测亮温资料反演的需要, 作者在野外采集大量地球玄武岩和斜长岩样品并对其化学主元素进行X射线荧光分析的基础上, 配制了9个模拟月壤样品. 尔后各制成5个密度等级, 在0.5~20 GHz的频率范围内用同轴线终端开路法在HP8722C网络分析仪上对它们的介电常数进行了测量, 并利用数理统计方法对测量结果进行了综合分析和处理.

本文首先对整个实验, 包括样品的制备、测量手段和测量结果等加以介绍, 然后重点对月壤微波介电特性与密度、频率和用主元素氧化物代表的组分的

关系进行分析和探讨.

1 样品的制备、实验设计、测试手段与测试数据

1.1 样品的制备

我们在野外采集了大量地球玄武岩和斜长岩样品, 并利用X射线荧光光谱对其主元素氧化物成分进行了分析; 然后参照月壤成分筛选出配比对象; 最后将选中的样品研磨至 200 目以下, 和加入的成分充分混合. 该配制方式较大程度地反映了月面下相当深度月壤的发育情况和成熟度. 其主要依据为: 由于陨石持续不断的撞击, 月壤的颗粒已变得很细, 小于 1 mm 者约占 90%^[17], 尺寸主要集中于 40 ~ 130 μm 的范围^[18]; 月壤在上部月亮有相当的厚度, 从 3 m 到 12 m^[18]. 因为在微波范围内, 对介电常数作出贡献的主要是构成化合物的外层价电子^[19], 模拟月壤的配制主要采取了化学成分逼近的方法. 同时, 鉴于月球样品皆不含水, 而水对介电常数的影响强烈, 选出的地球样品在配制月壤前都除去了结晶水.

1.2 实验设计

影响物质介电常数的因素较多, 除了水分外, 主要还有密度、成分、温度、频率和结构. 由于本研究中的样品都是统一粒度的细粒物质且温度的变化对介电常数的影响很小^[3], 故没有考虑结构和温度因素的作用. 本研究共配制了 9 个模拟月壤样品. 为便利考察钛(Ti)含量对介电常数的影响并顾及目标成分Ti氧化物含量的适当间距, 它们依氧化钛百分比含量的多少从低到高排序和命名为MS1, MS2, ..., MS9, 并各制成 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 和 1.6 g/cm^3 五个密度等级. 测量过程中使用 0.5~20 GHz 的频率. 样品的化学成分如表 1 所示.

1.3 测试手段

样品介电常数的测试主要用三级等效电路同轴线终端开路法在我室 HP8722C 矢量网络分析仪上进行, 该仪器可以使用同轴线终端开路法、波导法和自由空间法对多种物态的样品进行测量, 测量范围为 200 MHz~40 GHz, 并提供多种数据和图表输出方式. 限于条件, 本测试选择了同轴线终端开路法. 该方法介电常数 ϵ' 和损耗正切 ϵ''/ϵ' 测量精度为 ± 0.05 , 测试所用探头及同轴线为仪器原始专用配套设备. 利用同轴线终端开路法测量物质介电常数的原理见文献^[20, 21]. 测量过程为:

(1) 校正仪器

仪器的校正仪器启动适当的时间后进行. 校正分三个步骤: 首先将探头暴露于空气中进行空气校正; 然后用短路器对仪器进行短路校正; 最后用 25 μm 去离子水对仪器进行校正. 待三种校正完成后再对已知介电常数的物质如空气或去离子水或聚氯乙烯等进行验证性测量. 待测量数据合格后方能转入实际样品测量过程. 否则必须对仪器进行重新校正. 此外, 为保证测量精度, 校正仪器前首先必须对测量去离子水温度的温度计实施校正; 而且, 在仪器校正和所有测量过程中, 始终保持同轴线稳定.

(2) 样品测试

样品的厚度按测试要求要大于探头的直径; 样品和探头的接触面要光滑, 面积要大于探头的面积, 以期得到良好的电接触. 样品在测试前均需在干燥箱中加热至 105 $^{\circ}\text{C}$ 后保持 15 min 以除去其中的吸附水. 测试时应保持样品表面和探头表面良好接触. 每次测量正式样品前均需对探头进行验证性测量, 发现数据偏差较大, 则必须重复(1)的完整校正过程. 具体测量方法和某些操作细节请参见 HP8722C 矢量

表 1 模拟月壤样品化学成分

样品	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	Fe ₂ O ₃
MS1	45.7156	13.6287	0.1506	9.3132	13.0084	0.0354	1.8254	1.0545	14.7984
MS2	45.1570	21.1285	0.0166	7.8300	8.8823	0.9363	4.4080	1.3589	10.1417
MS3	45.0737	13.4218	0.1672	7.9744	8.9774	1.6716	4.2183	2.4877	14.8181
MS4	45.5105	12.9949	0.1610	8.0034	8.3539	2.1027	3.8360	2.8983	14.9839
MS5	44.1070	14.7036	0.1065	10.9024	11.8857	0.4318	1.828	3.6799	12.3174
MS6	42.4032	19.7419	0.0242	6.4274	10.0887	1.1129	4.2742	3.9355	11.8710
MS7	42.7880	13.1743	0.1320	8.4925	7.6740	0.6776	3.7842	7.2076	15.8145
MS8	39.5816	12.4519	0.1757	8.7029	10.5858	0.4603	2.8452	8.2427	16.6192
MS9	40.0282	11.7461	0.3082	8.7875	6.1460	0.4138	2.3069	11.1473	18.5877

网络分析仪操作手册.

1.4 测试数据

所有测试数据已列表公布于其他文献中¹⁾. 因数据量大, 每个样品的测量内容单独置于一表. 表格所示内容包括样品密度、测试频率、介电常数的实部 ϵ' 和虚部 ϵ'' , 每组数据皆为 3~5 组测量数据的平均.

