

朱秉启,孙晨,张嘉欣.岩石物理风化的研究进展与问题概述[J].中国沙漠,2023,43(2):281-287.

岩石物理风化的研究进展与问题概述

朱秉启¹,孙晨^{1,2},张嘉欣^{1,2}

(1.中国科学院地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室,北京 100101; 2.中国科学院大学 资源与环境学院,北京 100049)

摘要: 简要回顾了学术界近期关于地表岩石物理风化的理论研究进展、认识 and 存在的问题,针对“亚临界裂纹”理论、“气候驱动”与亚临界裂纹的发育、岩石风化的影响因素——单因素作用与综合效应(本质性与普遍性)、行星尺度的物理风化——撞击驱动或热循环驱动等问题逐一进行了阐述和评论,并为下一步的研究提出新的建议。

关键词: 物理风化/机械风化; 岩石破坏; 亚临界裂纹; 气候驱动/气候依赖性; 热疲劳/热循环

文章编号: 1000-694X(2023)02-281-07

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2022.00097

中图分类号: P313

文献标志码: A

0 引言

岩石的物理风化,即岩石的物理破坏,又被称为岩石的“机械风化”,指地表和近地表所有岩石在原位发生的、不同尺度(晶内、晶间、晶外、矿物颗粒间、碎屑颗粒间等)的破裂过程和粒径减小的过程,代表了一种广泛存在的、地质/地貌作用突破某一临界速率限制的过程^[1-9]。

准确描述岩石风化(岩石的原位分解)至关重要。因为在地表环境下,广泛的岩石风化作用驱动了地表侵蚀、土壤的形成^[10-11],影响着包括人类生命进化^[12]在内的生物群落演化^[13],同时破坏人类社会的各种基础设施^[14],并对地壳岩石圈吸收大气CO₂的速率有关键性影响,从而在地质或现代时间尺度上调节与稳定全球的气候系统^[15-17]。

在学术界尤其是地学和岩石力学方面,历来有一个基础性的科学问题,即当构成陆壳的岩石暴露在自然环境中时,环境因素(尤其是水汽和温度等气候因素)是如何影响岩石的物理破坏并最终形成黏土矿物或土壤等终端产物的^[3,5]? 学术界针对这个问题开展了持续的研究,目前取得了可观的理论性或经验性的认识和进展,但同时也面临更多的新问题。本文的目的就是简要梳理近年来人们在此

问题上的新认识和新问题。

1 岩石物理风化的近期研究进展和理论创新

1.1 “亚临界裂纹”理论的提出与问题

从理论上说,岩石的物理破坏必然源于断裂以及裂纹(或裂缝、裂隙)的发育与扩展^[5]。这种物理过程普遍被认为是由环境因素的变化驱动的^[18-27],即环境驱动学说。

在力学上,任何给定的裂纹在脆性弹性固体材料(如岩石)中扩展的倾向或趋势,都可以通过明确定义的断裂力学定律来描述。这些定律通常分为平衡定律和动力学定律,目前学术界基于环境驱动理论引导的物理风化研究,几乎都是采用平衡定律的方法^[18,20-22,24,26]。

平衡定律也称格里菲斯能量平衡律,是热力学第一定律(当一个系统从非平衡态转为平衡态时能量会减少)在断裂力学上的应用,即假定裂纹是由于作用于材料表面上的力发生湮灭而形成的。平衡定律预测的裂纹发育是,作用于材料表面的应力(σ)一旦达到或超过材料强度的“临界应力(σ_0)”(即 $\sigma \geq \sigma_0$),裂纹就会出现和动态扩展。该临界应力

收稿日期:2022-05-04; 改回日期:2022-06-09

资助项目:第三次新疆综合科学考察项目(2021XJKK0803);国家自然科学基金项目(41930640);第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK1003)。

作者简介:朱秉启(1976—),男,安徽濉溪人,博士,研究员,主要从事地貌与第四纪环境变化研究。E-mail: zhubingqi@igsnr.ac.cn.

