

南极格罗夫山陨石 GRV 99027: 一个新的火星陨石

林杨挺^① 王道德^① 缪秉魁^{②①} 欧阳自远^③ 刘小汉^② 琚宜太^②

(^①中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640; ^②中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; ^③中国科学院国家天文台, 北京 100012. E-mail: linyt@gig.ac.cn)

摘要 报道我国第16次南极考察队回收的GRV 99027火星陨石的岩石学、矿物化学和氧同位素组成。该陨石由嵌晶结构和粒间结构两部分组成, 其中粒间结构区域以含长石和磷酸盐, 以及橄榄石和斜方辉石富FeO为特征, 明显不同于嵌晶结构区域。GRV 99027陨石的上述岩石矿物学和氧同位素组成等特征与已知的3个二辉橄榄岩质火星陨石相同。据此, 将该陨石划分为第4块二辉橄榄岩质火星陨石。

关键词 陨石 行星 火星 二辉橄榄岩 火成结构

陨石是最古老的地球外岩石样品, 记录了太阳系的形成和演化历史。绝大部分陨石来自小行星带, 但有少量来自月球^[1]和火星^[2]。已回收的28000多块陨石中, 绝大部分从南极蓝冰表面收集到。这些陨石自降落在南极冰盖表面后, 随同冰川经历了埋藏、运移以及冰的消熔等过程, 最后在冰的快速消融区域富集。继日、美、欧洲共同体等国之后, 我国第15次南极科考队于1998/1999年在东南极格罗夫山地区发现并回收到4块陨石^[3,4], 随后的第16次考察队在同一地区又发现28块陨石^[4]。我们对这28块新发现的南极陨石进行了分类鉴定, 并从中发现GRV 99027为一新的火星陨石。该项研究的初步结果在第65届国际陨石学会年会上作了报告^[5]。

1 样品和实验分析

GRV 99027陨石重9.97 g, 大小为2.2 cm × 2.5 cm × 2.8 cm, 大部分表面为一层薄的黑色熔壳所覆盖, 部分区域熔壳脱落, 出露表面呈灰色(图1)。样



图1 火星陨石GRV 99027照片
网格间距为1 cm

品切片的编号为GRV 99027-3, 面积0.9 cm × 1.3 cm, 并制成标准厚度光薄片。岩石学研究主要借助光学显微镜和中山大学分析测试中心的JEOL JXA-8800R电子探针背散射电子图像模式完成。矿物定量分析由上述电子探针和日本茨城大学的另一台电子探针完成。加速电压15 kV, 电子束流20 nA(长石用10 nA), 标准为硅酸盐和氧化物矿物。氧同位素分析由美国芝加哥大学Enrico Fermi研究所的R. N. Clayton和T. Mayeda采用BrF₅法完成^[6]。氧同位素分析的样品通过双目显微镜下挑选, 为新鲜的矿物颗粒, 且不含熔壳。

2 实验结果

该陨石具有典型的火成结构, 并由2个结构区域组成。较大一区域为嵌晶结构, 主晶为一斜方辉石巨晶, 包裹许多橄榄石的自形晶体。大部分橄榄石晶体100 ~ 500 μm, 有较明显的圆化特征, 并呈定向排列; 较小一区域由自形-半自形橄榄石、斜方辉石以及单斜辉石组成, 粒间充填它形长石。我们称该区域为粒间结构区域。该区域的橄榄石晶体也呈定向排列, 并与斜方辉石巨晶中包裹的橄榄石晶体具有一致的取向。铬铁矿作为次要矿物在上述二结构区域均有产出, 呈自形晶体包裹于硅酸盐矿物中。其他次要矿物包括钛铁矿、硫化物和磷酸盐(可能为白磷钙矿)仅发现于粒间结构区域, 并常与长石共生。少量钛铁矿呈铬铁矿中出熔的薄片产出。嵌晶结构与粒间结构区域呈连续过渡变化, 无明显的界线。嵌晶结构区域的矿物模式组成为(面积含量)66.4% 斜方辉石、1.4% 单斜辉石、30.9% 橄榄石、1.2% 铬铁矿; 粒间结构

区域的矿物模式组成为 39.0%斜方辉石、10.6%单斜辉石、34.6%橄榄石、14.9%长石、0.9%铬铁矿。后者除单斜辉石和长石外，其他矿物的含量与嵌晶结构区域基本相同。