2 介电常数和密度的关系

2.1 测量结果的投影与数值特征

图 1 为模拟月壤样品在频率为 0.5000, 2.9375,

4.8875, 7.8125, 9.7625, 10.250, 14.6375 和 19.5125 GHz 时介电常数实部和虚部随密度的变化. 图中不同的曲线为不同样品介电常数随密度变化的平面直角坐标投影. 从图中可以看出, 介电常数实部变化规律性很明显, 随着密度的增大, 呈较快速上升趋势, 曲线呈一狭窄的带. 宏观上, 同一频率不同成分或不同频率同一成分样品介电常数实部的变化都相似. 介电常数虚部在 $> 0.5 \sim 10$ GHz 范围内随着密度的增加亦呈较明显的上升势态, 各图中曲线带更狭窄. 约从 10 GHz 左右开始, 曲线出现不规则变化. 计算表

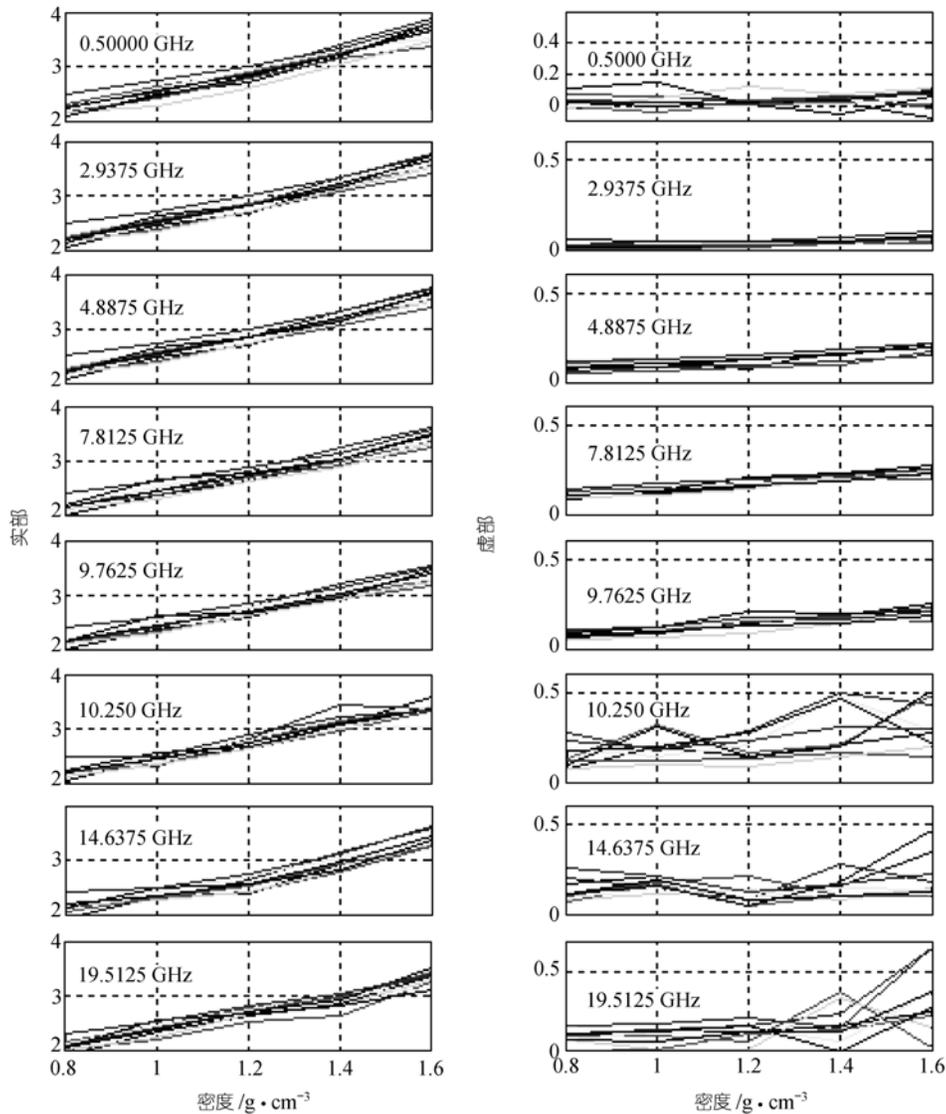


图 1 模拟月壤样品介电常数实部和虚部随密度变化图

1) 李涤微等. 不同微波频率下几种粉末状金属氧化物混合物和模拟月壤的介电特征. 中国科学院空间科学与应用研究中心, 实验报告, 2004. 1~48

明, 从 0.8 g/cm^3 至 1.6 g/cm^3 , 对于所有介电常数数据, 实部最小值为 1.9184, 最大值为 3.8685, 后者是前者的约两倍, 与密度的差值相当; 0.8 g/cm^3 时所有样品的平均值为 2.1560, 1.6 g/cm^3 时为 3.4288, 后者是前者的 1.6 倍. 0.8 g/cm^3 时所有样品虚部的平均值为 0.0844, 1.6 g/cm^3 时为 0.1922, 后者是前者的 2.3 倍, 比实部变化的幅度稍大. 同时, 从实部和虚部的最小均值至它们的最大均值的变化是持续递增的.

2.2 测量结果的统计分析

上述图形特征表明, 模拟月壤样品介电常数实部和虚部随密度的变化大体上符合线性变化. 若令模拟样品的密度为 x , 介电常数的实部或虚部为 y , 设数学期望 $E(y) = a + bx$, 对于 x 的每一个值, 设 y 服从正态分布, 即 $y \sim N(a + bx, \sigma^2)$. 从而可以构筑以下方程:

$$y = a + bx + \varepsilon, \varepsilon \sim N(0, \sigma^2),$$

这里 σ^2 为变量 x 与 y 的协方差, ε 为测量的随机偏差, a, b, σ^2 和 ε 都不依赖于 x .

