

氨基酸的辐射效应及其对火星生命探测的启示

李鑫^{1,2} 刘文平^{1,3} 胡启涛^{1,2} 周梓檬^{1,2} 殷炜^{1,2} 姚奇志⁴ 汪谟贞⁴ 高晓英^{1,2}
瞿林峰⁵ 苏金月⁵ 瞿贤超⁵ 周根陶^{1,2}

¹ (中国科学技术大学深空探测实验室/地球和空间科学学院 合肥 230026)

² (中国科学技术大学岩石圈演化与环境演变全国重点实验室 合肥 230026)

³ (湖南汽车工程职业大学 株洲 412001)

⁴ (中国科学技术大学化学与材料科学学院 合肥 230026)

⁵ (安徽联合辐化有限公司 合肥 231602)

摘要 探寻生命踪迹是当前及未来火星探测任务的主要目标之一。氨基酸等生物有机分子由于其明确的生物来源性,已经成为火星生命探测的优先目标。然而,由于火星大气稀薄、缺乏全球磁场,火星表面潜在的生物有机分子可能受到强烈的电离辐射而破坏,甚至完全辐解。对此,研究者们开展了相关的模拟火星辐照实验。目前,前人研究对于电离辐射环境下氨基酸的稳定性和化学反应活性仍存在争议,其可能的原因是,这些研究中所使用的氨基酸分子初始物理状态不同,如溶解态、固体粉末和单晶等。基于此,本研究系统考察了⁶⁰Co γ 射线电离辐射下不同物理状态氨基酸的稳定性。结果表明,氨基酸的辐射稳定性强烈依赖于其所处的物理状态。在相当于火星表面约31.2 Ma辐射剂量的照射下,单晶甘氨酸保持稳定;而固体粉末甘氨酸由单斜晶系的 α 相转变为六方晶系的 γ 相。相比之下,当甘氨酸处于溶解状态时,同时发生了辐解与聚合反应,生成了成分复杂的辐射产物。当前研究成果不仅有助于深入理解火星辐射环境下有机分子的演化过程,还将有助于提高对火星返回光谱数据的解译能力,为火星生命探测提供谱学指导。

关键词 ⁶⁰Co γ 射线, 氨基酸, 辐射化学, 地外生命, 火星

中图分类号 Q693, Q691

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2026-0051

CSTR: 32195.14.j.JRRRP.1000-3436.2026-0051

引用该文:

李鑫, 刘文平, 胡启涛, 等. 氨基酸的辐射效应及其对火星生命探测的启示[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, XXXX, XX(X): XXXXXX. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2026-0051.

LI Xin, LIU Wenping, HU Qitao, *et al.* Radiation effects on amino acids and implications for life detection on Mars[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, XXXX, XX(X): XXXXXX. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2026-0051.



基金资助: 国家自然科学基金(42430201和42502030)、湖南省自然科学基金(2025JJ60237)资助

收稿日期: 初稿 2026-04-24; 修回 2026-06-04

Received 24 April 2026; accepted 04 June 2026

本文研究内容首发于 *ACS Earth and Space Chemistry*^[1]

Radiation effects on amino acids and implications for life detection on Mars

LI Xin^{1,2} LIU Wenping^{1,3} HU Qitao^{1,2} ZHOU Zimeng^{1,2} YIN Wei^{1,2} YAO Qizhi⁴ WANG Mozhen⁴
GAO Xiaoying^{1,2} QU Linfeng⁵ SU Jinyue⁵ QU Xianchao⁵ ZHOU Gentao^{1,2}

¹(Deep Space Exploration Laboratory/School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China,
Hefei 230026, China)

²(State Key Laboratory of Lithospheric and Environmental Coevolution, University of Science and Technology of China,
Hefei 230026, China)

³(Hunan Automotive Engineering Vocational University, Zhuzhou 412001, Hunan, China)

⁴(School of Chemistry and Materials Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

⁵(Anhui Union Radiation Chemical Co., Ltd., Hefei 231602, China)