在光薄片上仅见 2 个熔融团块，其中较大一团块(直径约 1 mm)已重结晶，主要由针状橄榄石和斜方辉石晶体构成，含少量单斜辉石。另一团块(直径 600 μm)同样已重结晶，并具有类似的结构和矿物组成。薄片中发现由冲击熔融形成的细脉。主要硅酸盐矿物破碎明显，并常见波状和马赛克状消光。大部分长石可能因冲击变质形成微片理，有少量完全消光，可能已熔长石化。

电子探针定量分析结果显示，矿物的化学组成与产状有关(表 1)。一般说来，相对于嵌晶结构区域，粒间结构区域的橄榄石和斜方辉石含较高的 FeO。在粒间结构区域，橄榄石的 Fa 值($\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$ 原子百分比)为 29.7 ± 0.7 ，高于嵌晶结构区域的晶体(Fa 为 26.7 ± 1.4)。熔融团块中同一颗粒和不同颗粒之间橄榄石的组成变化较大，Fa 值落在 20% ~ 35%(摩尔分数)之间。但是，未发现橄榄石的组成与距团块边界的距离相关。与橄榄石相似，斜方辉石巨晶($\text{En}_{66\sim77}\text{Fs}_{20\sim23}\text{Wo}_{3\sim14}$)的 FeO 含量低于粒间结构区域的颗粒($\text{En}_{61\sim70}\text{Fs}_{24\sim27}\text{Wo}_{7\sim16}$ ，62 个分析数据中落在斜方辉石巨晶范围的 6 个除外)。此外，斜方辉石巨晶的次要元素 TiO_2 (<0.20%)和 Al_2O_3 (0.32% ~ 0.82%)等也低于粒间结构区域的颗粒(TiO_2 0.08% ~ 0.87%， Al_2O_3 0.52% ~ 1.44%)。铬铁矿在嵌晶结构区域表现为贫钛的化学组成特征($\text{Chm}_{68\sim82}\text{Sp}_{13\sim22}\text{Mt}_{2\sim6}\text{Usp}_{2\sim4}$ ，0.87% ~ 1.61% TiO_2)，不同于粒间结构区域的颗粒($\text{Chm}_{42\sim71}\text{Sp}_{11\sim22}\text{Mt}_{3\sim11}\text{Usp}_{5\sim36}$)，特别是靠近长石或包裹于长石中的铬铁矿以富 TiO_2 (7.21%~13.9%)为特征。单斜辉石的组成为 $\text{En}_{48\sim54}\text{Fs}_{13\sim19}\text{Wo}_{29\sim38}$ ，与产状无明显的相关性。长石的组成为 $\text{An}_{42\sim55}\text{Ab}_{45\sim57}\text{Qr}_{<2}$ ，具有贫 K_2O 特点。

GRV 99027 陨石全岩的氧同位素分析结果为(平均值 $\pm 1\sigma$): $\delta^{18}\text{O}$ $3.97\text{‰} \pm 0.07\text{‰}$ ， $\delta^{17}\text{O}$ $2.34\text{‰} \pm 0.07\text{‰}$ 。相对于地球物质，GRV 99027 陨石富 ^{17}O ，其 $\Delta^{17}\text{O}$ 为 0.28‰ ($\Delta^{17}\text{O} = \delta^{17}\text{O} - 0.52\delta^{18}\text{O}$)。

3 火星来源的证据

首先 GRV 99027 具有因穿过地球大气层烧蚀形成的熔壳，因此判断是来自地球之外的陨石。更进一

步，根据该陨石典型的火成结构特征，可完全排除球粒陨石的可能性。与 GRV 99027 陨石在岩石结构、矿物模式组成以及矿物化学组成上比较相似的无球粒陨石有古铜钙长(Howardite)-钙长辉长(Eucrite)-奥长古铜(Diogenite)族无球粒陨石(HED)、玄武岩质月球陨石、以及辉玻(Shergottite)无球粒陨石等。全部月球陨石和月岩以富 Ca 长石为特征($\text{An}_{90\sim100}$)^[1]，HED 族陨石中的长石也为基性成分($\text{An}_{80\sim100}$)^[7]。作为对比，GRV 99027 陨石中的长石富 Na($\text{An}_{42\sim55}$)。显然，GRV 99027 陨石不属于月球陨石或 HED 族陨石。