对测量数据进行线性回归分析, 我们可以得到表 2 所示的数据.

数据表明, 实部和样品密度符合严格的线性关系, 随着密度的增加而线性增大(见表 2 上半部分数据), 二者间的相关系数经计算平均为 0.99; 与其图形特征相对应, 介电常数虚部在 $>0.5 \sim 10 \text{ GHz}$ 范围内与密度也基本呈线性关系(见表 2 下半部分数据), 二者的相关系数平均为 0.94, 但在 $10 \text{ GHz} \sim 20 \text{ GHz}$ 范围内则情况显得复杂, $0.5 \sim 20 \text{ GHz}$ 整个测试频段二者的相关系数降为平均 0.69. 此外, 实部和虚部函数一次项系数的检验分析显示, 虚部上升的速度受频率的影响, 而和组分关系不大; 实部上升的快慢则同时受到频率和组分的干扰. 但实部随密度变化的明显线性规律说明, 频率和组分的干扰比密度要弱得多.

3 介电常数随频率的变化

3.1 测量结果的投影与数值特征

图 2 为不同密度模拟月球样品介电常数实部、虚部随频率变化的平面直角坐标投影. 图中不同的曲线表示不同的样品. 实部和虚部在频率的影响下呈现出相反的变化规律. 实部在 500 MHz 至 20 GHz 频率范围内随频率的上升整体表现为下降的趋势, 而虚部则呈微弱的上升趋势. 各样品介电常数实部对频率的投影曲线较少重叠, 暗示了该情形下组分的

明显影响. 类似于随密度变化的情形, 在约 $0.5 \sim 10 \text{ GHz}$ 范围内, 虚部投影曲线重叠严重, $10 \sim 20 \text{ GHz}$ 曲线波动幅度增大, 少数曲线呈跳跃变化. 计算显示, 从 0.5 GHz 至 19.5125 GHz , 实部的最大差值为 0.8816, 最小差值为 0.5843; 虚部的最大差值为 0.7380, 最小差值为 0.2906. 显然, 频率变化所引起的介电常数变化要较密度作用逊色.

3.2 测量结果的统计分析

表 3 为介电常数实部和虚部的的一元线性回归分析结果, 表上半部为实部对微波频率的回归数据, 下半部为虚部对微波频率的回归数据. 数据表明, 在 $0.5 \sim 20 \text{ GHz}$ 范围内, 实部和频率之间亦遵循严格的线性关系, 随着频率的上升, 实部稳步减少. 相关分析显示, 二者之间的相关系数平均为 -0.73 . 对回归方程一次项系数的检验分析表明, 该情形下, 介电常数实部减少的快慢受密度的影响, 而与组分的变化无关. 虚部大部分样品亦遵循线性变化规律, 但二者相关程度大幅度降低, 仅为 0.34, 说明频率对介电常数虚部的作用远没有密度强烈, 这和图 3 中显示的介电常数虚部的很缓慢的变化相对应. 线性函数一次项系数的检验分析表明, 虚部上升的斜率同时受到密度和组分的影响.

4 介电常数和组分的关系

4.1 测量结果的投影特征

图 3 是模拟月壤样品介电常数实部、虚部随 TiO_2 含量变化平面直角坐标投影图, 图中不同曲线代表不同的密度. 介电常数实部各曲线间距较大, 从下至上曲线所表示的样品密度依次为 $0.8, 1.0, 1.2, 1.4$ 和 1.6 g/cm^3 , 体现了密度的强烈影响. 从图上可以看出, 在不同的频率状态和不同的密度水平, 实部和虚部随组分的变化幅度都不大, 图像特征基本类似. 实部变化的图像相对较为规则, 而虚部除 0.5 GHz 的情形外, 低于 10 GHz , 图形变化都较平稳, $10 \sim 20 \text{ GHz}$ 则出现较大的波动、跳跃. 这与上面实部和虚部随密度与频率变化所出现的情况相同.