ABSTRACT Searching for signs of life is a central objective of current and future Mars exploration. Organic biomolecules, particularly amino acids, are considered key targets in life-detection efforts due to their well-established biological relevance. However, the thin Martian atmosphere and the absence of a global magnetic field expose the surface to intense ionizing radiation, rendering organic molecules highly susceptible to radiolytic degradation and potential destruction. To evaluate the stability of such biomolecules, numerous irradiation simulation experiments have been conducted. However, the survivability and chemical reactivity of amino acids under Martian-like conditions remain controversial. One possible reason is the inconsistent physical states of amino acids used in these studies, such as solution, solid powders, and single crystals. In this work, we systematically investigate the radiation stability of amino acids in different physical states under ⁶⁰Co γ -rays irradiation. The results demonstrate that the radiation stability of amino acids is strongly dependent on their physical state. After exposure equivalent to ~ 31.2 Ma of Martian surface irradiation, the single crystal glycine remains largely intact, whereas solid powder glycine transforms from the monoclinic α -phase to the hexagonal γ -phase. In contrast, glycine in aqueous solution shows significant modification, involving both decomposition and complex recombination or polymerization. These findings provide new insights into the radiation-driven evolution of organic molecules on Mars and offer critical constraints for interpreting ambiguous spectroscopic signatures obtained from Martian surface analyses.

KEYWORDS ⁶⁰Co γ -rays irradiation, Amino acids, Radiolysis, Extraterrestrial life, Mars

CLC Q693, Q691

探索地外生命信息是深空探测的重要科学目标，对于生命起源、宜居环境以及生命协同演化都具有重要意义^[2]。火星由于在很多方面都与地球相似，已经成为研究宜居环境演变和寻找地外生命的首选目标^[3]。当前，地外生命的探测主要依赖于生物标志的发现。在地质学领域，研究者们已总结了有机分子、生物矿物、结构/构造、化学组成、生化活动以及同位素特征等生物标志。其中，核酸、蛋白质、氨基酸和脂类等生物有机分子，因其明确的生物来源性，能为生命存在提供直接且可靠的证据，被视为火星生命探测任务中最优先的选项^[4]。然而，由于火星大气稀薄且缺乏全球性磁场，其表面长期暴露在高强度的电