σ_0 强度由材料的特性决定,如抗拉强度(σ_T)或断裂韧性(K_{IC} ,又称临界应力强度因子)等,其本身又取决于材料固有的杨氏模量或泊松比等。

可以看出,格里菲斯平衡理论认为岩石物理破坏的前提是 $\sigma \geq \sigma_0$ 。因此,基于平衡定律的物理风化研究几乎都朝着这样一个基本问题而去:自然状况下的 σ 应力过程是否超过了其临界应力值 σ_0 ?这似乎告诉我们只要检测出 σ 和 σ_0 之间的定量关系就可以预测岩石的裂纹发育,解决岩石破碎的物理风化问题似乎变得非常简单了。

然而事实并非如此。

随着岩石物理风化研究的日益增多,在目前已报道的断裂力学文献中,人们发现不仅在岩石表面,即使是在岩石的内部,裂纹也会在远低于临界应力 σ_0 的应力条件下缓慢而稳定地扩展——即“亚临界裂纹”的普遍发育和扩展^[5,28]。

“亚临界应力 σ_s ”和与之紧密相关的“亚临界裂纹”学说由此产生。这无疑促进了人们对断裂力学平衡定律的新认识。

更值得注意的是,地球上所有陆地和近地表岩石的风化环境特征之一,就是岩石是长期暴露在这种“亚临界应力 σ_s ”条件下的,时间跨度甚至为 $10 \sim 10^6$ 年^[28-29]。

而目前学术界已有的、针对岩石断裂过程和产物的物理风化研究,很多都是在相对宏观的尺度上进行的,“亚临界裂纹”尺度上的研究则相对薄弱。

由于亚临界裂纹的理论研究是我们的薄弱环节所在,且理论进展甚微,因此目前我们对地球不同景观地表和其他类地行星上的物理/机械风化的主要驱动因素的理解,依然是很有限的。

1.2 “气候驱动”与“亚临界裂纹”的发育

学术界普遍认识到了一些环境因素如水、热变化在岩石物理风化中的重要性。

水(无论是液态、固态、气态、离子/化学结合态等)在岩石风化破裂中的作用被认为是非常关键的因素,因为它不仅关系到另一种重要的岩石风化过程(水是岩石化学风化的媒介、基质和前提)发生与否,还在岩石物理风化过程如融冻旋回破裂过程中十分重要。

另有研究发现,即使仅对岩石施加极低的应力(比如自然界中普遍存在一种非常弱小的、类似于拉力的作用力,它并非由传统的地质环境因素如构

造、地震等活动产生),岩石断裂和裂纹也会发生;而这些应力可能由于太阳辐射每天的加热和冷却这样简单和普遍的循环现象产生^[30-41],它们几乎无处不在,被称为“热应力”或“热差异”,可以致使岩石“热疲劳”而碎裂或崩解。

总体来说,上述水分和热力等不同形式的环境因素具体是如何影响岩石机械风化的机理目前还并不清楚^[32-33,35-36,39]。人们通常默认水的存在会加速岩石机械风化(当然也影响化学风化,这一方面本文暂不做讨论),同时假设某些依赖水分的、引发应力的温度变化过程(如冻结、热循环)会在岩石破裂中占据主导地位^[42-48]。

因此学术界普遍认为,在几乎所有的地表和近地表环境条件下,大多数不同类型岩石上发生的机械风化过程,都可以通过“与气候因素相关”的岩石破裂作用而进行,即“气候驱动”或“气候依赖性”观点。这一认识已得到了许多物理学(如断裂力学、工程材料力学、晶体矿物学等)模型和物理实验的证实与量化。