4.2 测量结果的统计分析

根据方差分析的结果, 组分对介电常数的实部和虚部都有贡献, 但粗略的三元回归分析表明, 其影响在三种因素中最小. 介电常数实部和 Ti 氧化物

表 2 模拟月壤样品介电常数随密度变化回归数据^{a),b)}

频率 (GHz)	MS1			MS2			MS3			MS4			MS5			MS6			MS7			MS8			MS9		
	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>p</i>																								
0.5000	2.036	0.412	0.002	2.028	0.567	0.001	1.553	0.916	0.000	1.718	0.647	0.003	1.642	0.974	0.000	1.643	0.950	0.000	1.754	0.803	0.000	2.007	0.455	0.000	1.609	1.140	0.001
2.9375	1.998	0.413	0.001	1.935	0.586	0.000	1.551	0.887	0.000	1.758	0.653	0.001	1.637	0.917	0.000	1.630	0.977	0.000	1.771	0.765	0.000	1.836	0.693	0.002	1.590	1.157	0.001
4.8875	1.983	0.429	0.001	1.922	0.610	0.000	1.547	0.897	0.000	1.717	0.713	0.001	1.614	0.937	0.000	1.612	0.996	0.000	1.749	0.784	0.000	1.764	0.781	0.002	1.569	1.160	0.001
7.8125	1.815	0.513	0.000	1.845	0.635	0.000	1.355	1.039	0.000	1.521	0.811	0.001	1.477	0.951	0.000	1.487	1.007	0.000	1.606	0.819	0.000	1.537	0.971	0.004	1.433	1.193	0.001
9.7625	1.757	0.554	0.000	1.783	0.659	0.000	1.364	0.989	0.000	1.491	0.832	0.000	1.431	0.975	0.000	1.462	1.007	0.001	1.567	0.846	0.000	1.489	0.980	0.006	1.418	1.189	0.001
10.250	1.865	0.498	0.001	1.717	0.744	0.014	1.457	0.927	0.001	1.601	0.761	0.001	1.545	0.901	0.001	1.143	1.314	0.008	1.503	0.949	0.000	1.394	1.087	0.001	1.226	1.385	0.006
14.6375	1.622	0.623	0.003	1.863	0.527	0.003	1.375	0.929	0.009	1.393	0.923	0.009	1.504	0.815	0.001	1.522	0.909	0.000	1.548	0.845	0.003	1.396	1.003	0.010	1.515	1.058	0.007
19.5125	1.714	0.567	0.001	1.561	0.848	0.000	1.447	0.791	0.009	1.542	0.758	0.002	1.531	0.916	0.001	1.289	1.164	0.005	1.720	0.660	0.001	1.186	1.224	0.008	1.332	1.222	0.000
0.5000	-0.063	0.064	0.414	0.095	-0.070	0.036	-0.084	0.143	0.124	0.146	-0.111	0.092	0.041	-0.046	0.334	0.050	-0.048	0.170	0.081	-0.069	0.123	-0.151	0.236	0.287	0.057	-0.031	0.135
2.9375	0.057	-0.035	0.005	0.089	-0.048	0.018	0.024	0.002	0.098	0.073	-0.051	0.005	0.055	-0.041	0.015	0.043	-0.016	0.035	0.059	-0.035	0.021	0.019	0.036	0.309	0.062	-0.036	0.039
4.8875	0.175	-0.080	0.051	0.108	-0.028	0.004	0.137	-0.071	0.032	0.168	-0.056	0.001	0.144	-0.019	0.000	0.129	-0.009	0.000	0.141	-0.032	0.001	0.165	-0.067	0.015	0.126	0.009	0.004
7.8125	0.247	-0.129	0.002	0.179	-0.045	0.001	0.103	0.045	0.017	0.206	-0.087	0.006	0.155	-0.021	0.000	0.140	0.000	0.000	0.151	-0.019	0.000	0.197	-0.056	0.004	0.135	0.033	0.001
9.7625	0.238	-0.142	0.001	0.173	-0.051	0.001	0.073	0.050	0.056	0.195	-0.123	0.020	0.121	-0.017	0.002	0.107	0.005	0.033	0.132	-0.036	0.002	0.160	-0.029	0.046	0.122	0.006	0.011
10.250	0.200	-0.062	0.059	0.315	-0.048	0.116	0.037	0.088	0.219	0.156	-0.071	0.021	0.306	-0.110	0.226	0.258	-0.052	0.256	0.355	-0.175	0.195	0.178	0.050	0.410	0.127	0.094	0.108
14.6375	0.151	0.023	0.328	0.049	0.119	0.717	-0.016	0.165	0.868	0.050	0.055	0.392	-0.006	0.109	0.945	0.041	0.076	0.440	-0.028	0.155	0.727	0.355	-0.236	0.181	-0.053	0.261	0.606
19.5125	0.159	-0.041	0.045	0.601	-0.465	0.080	0.064	0.053	0.820	0.241	-0.177	0.326	0.286	-0.249	0.004	0.274	-0.174	0.213	0.335	-0.253	0.082	0.090	0.025	0.638	0.483	-0.308	0.190