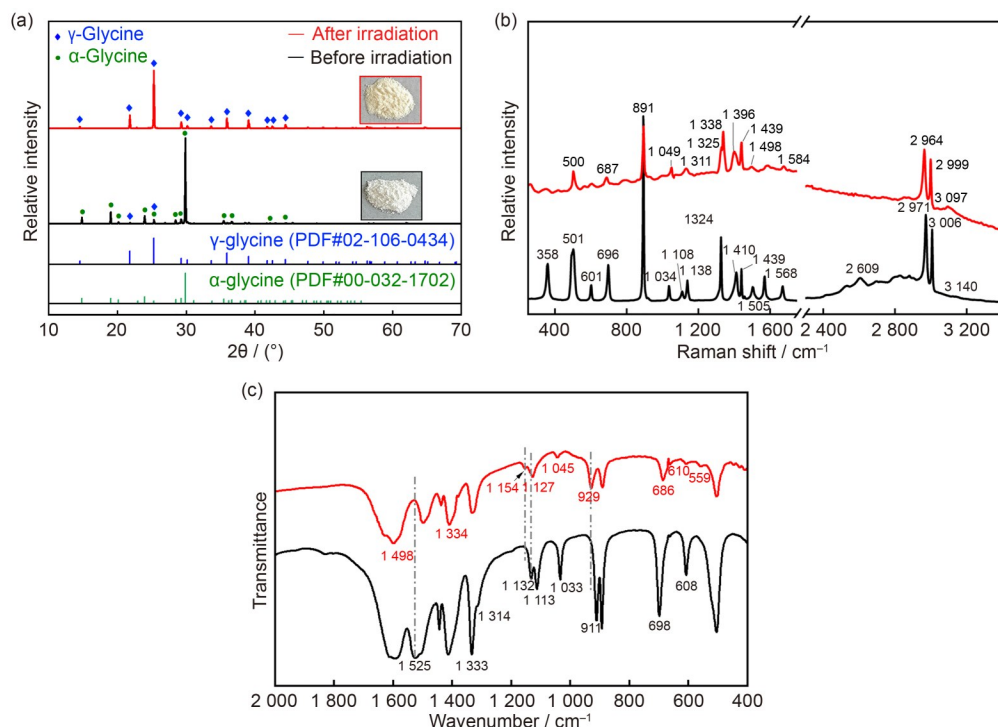
离辐射环境中，这给有机质的长期保存和原位探测带来了严峻挑战^[5]。

为此，研究者们开展了相关的模拟火星辐照实验^[6-9]。Takano等^[6]利用⁶⁰Co伽马射线研究了水溶液中丙氨酸、苯丙氨酸等14种氨基酸的辐照稳定性，结果表明所有样品均发生显著降解，其半衰期仅为0.2~7.4 h。Rowe等^[7]同样发现，在3.99 kGy γ 射线辐照下，酪氨酸、苯丙氨酸和色氨酸水溶液几乎完全分解。上述结果表明，溶液氨基酸在辐照条件下整体稳定性较低。然而，也有研究指出，特定条件下的氨基酸表现出较强的抗辐射能力。Bonales等^[8]通过热分析法研究了 α -甘氨酸单晶的辐照稳定性，发现其在600 kGy γ 射线

照射后仍保留了~69%。Pavlov等^[9]考察了粉末态氨基酸的辐解行为，在4 MGy剂量下未检测到甘氨酸降解，丙氨酸和异缬氨酸也仅发生有限分解，分别保留了~83.5%和67.3%。其后续研究^[10]表明，在77 K低温条件下，甘氨酸-冰混合物经4 MGy辐照后也未观察到降解。综上，前人关于电离辐射环境下氨基酸稳定性的研究仍存在争议，其可能的原因是，各研究所采用的氨基酸初始物理状态不同，如溶解态^[6-7]、单晶^[8]和固体粉末^[9]等。尽管上述研究指示不同物理状态下的辐照行为可能存在差异，但这些比较仅为间接推断，且其实验条件存在显著差异^[6-9]。因此，尚不清楚已报道的稳定性差异究竟源于物理状态的本征效应，还是由实验条件不同所致。基于此，本研究在统一实验条件下系统研究了⁶⁰Co γ 射线电离辐射下不同物理状态氨基酸的稳定性。以甘氨酸为模型分子，制备了三种物理状态的样品。甘氨酸（纯度 $\geq 97\%$ ）经研磨过筛（200目（74 μm ））后，取0.5 g制成粉末样品；配制浓度为0.1 mol/L甘氨酸水溶液作为溶液态样品；将该溶液滴加于玻璃载玻片表面，于室温自然蒸发结晶以获得单晶样品。所有样品均置于硼硅酸盐玻璃瓶中进行辐照处理。辐照实验在中国科学技术大学的⁶⁰Co γ 射线装置中

完成，剂量率为29.69 Gy/min，最大累积辐射剂量为2.39 MGy，按照“好奇号”火星车测得的火星表面辐射剂量率（0.21 mGy/d）进行折算，该最大累积剂量相当于在火星表面暴露约3 120万年^[11]。

如图1（a）插图所示，经2.39 MGy γ 射线辐照后，甘氨酸固体粉末由白色转变为淡黄色，指示样品的物相或结构可能发生了变换。X射线衍射分析（X-ray diffraction analysis, XRD）分析结果（图1（a））表明，辐照前粉末以 α -甘氨酸为主相（伴有少量 γ -甘氨酸），而辐照后所有衍射峰均归属于 γ -甘氨酸，表明辐照诱导了样品由 α 相向 γ 相的晶型转变。进一步的Raman光谱分析（图1（b））显示， α -甘氨酸的特征振动峰（1 108 cm^{-1} 和2 609 cm^{-1} ）在辐照后消失，而1 324 cm^{-1} 峰分裂为1 325 cm^{-1} 和1 338 cm^{-1} ，同时多个振动峰发生蓝移（如1 034 cm^{-1} 移至1 049 cm^{-1} ，1 568 cm^{-1} 移至1 584 cm^{-1} 等）或红移（1 138 cm^{-1} 移至1 131 cm^{-1} ，1 410 cm^{-1} 移至1 396 cm^{-1} 等）。与文献^[10]对比可知，辐照后的所有特征峰均与 γ -甘氨酸的标准谱图一致。傅里叶变换红外光谱（FTIR）分析（图1（c））进一步证实，辐照后的样品中出现了归属于 γ -甘氨酸的特征吸收峰（如559 cm^{-1} 、610 cm^{-1} 、929 cm^{-1} 等）。