大量的研究证明，辉玻无球粒陨石、纯橄无球粒陨石(Chassignite)、辉橄无球粒陨石(Nakhlite)以及斜方辉岩无球粒陨石(orthopyroxenite)等来自火星^[2]，其主要证据有：(1) 除代表最古老岩石的 ALH 84001 外(4.5 Ga)，其他全部陨石具有很年轻的岩浆结晶年龄(≤ 1.3 Ga)^[8]，表明它们来自一个相当大的行星体，即类地行星；(2) 该类陨石的捕获气体及其同位素组成落在由海盗号飞船所分析的火星大气与地球大气的混合线上^[9,10]；(3) 海盗号飞船和火星探路者对火星表面土壤的分析结果与这些陨石吻合^[11]。

辉玻无球粒陨石根据其结构和矿物模式组成被进一步划分为 3 种类型，即玄武岩质、橄榄石斑晶结构和二辉橄榄岩质。表 2 列出 GRV 99027 陨石与二辉橄榄岩质火星陨石的对比，可以看出，两者在岩石结构、矿物模式组成、橄榄石的 Fa 值及分布、长石的 An 值、斜方辉石和单斜辉石的组成、铬铁矿的组成等一系列特征上完全一致。不仅如此，GRV 99027 陨石中硅酸盐矿物的次要组分含量也全部落在二辉橄榄岩质火星陨石的范围。据此，我们将 GRV 99027 划分为二辉橄榄岩质火星陨石。此外，GRV 99027 陨石中橄榄石晶体的定向排列表明，它是一个火成堆积岩。

氧同位素组成是确定陨石来源的最重要参数之一。图 2 是 GRV 99027 陨石的 $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{17}\text{O}$ 组成图解，它落在火星陨石的范围，明显不同于地球和月球物质、HED 族陨石以及其他各类型陨石。各火星陨石的氧同位素组成变化落在一条斜率为 0.52，且平行于地球-月球质量的分馏线上，反映了火星表面各种物理化学过程所产生的同位素质量分馏作用。不同陨石化学群之间 $\Delta^{17}\text{O}$ 值(即与地球-月球分馏线的距离)，代表了不同源区氧同位素组成的差异。因此，GRV 99027 陨石的全岩氧同位素组成进一步确证其火星成因。