a) 表的下半部分为介电常数虚部随密度变化回归数据; b) *a*, *b* 和 *p* 分别为回归方程的常数项, 一次项系数和回归的显著性水平

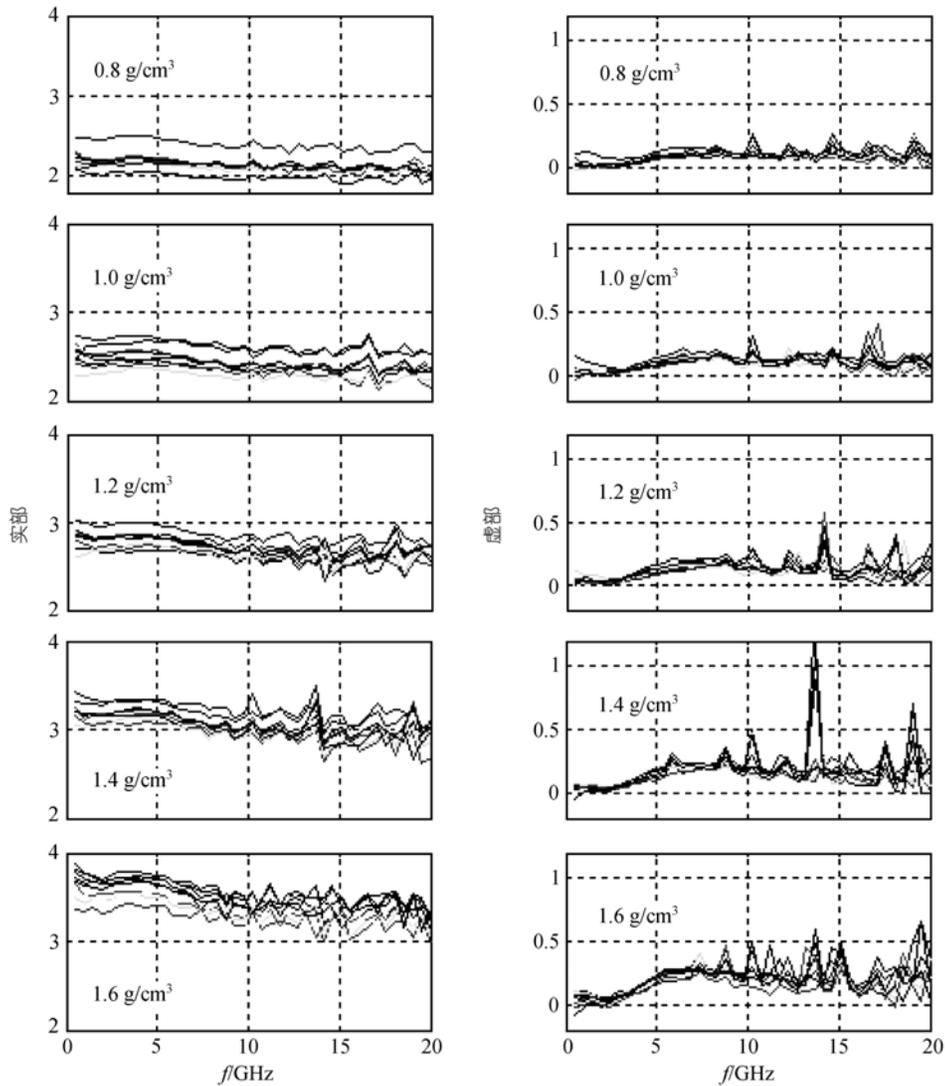


图 2 不同密度模拟月球样品介电常数实部和虚部随频率变化图

(TiO₂)组分间的相关系数仅为 0.49, 虚部和Ti氧化物组分间的相关系数仅为0.24. 以每个样品的所有主元素氧化物含量以及Ti氧化物含量或铁(Fe)氧化物含量或Ti, Fe氧化物含量组合对介电常数进行多种拟合和回归的尝试, 结果表明, 它们和介电常数之间的相互作用不遵循简单的函数关系, Ti氧化物或Fe氧化物或Ti, Fe氧化物组合也并未表现出有的学者^[5]所推测的对介电常数贡献明显有别于其他组分的现象. 鉴于物质化学成分组合方面量和质的极其多样性以及相应微观结构的千差万别, 组分对介电常数作用的机理可能比密度和频率的影响要复杂得多. 二者之间的精确函数关系有待于更进一步的研究. 本研究还考察了各主元素氧化物对介电常数贡献的数量关系.

研究中以每个样品主元素氧化物SiO₂, Al₂O₃, CaO, MgO, Na₂O, TiO₂和ΔFe的百分含量作为随机变量的自变量, 介电常数的实部和虚部作为因变量进行了一次多项式回归分析, 结果发现, 大多数样品符合所设定的关系式. 将上述几个氧化物中含量最低的Na₂O从自变量中除去后, 再进行一次多项式回归分析所得出的关系式中, 介电常数实部和虚部和代表各组分的自变量间具有很好的对应. 除 0.5 GHz和 19.5 GHz实部回归结果的置信度稍低于95%外, 其余频段样品介电常数实部、虚部皆大于 95%(表 4). 代表各氧化物的自变量的系数的大小, 在不同的样品中和不同的频段, 差别大多在千分之几的量级, 最大不超过百分之几. 另外, 从回归的数据看, 各元素氧

表3 模拟月壤样品介电常数与微波频率关系回归分析^{a)b)}

样品	0.8 (g/cm ³)			1.0 (g/cm ³)			1.2 (g/cm ³)			1.4 (g/cm ³)			1.6 (g/cm ³)		
	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>p</i>												
MS1	-0.0052	2.0492	0	-0.0075	2.4521	0	-0.009	2.6825	0	-0.0172	3.225	0	-0.0242	3.719	0
MS2	-0.0056	2.2135	0	-0.0083	2.4898	0	-0.0099	2.8468	0	-0.0145	3.3712	0	-0.02	3.7659	0
MS3	-0.0083	2.2059	0	-0.0117	2.4421	0	-0.0142	2.7565	0	-0.018	3.1246	0	-0.014	3.3992	0
MS4	-0.0048	2.154	0	-0.0057	2.3395	0	-0.0056	2.6918	0.0012	-0.0122	3.0953	0	-0.0185	3.5153	0
MS5	-0.0086	2.2455	0	-0.0113	2.5648	0	-0.0115	2.8329	0	-0.0113	3.1698	0.0003	-0.0163	3.5386	0
MS6	-0.0071	2.2623	0	-0.0088	2.5871	0	-0.0124	2.9461	0	-0.0174	3.3324	0	-0.0185	3.5242	0
MS7	-0.0072	2.2222	0	-0.0102	2.5443	0	-0.0098	2.8242	0	-0.0104	3.1873	0.0002	-0.0169	3.6376	0
MS8	-0.0032	2.167	0	-0.0046	2.6493	0	-0.0145	2.8411	0	-0.0191	3.1925	0	-0.021	3.7247	0
MS9	-0.0093	2.4932	0	-0.0107	2.7193	0	-0.0121	2.9819	0	-0.0131	3.3227	0	-0.0209	3.7802	0
MS1	0.0046	0.0218	0	0.0046	0.0552	0	0.0055	0.0545	0.0002	0.0066	0.1049	0.0019	0.0107	0.1073	0.0005
MS2	0.0045	0.0413	0	0.0032	0.0618	0.01	0.0064	0.0588	0.0015	0.0135	0.0687	0.0099	0.0136	0.0909	0
MS3	0.0024	0.0552	0.01	0.0039	0.0594	0.03	0.004	0.0727	0.0515	0.005	0.0847	0.0098	0.0063	0.0746	0.02
MS4	0.0032	0.0342	0	0.0024	0.0646	0.0958	0.0006	0.1064	0.7477	0.0025	0.1094	0.2031	0.0023	0.1564	0.3072
MS5	0.0007	0.0639	0.56	0.0016	0.0784	0.4013	0.0024	0.0907	0.3345	0.0017	0.1222	0.4385	0.0054	0.1368	0.0978
MS6	0.003	0.0561	0.03	0.0025	0.0756	0.0728	0.0034	0.0855	0.0556	0.005	0.1156	0.147	0.0063	0.1166	0.0121
MS7	0.0024	0.0518	0.02	0.0026	0.0683	0.1053	0.004	0.0769	0.0594	0.0045	0.0977	0.026	0.007	0.1202	0.0151
MS8	0.0022	0.0834	0.02	0.0016	0.0968	0.1362	0.0012	0.108	0.6309	0.0039	0.1242	0.4452	0.0034	0.1583	0.3366
MS9	0.005	0.0647	0	0.0051	0.0794	0.0027	0.0067	0.0834	0.0006	0.0102	0.0959	0.018	0.0077	0.1257	0.0107