上述结果一致表明,辐照作用下甘氨酸固体粉末由 α 相转变为 γ 相。结晶矿物学研究表明, α -甘氨酸属于单斜晶系(空间群为 $P2_1/n$),其晶体结构由氢键片层堆叠而成;而 γ -甘氨酸属于三方晶系(空间群为 $P3_2$),具有稳定的三维非中心对称网络结构,因此在热力学上更为稳定^[12]。甘氨酸在辐照作用下发生晶型转变可归因于伽马射线诱导的局域电离及自由基生成过程,即辐照导致晶格缺陷逐步累积,削弱了维系 α -甘氨酸层状结构的氢键相互作用,从而促进分子沿晶体学 c 轴发生重取向,最终向热力学更稳定的 γ 相转变^[12]。

当甘氨酸以单晶形式存在时,共聚焦显微镜结果(图2(a)~(d))显示,经2.39 MGy γ 射线辐照后, α -甘氨酸与 γ -甘氨酸单晶均维持了原有晶体形貌,未观察到形貌破坏或宏观结构坍塌。进一步的Raman光谱分析(图2(e))显示,辐照前后未检测到新峰生成或特征峰消失,指示单晶体系具有较高的辐照稳定性。该稳定性可归因于单晶固有的热力学与动力学优势。从热力学角度看,单晶的长程有序结构使体系处于较低的自由能状态,同时其内部缺陷密度极低;同时,表面能的各向异性使低能晶面优先生长并稳定暴露,从而降低了结构重构的热力学驱动力^[13]。从动力学角度看,单晶中分子或原子被严格限制在晶格位点,扩散与迁移能力显著受限,进而抑制了辐照诱导的结构重排过程^[14]。

与固态样品相比,溶液态甘氨酸经辐照后发生了显著变化。甘氨酸水溶液初始为无色透明,辐照后转变为亮黄色(图3(a)插图)。Raman光谱分析(图3(a))显示,辐照后甘氨酸的大多数特征峰减弱或消失,同时在400~3 500 cm^{-1} 范围内出现显著的荧光背景,指示生成了荧光性辐照副产物。进一步的HPLC-MS分析结果(图3(b)和3(c))显示,辐照后检测到了多个质荷比(m/z)大于甘氨酸($m/z=76.0389$)的产物,包括 $m/z=102.2987$ 、128.1027、142.1332、182.1646和254.1743等,指示溶解态甘氨酸在辐照作用下可能发生了聚合反应。其中, $m/z=102.2987$ 可能对应于甘氨酸中间体经 CH_3 自由基逐步甲基化形成的二甲基化甘氨酸; $m/z=128.1027$ 和 $m/z=142.1332$ 可能分别归属为两分子甘氨酸的甲基化衍生物,如一甲基哌嗪二酮或二甲基哌嗪二酮;而 $m/z=182.1646$ 和 $m/z=254.1743$ 则可能是甘氨酸及其衍生物在自由基诱导下进一步偶联或聚合的产物。

与此同时,还检测到较低质荷比的产物($m/z=52.1947$ 和71.0372),指示辐射诱导的分子降解生成了碎片离子,如丙烯酰胺自由基阳离子($\text{C}_3\text{H}_5\text{NO}^{\cdot+}$),可能源于甘氨酸脱羧后的自由基氧化过程^[15]。上述结果表明,溶液态甘氨酸的辐照稳定性较差。这可能主要源于其自由基反应动力学特征^[16]。在水溶液体系中, γ 射线既可直接断裂甘氨酸的化学键,也可通过水辐解产物(包括水合电子 e_{aq}^- 、羟基自由基 $\cdot\text{OH}$ 和过氧化氢 H_2O_2 等)间接引发脱氨、脱羧等反应,生成低分子量碎片及自由基中间体,这些中间体随后还可能发生进一步偶联,形成更复杂的产物体系。另外,这些氧化性自由基在溶液体系中迅速扩散,进一步加剧了氨基酸分子的降解。相比之下,在固相体系中,两性离子甘氨酸分子被固定于延伸氢键网络中,辐射反应受到抑制,从而提高了体系的整体辐照稳定性。