表 1 GRV 99027 主要矿物电子探针分析结果汇总(%)^{a)}

	橄榄石		斜方辉石		单斜辉石		长石	铬铁矿	
	1 ^{b)}	2	3 ^{b)}	4	5 ^{b)}	6	7 ^{b)}	8 ^{b)}	9
SiO ₂	37.8 ± 0.4	38.2 ± 0.6	53.9 ± 0.7	55.1 ± 0.6	52.9 ± 0.6	53.0 ± 0.5	55.4 ± 1.1	0.01	0.02
	37.1 ~ 38.7	36.6 ~ 39.1	52.1 ~ 55.5	53.2 ~ 56.4	51.6 ~ 54.3	52.1 ~ 53.9	53.5 ~ 59.2	< 0.18	< 0.17
TiO ₂	0.01	0.01	0.49 ± 0.22	0.10 ± 0.04	0.36 ± 0.09	0.33 ± 0.14	0.04 ± 0.03	7.12 ± 4.44	1.81 ± 1.88
	< 0.10	< 0.08	0.08 ~ 1.07	0.00 ~ 0.19	0.21 ~ 0.55	0.19 ~ 0.88	< 0.14	0.88 ~ 13.9	0.76 ~ 8.07
Al ₂ O ₃	0.01	0.02	0.82 ± 0.25	0.58 ± 0.12	1.65 ± 0.39	1.44 ± 0.35	27.6 ± 0.6	6.57 ± 0.97	7.65 ± 1.55
	0.36	< 0.18	0.44 ~ 1.44	0.32 ~ 0.83	1.02 ~ 2.44	1.02 ~ 2.27	25.3 ~ 28.9	4.66 ~ 9.48	5.44 ~ 11.7
Cr ₂ O ₃	0.03 ± 0.03	0.03	0.36 ± 0.15	0.47 ± 0.11	0.87 ± 0.09	0.84 ± 0.06	0.01	45.0 ± 10.0	55.8 ± 4.8
	< 0.16	< 0.29	0.18 ~ 0.91	0.33 ~ 1.09	0.69 ~ 1.05	0.70 ~ 0.98	< 0.16	31.8 ~ 60.3	42.9 ~ 61.5
V ₂ O ₃			0.03	0.01	0.08 ± 0.03	0.06 ± 0.04		0.49 ± 0.11	0.54 ± 0.14
			< 0.11	< 0.10	< 0.15	< 0.13		0.29 ~ 0.88	0.33 ~ 0.93
FeO	26.1 ± 1.0	24.4 ± 1.2	15.5 ± 0.8	13.6 ± 0.7	9.02 ± 0.54	8.73 ± 0.45	0.47 ± 0.16	34.5 ± 5.2	27.8 ± 2.1
	24.4 ~ 28.0	20.9 ~ 27.3	13.2 ~ 17.0	11.6 ~ 14.9	7.81 ~ 10.2	7.90 ~ 9.67	0.19 ~ 0.93	27.2 ~ 44.8	24.5 ~ 33.0
NiO	0.05 ± 0.03	0.03 ± 0.02						0.05 ± 0.04	0.03 ± 0.03
	< 0.11	< 0.06						< 0.21	< 0.09
MnO	0.53 ± 0.06	0.50 ± 0.06	0.56 ± 0.04	0.48 ± 0.05	0.37 ± 0.05	0.37 ± 0.05	0.00	0.45 ± 0.08	0.35 ± 0.16
	0.38 ~ 0.68	0.34 ~ 0.65	0.48 ~ 0.64	0.31 ~ 0.58	0.29 ~ 0.45	0.27 ~ 0.44	0.06	0.21 ~ 0.62	< 0.55
MgO	35.4 ± 0.7	37.3 ± 1.1	23.2 ± 1.1	25.2 ± 1.4	17.7 ± 0.5	18.0 ± 0.7	0.24 ± 0.17	4.93 ± 0.56	5.70 ± 0.72
	34.2 ~ 37.8	34.4 ~ 40.2	20.5 ~ 25.8	22.4 ~ 28.5	16.7 ~ 19.1	16.7 ~ 19.5	0.07 ~ 0.86	4.02 ~ 6.84	4.34 ~ 7.21
CaO	0.19 ± 0.10	0.17 ± 0.09	5.00 ± 1.09	4.38 ± 1.62	17.1 ± 0.9	17.3 ± 1.0	10.9 ± 0.6	0.02	0.01
	0.08 ~ 0.69	0.06 ~ 0.57	3.14 ~ 7.69	1.36 ~ 8.46	15.1 ~ 18.9	14.8 ~ 18.9	8.91 ~ 12.4	< 0.24	< 0.10
Na ₂ O			0.07 ± 0.04	0.05 ± 0.03	0.02	0.28 ± 0.07	5.63 ± 0.44		
			< 0.18	< 0.16	< 0.22	0.23 ~ 0.33	4.25 ~ 6.93		
K ₂ O							0.12 ± 0.05		
							0.03 ~ 0.34		

a) 平均值 ± σ; 斜体数字: 组成范围; 空白: 未分析; b) 粒间结构, 其他为斑状结构

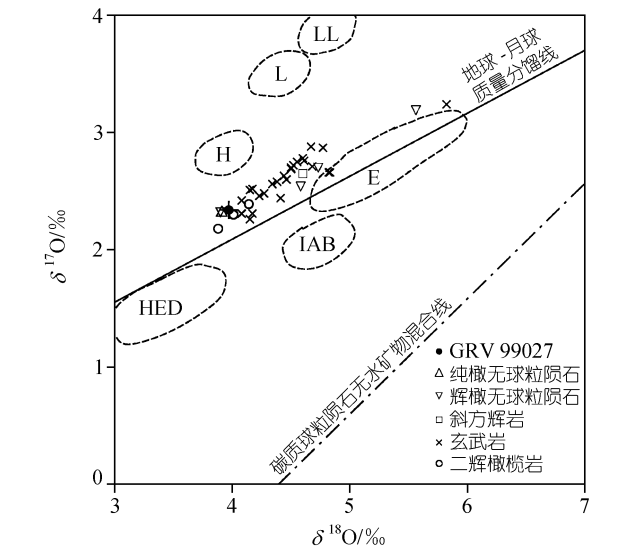


图 2 GRV 99027 陨石的氧同位素组成
除火星陨石外, 作为对比图中还给出普通球粒陨石(H, L, LL), 顽辉石球粒和无球粒陨石(E), IAB 群铁陨石硅酸盐包裹体(IAB), 以及 HED 族陨石的变化范围, 引用文献[16]. 其他火星陨石的的分析结果引自文献[6,17,18]