a) 表的下半部分为介电常数虚部随频率变化回归数据; b) *a*, *b* 和 *p* 的涵义同表 2

表4 介电常数对主元素氧化物含量的回归结果^{a)}

频率(GHz)	常数项	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	Fe	误差
0.5	2.1024	-0.0135	0.0439	0.0551	-0.0107	0.018	0.0152	0.0985
2.9375	0.9014	0.0323	0.0227	-0.0105	0.0166	0.0677	-0.0144	0.0488
4.8875	0.7979	0.038	0.0194	-0.0171	0.0178	0.0678	-0.0178	0.0492
7.8125	2.5449	-0.0221	0.0402	0.0313	-0.0139	-0.0036	0.0301	0.0257
9.7625	0.7129	0.0131	0.0451	0.0328	-0.0081	0.0237	0.0295	0.0301
14.6375	-0.4234	0.034	0.0544	0.0069	0.0082	0.061	0.019	0.0398
19.5125	-2.7982	0.1031	0.0262	-0.0168	0.0455	0.1117	-0.012	0.0524
0.5	1.537	-0.0155	-0.0194	-0.0021	-0.0215	-0.0198	-0.0163	0.0374
2.9375	0.6877	-0.0172	0.003	0.0086	-0.0074	-0.0169	0.0088	0.0119
4.8875	-0.34	0.023	-0.0133	-0.0223	0.0115	0.0344	-0.029	0.0279
7.8125	1.302	-0.0275	0.0025	0.0133	-0.01	-0.0187	0.0064	0.0116
9.7625	2.0584	-0.0533	0.0119	0.029	-0.0156	-0.0417	0.0223	0.0172
14.6375	0.8708	-0.0181	0.0009	0.004	-0.0216	-0.0366	0.0243	0.0407
19.5125	-1.6439	-0.0028	0.0484	0.0396	0.0055	0.0033	0.0531	0.0153