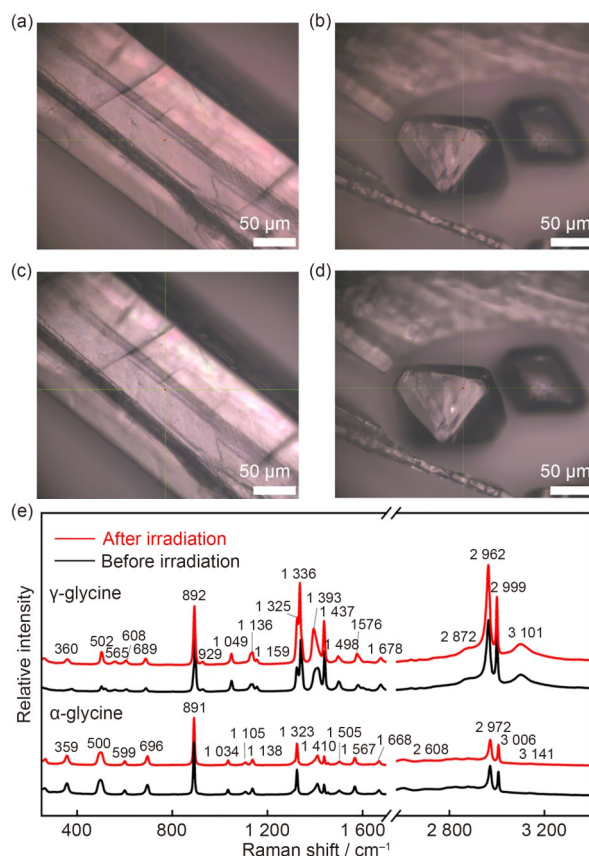


图2 通过蒸发结晶生长的 α -甘氨酸和 γ -甘氨酸的代表性光学显微镜图像; α -甘氨酸(a,c)和 γ -甘氨酸(b,d)在辐照前后的对比;通过蒸发结晶生长的 α -甘氨酸和 γ -甘氨酸在辐照前后的拉曼光谱(e)^[1](彩色见网络版)

Fig.2 Representative optical microscope images of α -glycine and γ -glycine evaporation-grown crystals; α -glycine (a, c) and γ -glycine (b, d) before and after irradiation; Raman spectra of α -glycine and γ -glycine evaporation-grown crystals, before and after irradiation (e)^[1] (color online)