4 GRV 99027 陨石的重要科学意义

火星陨石是目前人类惟一获得的火星岩石样品, 是认识这一红色星球形成、物质组成、岩浆活动、大气圈形成和演化等的探针. ALH 84001 火星陨石中古老细菌化石存在的发现^[19]、火星表面曾存在流动水活动的证据^[20]以及火星距表面很浅层存在水冰的报道^[21,22]等, 预示在火星可能发现生命存在. 如果在火星上发现地外生命形式, 其重大意义远远超出自然科学本身. 迄今为止, 包括 GRV 99027 在内的火星陨石仅 27 块, 因此火星陨石样品极为珍贵. 不仅如此,

与 GRV 99027 相似的二辉橄榄岩质火星陨石仅 3 块 (即 Y 793605, ALH 77005, LEW 88516). 研究还表明, 已回收的 3 块二辉橄榄岩质火星陨石具有非常相似的岩石矿物学特征^[12~15]以及一致的溅射年龄和结晶年龄^[8,23], 很可能来自火星表面同一岩体. 如果 GRV 99027 陨石形成于不同的溅射事件, 则它代表了火星表面不同区域的样品. 但是, 上述问题的解决, 有赖于与其他二辉橄榄岩质火星陨石的深入对比研究, 特别需要测定 GRV 99027 陨石的宇宙射线暴露年龄和居地年龄.

GRV 99027 陨石的重要意义还在于该样品的新鲜. 已报道的 27 块火星陨石中, 4 块为降落型陨石, 8 块发现于南极蓝色冰盖, 其他绝大部分发现于沙漠. 除南极之外, 降落后经过一段时间才被发现的陨石不同程度受到地球表面风化作用的影响, 并受到有机物的污染. 我国发现的 GRV 99027 陨石非常新鲜, 这对研究火星表面的风化作用以及火星生命痕迹等具有重要意义.

鉴于 GRV 99027 陨石极重要的科学意义, 我们正组织对该陨石的多学科综合研究. 将通过对宇宙成因核素的研究, 获得该陨石在南极冰川中保留的时间(居地年龄)和从火星表面受撞击溅射出来后在太空中运行的时间(宇宙线暴露年龄); 通过对放射性同位素体系的研究, 获得其岩浆结晶年龄以及主要冲击事件发生的时间; 通过对岩石矿物学、微量元素、稳定同位素分析, 揭示其岩浆结晶过程和条件、源区物质组成等; 对次生矿物的研究, 将探讨火星的表生作用、以及与生命活动相关的正反证据; 此外, 还将开展微结构研究, 探讨冲击变质作用, 并寻找可能的高压矿物相等.

表 2 GRV 99027 陨石与二辉橄榄岩质火星陨石的对比

	GRV 99027	二辉橄榄岩质火星陨石 ^{a)}
结构	嵌晶结构、粒间结构	嵌晶结构、粒间结构
模式组成(% , 体积比)	斜方辉石 55.7, 单斜辉石 5.1, 橄榄石 32.3, 长石 5.9, 铬铁矿 1.1, 以及少量钛铁矿、硫化物和磷酸盐等	斜方辉石 10~60, 单斜辉石<28, 橄榄石 35~60, 长石 5~15, 铬铁矿 0.7~2.1, 以及少量钛铁矿、硫化物和磷酸盐等
橄榄石 Fa 值	嵌晶结构: 26.7 ± 1.4; 粒间结构: 29.7 ± 0.7	双峰, 且粒间结构区域 Fa 较高: 22~40
斜方辉石	En _{61~78} Fs _{20~27} Wo _{2~16}	En _{57~78} Fs _{22~43} Wo _{2~18}
单斜辉石	En _{48~55} Fs _{13~19} Wo _{29~39}	En _{46~55} Fs _{12~18} Wo _{27~41}
长石 An (% , 摩尔比)	42~55	30~65
铬铁矿	嵌晶结构: Chm _{68~82} Sp _{13~22} Mt _{2~6} Usp _{2~4} 粒间结构: Chm _{42~71} Sp _{11~22} Mt _{3~11} Usp _{5~36}	粒间结构区域较嵌晶结构区域富 TiO ₂

a) 据文献[12~15]

致谢 美国芝加哥大学 Enrico Fermi 研究所的 R. N. Clayton 教授和 T. Mayeda 博士帮助完成了氧同位素分析; 国家海洋局中国极地研究所提供了研究用样品; 李春来和李院生研究员协助进行了分样工作; 王鹤年教授和陶克捷研究员与作者进行了建设性的讨论, 在此致以衷心的感谢. 本文还明显受益于牛耀龄博士、张有学博士、Chi-Yu Shih 博士以及另一匿名审稿人的建设性审稿意见. 本工作受国家自然科学基金重点项目(批准号: 40232026)资助.