a) 表的下半部分为介电常数虚部对主元素氧化物回归数据

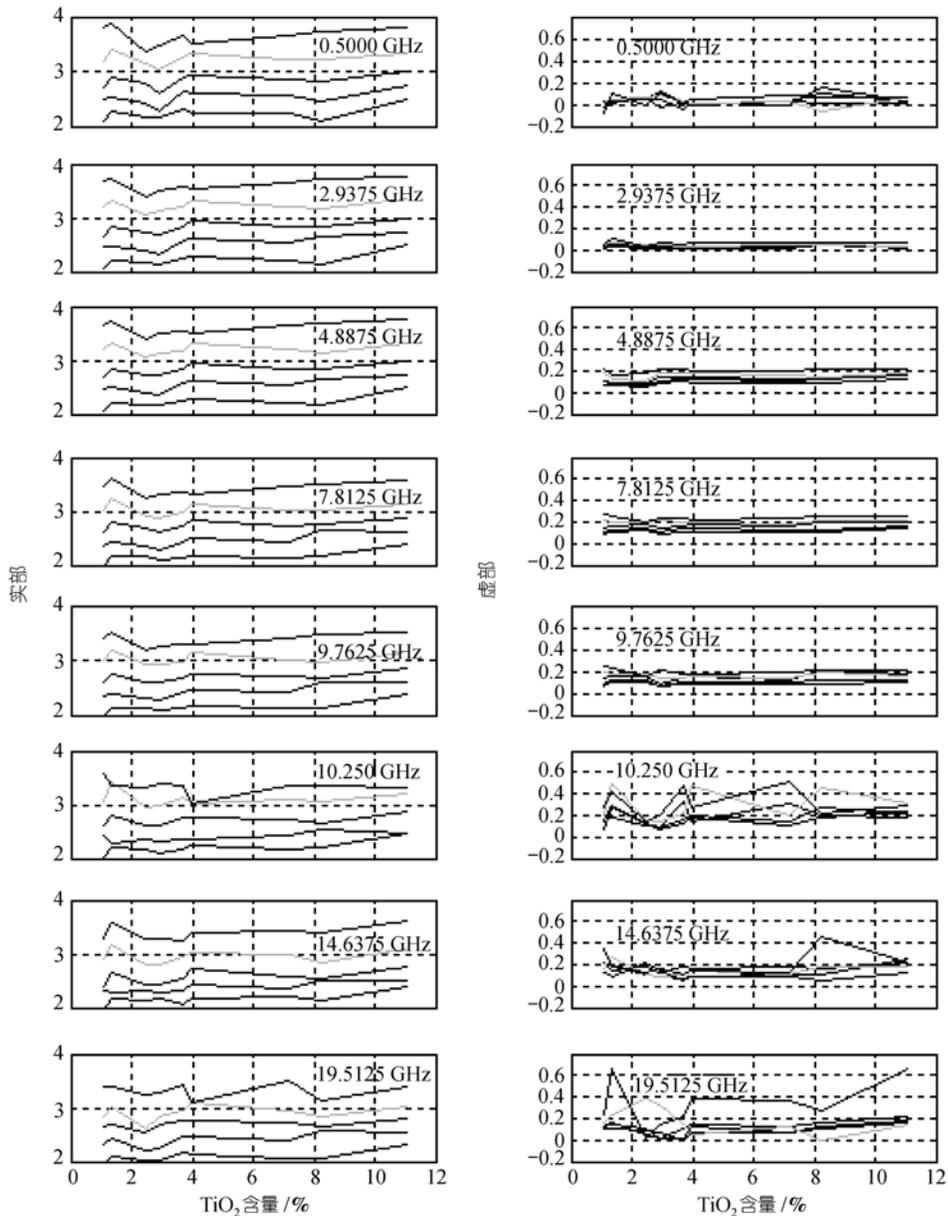


图 3 模拟月壤样品复介电常数实部、虚部随TiO₂含量变化图

化物在不同的样品中表现出不同的性质,有的是起增加介电常数的作用,有的则是起减少介电常数的作用. Fe 或 Ti 的氧化物也不例外,也未表现出鹤立鸡群的特殊介电性质. 值得注意的是,组分对介电常数的贡献似乎主要决定于各元素氧化物的含量,其次才是氧化物的性质. 因此, Fe 和 Ti 是否为导致月壤或月岩介电常数高于同类地球岩类的特征组分,有待更多的工作加以证实.

5 结论

本研究表明:

密度、频率、组分三者对介电常数都有贡献,但以密度的影响最为显著,频率次之,组分最小. 介电常数实部与密度的相关系数平均为 0.99,虚部与密度的相关系数在低于 10 GHz 的频率下平均为 0.94;介电常数实部与频率的相关系数平均为 -0.73,虚部与频率的相关系数平均为 0.34;介电常数实部和

表5 模拟月壤样品与前人研究结果对比

研究者	测试方法	测试频率及频谱	测试对象	介电常数随密度增加变化及相关性		介电常数随频率增加变化及相关性		介电常数随组分增加变化及相关性	
				实部	虚部	实部	虚部	实部	虚部
Ulaby 等	同轴线终端开路、谐振腔	0.5~18 GHz; 连续+点频	多种地球岩石	增加	关系不大	无关	降低	增加	增加
Heiken 等	综合	<10 MHz、450MHz、9.375 GHz; 综合	多种尺寸月球样品	增加	增加; 强烈相关	无关、几乎无关	快速上升; 强烈相关	无关	增大; 强烈相关
本文	同轴线终端开路	0.5~20 GHz; 连续	细粒模拟月壤	增加, 强烈相关	增加; 0.5~10 GHz 强烈相关	缓慢减少; 中等负相关	缓慢上升; 弱相关	微弱相关	变化不明显; 微弱相关

TiO₂百分重含量间的相关系数为 0.49, 和SiO₂百分重含量间的相关系数为 0.47, 虚部和TiO₂百分重含量间的相关系数为 0.24, 和SiO₂百分重含量间的相关系数为 0.25. 密度、频率、组分对介电常数实部的影响所占比例大约为 45%, 33%, 22%, 对虚部的影响约为 55%, 27%, 19%.

介电常数实部在 0.5~20 GHz 范围内与密度、频率呈线性关系, 尤其与前者呈相当严格的线性关系. 在组分和频率不变的情况下, 随着密度的增加, 实部呈线性较快速增加; 在组分和密度不变的情况下, 随着频率的增加, 实部线性缓慢下降. 虚部则在约 0.5~10 GHz 范围内, 与密度、频率呈较好的线性关系, 10 GHz~20 GHz, 与后两者的关系变得较为复杂. 组分和介电常数间一般不具有线性关系. 各氧化物组分含量的多少可能决定着其对介电常数贡献的大小. 本研究中, 主元素氧化物SiO₂, Al₂O₃, CaO, MgO, Na₂O, TiO₂和 Fe是模拟月壤样品介电常数组分所引起部分的主要同时也是地位相等的贡献者, Ti未显示出其在影响介电常数方面的特征组分的作用.

我国计划于 2007 年发射的绕月飞行卫星上, 将装载一台我国自行研制的四波段的微波辐射计对月球进行微波观测, 收集月面的微波亮温资料. 微波亮温是物质介电常数的函数, 自然界中岩石和土壤的密度和深度直接相关. 因而, 物质介电常数和密度关系的确定将有助于我们利用微波亮温资料反演月壤的厚度, 而介电常数和组分关系的确定则会帮助我们对月球的物质构成作出评估. 在这些方面, 我国的学者已做了许多有意义的尝试. 如, 他们利用岩石介电常数和微波亮温之间的相关性, 对水陆界限、岩石类型、不同构造线和铁矿体进行了区分^[22,23]. 他们的工作为我们微波亮温反演的深入研究提供了很好的

借鉴.