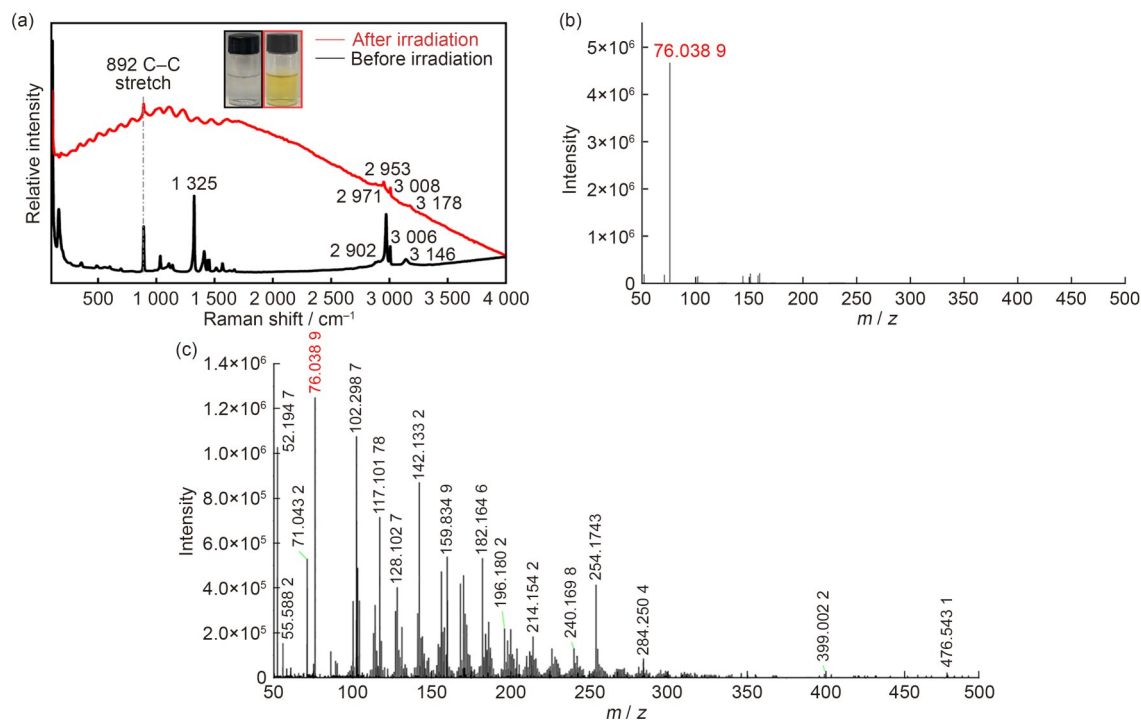


图3 辐照前后甘氨酸溶液干燥后样品的拉曼光谱(a);插图:甘氨酸水溶液在辐照前(左)和辐照后(右)的颜色;辐照前(b)和辐照后(c)甘氨酸水溶液的HPLC-MS结果^[1](彩色见网络版)

Fig.3 Raman spectra measured from dried droplets of glycine solution before and after irradiation (a); inset: typical solution color changes of glycine in aqueous solutions before (left) and after (right) irradiation; HPLC-MS analysis of glycine in aqueous solution before (b) and after (c) irradiation^[1] (color online)

一系列实验结果指示,不同物理状态的氨基酸在辐照作用下的稳定性及其辐照产物均存在显著差异。单晶态氨基酸表现出较高的辐照稳定性,而粉末态则易发生辐射诱导的晶型转变。相比之下,溶液态氨基酸倾向于发生复杂的辐解或聚合反应,生成分子量低于或高于母体化合物的多种副产物。已有研究表明,火星的演化并非一次简单的从“湿”到“干”的线性过程,而是在漫长地质历史中经历了多阶段、间歇性的气候转变,其中至少包括7次显著的全球尺度环境变化事件^[17]。这些气候波动伴随着温度与大气条件的反复调整,可能导致火星表面潜在的氨基酸以多种不同的物理状态存在。因此,在火星上探寻氨基酸等生物有机分子的信号时,除了关注目标化合物本身,还需特别关注其物理状态的多样性及相应的辐照产物,以确保对生物有机分子的准确、可靠识别。当前研究成果不仅有助于深入理解火星辐照环境下有机分子的演化过程,还将有助于提高对火星返回光谱数据的解译能力,为火星生命探测提供谱学指导。

作者贡献声明 李鑫负责实验工作的实施,并撰写了论文的主要内容;周根陶是本文的构思者和

项目负责人,负责整体设计、统筹修改与学术指导;刘文平主要负责数据分析指导及论文修订;汪谟贞、瞿林峰、苏金月和瞿贤超提供了辐射源及辐照剂量率的测定等技术支持和指导;高晓英提供了拉曼光谱等技术支持和指导;胡启涛、殷炜、周梓檬、姚奇志对论文提出了修改意见。全体作者均已阅读并同意论文的最终文本。

参考文献

- Li X. Stability of amino acids in different physical states under γ -ray irradiation and implications for Mars biosignature detection[J]. *ACS Earth and Space Chemistry*, 2026, **10**(4): 1097-1111. DOI: 10.1021/acsearthspacechem.5c00401.
- Liu W P, Yin W, Hu Q T, *et al.* Effect of laser power on Raman analyses of lipids and amino acids: Implications for extraterrestrial life exploration[J]. *Icarus*, 2024, **412**: 115986. DOI: 10.1016/j.icarus.2024.115986.
- Taylor F W. Comparative planetology, climatology and biology of Venus, Earth and Mars[J]. *Planetary and Space Science*, 2011, **59**(10): 889-899. DOI: 10.1016/j.pss.2010.11.009.
- Summons R E, Albrecht P, McDonald G, *et al.* Molecular