参 考 文 献

1 王道德, 林杨挺. 南极陨石研究的启示Ⅲ: 南极月球陨石的综述及其演化历史. 南极研究, 1993, 5: 1~20

2 林杨挺, 王道德. 南极陨石研究的启示Ⅵ: 火星陨石的研究及宇宙化学意义. 南极研究, 1995, 7: 35~52

3 陈晶, 刘小汉, 琚宜太, 等. 我国首批回收的四块南极陨石类型的确定. 岩石学报, 2001, 17: 314~320

4 琚宜太, 刘小汉. 格罗夫山地区陨石回收. 极地研究, 2000, 12: 137~141

5 Lin Y, Ouyan Z, Wang D, et al. Grove Mountains (GRV) 99027: A new martian lherzolite. Meteorit Planet Sci, 2002, 37:A87

6 Clayton R N, Mayeda T K. Oxygen isotopes in eucrites, shergottites, nakhlites, and chassignites. Earth Planet Sci Lett, 1983, 62: 1~6

7 Dodd R T. Meteorites: A petrologic-chemical synthesis. Cambridge: Cambridge University Press, 1981. 368

8 Nyquist L E, Bogard D D, Shih C -Y, et al. Ages and Geologic Histories of Martian Meteorites. Space Sci Rev, 2001, 96: 105~164

9 Bogard D D, Johnson P. Martian gases in an Antarctic meteorite. Science, 1983, 221: 651~654

10 Pepin R O. Evidence of Martian Origins. Nature, 1985, 317: 473~475

11 Rieder R, Economou T, Wänker H, et al. The chemical composition of martian soil and rocks returned by the mobile alpha proton

X-ray spectrometer: Preliminary results from the X-ray mode. Science, 1997, 278: 1771~1774

12 Treiman A H, McKay G A, Bogard D D, et al. Comparison of the LEW88516 and ALHA77005 martian meteorites: Similar but distinct. Meteoritics, 1994, 29: 581~592

13 Ikeda Y. Petrology and mineralogy of the Y-793605 martian meteorite. Antarct Meteorite Res, 1997, 10: 13~40

14 Mikouchi T, Miyamoto M. Yamato-793605: A new lherzolitic shergottite from the Japanese Antarctic meteorite collection. Antarctic Meteorite Res, 1997, 10: 41~60

15 Mikouchi T, Miyamoto M. Lherzolitic Martian meteorites Allan Hills 77005, Lewis Cliff 88516 and Yamato-793605: Major and minor element zoning in pyroxene and plagioclase glass. Antarctic Meteorite Res, 2000, 13: 256~269

16 Wasson J T. Meteorites: Their record of early solar-system history. New York: W H Freeman, 1985. 267

17 Clayton R N, Mayeda T K. Oxygen isotopes in Shergotty. Geochim Cosmochim Acta, 1986, 50: 979~982

18 Clayton R N, Mayeda T K. Oxygen isotope studies of achondrites. Geochim Cosmochim Acta, 1996, 60: 1999~2017

19 McKay D S, Gibson E K, Thomas-Keprta K L, et al. Search for past life on Mars: Possible relic biogenic activity in martian meteorite ALH84001. Science, 1996, 273: 924~930

20 Malin M C, Edgett K S. Evidence for recent groundwater seepage and surface runoff on Mars. Science, 2000, 288: 2330~2335

21 Costard F, Forget F, Mangold N, et al. Formation of recent martian debris flows by melting of near-surface ground ice at high obliquity. Science, 2002, 295:110~113

22 Mustard J F, Cooper C D, Rifkin M K. Evidence for recent climate change on Mars from the identification of youthful near-surface ground ice. Nature, 2001, 412: 411~414

23 Eugster O, Weigel A, Polnau E. Ejection times of Martian meteorites. Geochim Cosmochim Acta, 1997, 61: 2749~2757

(2003-01-27 收稿, 2003-05-16 收修改稿)