本研究总结出的介电常数随密度、频率、组分变化具有的明显规律性, 反映了我们所使用手段进行类似综合研究的有效性. 我们把模拟月壤的研究结果与 Heiken 等人月球样品、Ulaby 等人地球岩石研究的结果列表(表 5)作一对比. 从表中可以看出, 在密度和介电常数实部的关系上, 模拟月壤的研究结果与 Heiken 等人和 Ulaby 等人相当一致, 密度对介电常数实部影响的量化指标和 Ulaby 等人估算的 50%也比较接近. 进一步说明了密度对介电常数的突出影响. 令人感兴趣的是, 模拟月壤介电特性的研究结果多数和前人实际月样的研究结果比较接近, 而和 Ulaby 等人的结论差距稍大. 这意味着模拟月壤和实际月样在介电性质上还是比较相似的, 也为我们通过模拟月壤介电特性的进一步研究来了解真实月壤的介电特性奠定了基础. 同时, 我们也注意到, 本研究和他们的研究结果不尽相同, 而他们的研究结果间也存在着不同程度的差别. 这很大程度上应归结于各自的实验对象、测量方式以及所使用频率等方面的差异. 如, 本研究样品的结构是相同的, 为较细粒物质, 密度、频率、组分在实验中都可按实验要求较精确控制和组合. Heiken 等人和 Ulaby 等人的样品则种类繁多、结构各异, 在考察介电常数随某目标因素变化的关系中往往难以避免其它影响因素. 再如, 本研究样品不含吸附水和结晶水, 而月样甚至连结构水也没有, Ulaby 等人的样品则同时包含了结晶水和结构水. 等等. 另外, 本研究在组分对介电常数虚部的作用程度上与前人的月样研究结果和 Ulaby 等人的地球岩石样品结果都存在着差异. 鉴于上面所述及的彼此在实验对象、测量方式和所使用频率等方面

的不同以及组分影响的复杂性,我们还难以对各自的结论做出肯定或否定的判断。然而,基于介电常数虚部对微波亮温反演的重要性,组分介电特性的进一步研究将是我们下一步工作的重点之一。

致谢 介电常数的测试工作得到国家八六三计划微波遥感技术实验室领导和班守正研究员的大力帮助和支持,并承蒙中国科学院地质与地球物理研究所边千韬研究员提供了部分岩石样品、曹杰和王红月工程师担任了本研究野外样品的化学主元素分析,国家八六三计划微波遥感技术实验室张升伟研究员、郭伟博士、王振占博士在研究过程中提出了很好的建议,在此深表谢忱。

参 考 文 献

- 1 Bayley P L. Dielectric losses in rock salt. *Phys Rev*, 1933, 43(2): 355~357
- 2 Berg G A. Dielectric separation of mineral grains. *J Sed Petrol*, 1936, 6: 23~27
- 3 Campbell M J, Ulrichs J. Electrical properties of rocks and their significance for lunar radar observations. *J Geophys Res*, 1969, 74(25): 5867~5881
- 4 Bassett H L, Shackelford R G. Dielectric properties of Apollo 14 lunar samples at microwave and millimeter wavelengths. *Geochim Cosmochim Acta*, 1972, Suppl: 3
- 5 Chung D H, Westphal W B, Simmons G. Dielectric properties of Apollo 11 lunar samples and their comparison with earth materials. *J G R*, 1970, 75: 6524~6531
- 6 Chung D H, Westphal W B, Simmons G. Dielectric behavior of lunar samples: Electromagnetic probing of the lunar interior. *Geochim Cosmochim Acta*, 1971, Suppl(2): 2381~2390
- 7 Chung D H, Westphal W B, Olhoeft G R. Dielectric properties of Apollo 14 lunar samples. *Geochim Cosmochim Acta*, 1972, Suppl(3): 3161~3172
- 8 Gold T, O'Leary B T, Campbell M. Some physical properties of Apollo 12 lunar samples. *Geochim Cosmochim Acta*, 1971, Suppl(2): 2173~2181
- 9 Hansen W, Still W R, Ward S H. The dielectric properties of selected basalts. *Geophysics*, 1973, 38: 135~139
- 10 Olhoeft G R, Strangway D W. Dielectric properties of the first 100 meters of the moon. *Earth Planet Sci Lett*, 1975, 24: 394~404
- 11 Strangway D W. Moon: Electrical properties of the uppermost layers. *Science*, 1969, 16: 275
- 12 Strangway D W, Chapman W B, Olhoeft G R, et al. Electrical properties of lunar soil dependence on frequency, temperature and moisture. *Earth Planet Sci Lett*, 1972, 16: 275~281
- 13 Ulaby Fawwaz T, Bengal Thomas H, Dobson Myron C, et al. Microwave dielectric properties of dry rocks. *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, 1990, 28(3): 325~336[DOI]
- 14 Heiken Grant H, Vaniman David T, French Bevan M. *Lunar Sourcebook: a user's guide to the moon*. New York, Port Chester, Melbourne, Sydney: Cambridge University Press, 1991. 536~552
- 15 Alvarez R. Lunar Powder Simulator under Lunarlike Conditions: Dielectric Properties. *J Geophys Res*, 1973, 78(29): 6833~6844
- 16 McKay D S, Carter J L, Boles W W, et al. JSC-1: A NEW LUNAR SOIL SIMULANT, Engineering, Construction, and Operations in Space IV, American Society of Civil Engineers, 1994, 857~866
- 17 Duke M B, Woo C C, Bird M L, et al. Lunar soil: size distribution and mineralogical constituents. *Science*, 1970, 167: 648~650
- 18 Kulcinski G L. Extraction of Solar Wind Volatiles. <http://fti.neep.wisc.edu/neep602/lecture 18.html>, 1996
- 19 倪尔瑚. 材料科学中的介电谱技术. 北京: 科学出版社, 1999. 26~31
- 20 Stuchly Maria A, Brady Michael M, Stuchly Stanislaw S, et al. Equivalent Circuit of an Open-Ended Coaxial Line in a Lossy Dielectric. *IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT*, 1982, IM-31(2): 116~119
- 21 周清一. 微波测量技术. 北京: 国防工业出版社, 1964. 286~307
- 22 Teng Xuyan, Xiao Jinkai, Shi Changging, et al. Passive microwave radiometry in the Gobi-Desert region. *Remote Sensing of Environment*, 1984, 15(1): 37~46[DOI]
- 23 肖金凯. 矿物和岩石的介电性质研究及其遥感意义. *环境遥感*, 1988, 3(2): 135~146

(2004-12-20 收稿, 2005-03-04 收修改稿)