- biosignatures[J]. *Space Science Reviews*, 2008, **135**(1): 133-159. DOI: 10.1007/s11214-007-9256-5.
- 5 Keating A, Gonçalves P. The impact of Mars geological evolution in high energy ionizing radiation environment through time[J]. *Planetary and Space Science*, 2012, **72** (1): 70-77. DOI: 10.1016/j.pss.2012.04.009.
 - 6 Takano Y, Kaneko T, Kobayashi K, *et al.* Experimental verification of photostability for free- and bound-amino acids exposed to γ -rays and UV irradiation[J]. *Earth, Planets and Space*, 2004, **56**(7): 669-674. DOI: 10.1186/BF03352529.
 - 7 Rowe L, Peller J, Mammoser C, *et al.* Stability of non-proteinogenic amino acids to UV and gamma irradiation [J]. *International Journal of Astrobiology*, 2019, **18**(5): 426-435. DOI: 10.1017/s1473550418000381.
 - 8 Bonales L J, Muñoz-Iglesias V, Prieto-Ballesteros O, *et al.* Preservation of glycine coordination compounds under a gamma radiation dose representative of natural Mars radioactivity[J]. *Scientific Reports*, 2022, **12**: 13677. DOI: 10.1038/s41598-022-17802-y.
 - 9 Pavlov A A, McLain H L, Glavin D P, *et al.* Rapid radiolytic degradation of amino acids in the Martian shallow subsurface: implications for the search for extinct life[J]. *Astrobiology*, 2022, **22**(9): 1099-1115. DOI: 10.1089/ast.2021.0166.
 - 10 Pavlov A A, McLain H, Glavin D P, *et al.* Radiolytic effects on biological and abiotic amino acids in shallow subsurface ices on Europa and enceladus[J]. *Astrobiology*, 2024, **24**(7): 698-709. DOI: 10.1089/ast.2023.0120.
 - 11 Hassler D M, Zeitlin C, Wimmer-Schweingruber R F, *et al.* Mars' surface radiation environment measured with the Mars science laboratory's curiosity rover[J]. *Science*, 2014, **343**(6169): 1244797. DOI: 10.1126/science.1244797.
 - 12 Srinivasan K. Crystal growth of α and γ glycine polymorphs and their polymorphic phase transformations [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2008, **311**(1): 156-162. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2008.10.084.
 - 13 Gavezzotti A. Crystal formation and stability: Physical principles and molecular simulation[J]. *Crystal Research and Technology*, 2013, **48**(10): 793-810. DOI: 10.1002/crat.201200706.
 - 14 Beruto D T, Searcy A W, Kim M G. Microstructure, kinetic, structure, thermodynamic analysis for calcite decomposition: free-surface and powder bed experiments [J]. *Thermochimica Acta*, 2004, **424**(1/2): 99-109. DOI: 10.1016/j.tca.2004.05.027.
 - 15 Fang F, Sun X, Liu Y X, *et al.* Water radiocatalysis for selective aqueous-phase methane carboxylation with carbon dioxide into acetic acid at room temperature[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2024, **146** (12): 8492-8499. DOI: 10.1021/jacs.3c14632.
 - 16 LaVerne J A. OH radicals and oxidizing products in the gamma radiolysis of water[J]. *Radiation Research*, 2000, **153**(2): 196-200. DOI: 10.1667/0033-7587[2000]153[0196:ORAOPI]2.0.CO;2.
 - 17 Kite E S, Conway S. Geological evidence for multiple climate transitions on Early Mars[J]. *Nature Geoscience*, 2024, **17**(1): 10-19. DOI: 10.1038/s41561-023-01349-2.



第一作者：李鑫，男，2001年出生，2023年于南华大学获学士学位，目前为中国科学技术大学硕士研究生，主要研究方向为行星矿物学和天体生物学，E-mail: lx0219@mail.ustc.edu.cn

First author: LI Xin (male) was born in 2001, and received his B.S. degree from the University of South China in 2023. He is currently pursuing a master's degree at the University of Science and Technology of China (USTC). His research interests include planetary mineralogy and astrobiology. Email: lx0219@mail.ustc.edu.cn.



通信作者：周根陶，男，1964年出生，1999年于中国科学技术大学获博士学位，教授，博士生导师，主要从事生物矿物学、环境矿物学、纳米矿物学、行星矿物学、天体生物学和同位素地球化学等多个交叉学科的研究工作，E-mail: gtzhou@ustc.edu.cn

Corresponding author: ZHOU Gentao (male) was born in 1964, and received his Ph.D. degree from the University of Science and Technology of China (USTC) in 1999. He is currently a professor and doctoral supervisor at USTC. His research interests include biomineralogy, environmental mineralogy, nanomineralogy, planetary mineralogy, astrobiology, and isotope geochemistry. E-mail: gtzhou@ustc.edu.cn