在“气候驱动”的岩石破裂过程之中,“亚临界裂纹”的发育作用被赋予了分外重要的意义。一方面因为亚临界裂纹的“尖端”发育过程被广泛认为与大多数机械风化的“键断裂”机制是一致的^[9],另一方面因为它是气候因素与岩石破碎(宏观过程)之间的纽带。有文献这样简单总结气候因素和岩石物理风化之间的关系:气候因素会强烈地影响岩石颗粒的亚临界裂纹发育,从而促进了岩石的物理风化^[5,9]。在这里,亚临界裂纹被认为“几乎是一切岩石物理风化作用的开始”。

然而,亚临界裂纹是如何发育和形成的?学术界对这一问题的认识存在极大的争议,焦点在于亚临界裂纹是否对应力作用有依赖性。

最近有研究基于多年的现场仪器观测数据^[9],“倾听/聆听”野外自然开裂的岩石的微观“声发射”,以测试气候因素与亚临界裂纹的尖端发育过程(即广泛被认为体现了大多数机械风化的键断裂机制)之间的联系。结果表明,即使在控制应力载荷的情况下,这些岩石的机械风化速率也会随着大气蒸汽压(VP)、温度和相对湿度的变化呈指数增长^[9]。这些研究表明,温暖湿润的气候在微观尺度上也能够加速岩石的机械风化过程,且与应力负荷的大小无关。

这一结果显然挑战了学术界之前的观点,即

“岩石的机械风化对应力载荷存在单一(或绝对)依赖性”。

此外,另有物理模型模拟研究显示,即使在外界环境的应力普遍低于岩石颗粒的临界破裂强度的水平下,气候因素所导致的亚临界裂纹也可以在岩石上显著发育并达到峰值,且这种破裂可以不考虑破裂应力的来源(如冻结、热循环、重力卸载等)^[5],即与应力负荷的大小和性质都无关。

这一结果进一步证明亚临界裂纹的发育可以独立于应力载荷,与应力的存在与否无关。

在机理上,岩石亚临界裂纹之所以能够产生,是因为亚临界裂纹尖端的连接键能够被与气候因素相关的低应力化学物理过程所破坏。如有研究表明,对于任何低于岩石临界破裂强度的应力或应力组合,环境湿度的线性增加都会导致岩石亚临界裂纹的开裂速率和岩石侵蚀速率呈指数性增加^[5]。

上述研究和分析表明,气候因素也能驱动岩石亚临界裂纹的发育与形成。

1.3 岩石物理风化的影响因素——单因素作用与综合效应(本质性与普遍性)

尽管上述分析显示,人们已经认识到气候因素在驱动岩石物理风化过程中的重要性,但这一认识和理解仍然是比较笼统而概括的。因为目前所理解的“气候驱动”,往往是多种气候因素在多种时空尺度和动力学机制上的综合表现,而单一气候因素的效应如何,或两种综合因素的效应如何相互影响或叠加,这些问题目前还不清楚。

已有越来越多的研究显示在不同气候条件组合和地质条件下岩石物理风化速率的相似性^[40,49-53],表明不同气候因素是与其他环境条件耦合作用于岩石的风化过程,气候驱动的效应并不是独立的(甚至可能不是主要的)。如在北半球中纬度某些造山带区域,当物理风化和化学风化耦合在一起,其风化过程的第一级驱动因素可能并不是气候,而是构造断层、岩性分布、地形梯度、风化壳(或土壤披覆体)厚度等地质条件的环境效应^[49-50,54]。

另外,随着岩石风化与气候驱动研究的持续进展,目前不断丰富的全球岩石风化数据库(包括剥蚀率数据库)中,一些针对不同成因类型的风化数据库,如记录裸岩风化的数据库^[55]和土壤产量的数据库^[56-57]等,都证明其(裸岩风化、表土产量)与机械风化作用密切相关^[58]。这表明物理风化过程本身

及其产物都不能通过传统的气候参数(如平均年降水量)来进行简单的、广泛性的(即普遍相关的)预测^[58-63]。

由于气候系统的开放性和气候因素本身的关联性、多变性和不确定性以及区域岩相地质/岩石类型等的多样性,如果我们基于不同区域的岩石物理风化案例研究得出的结论是一种“普遍性相关的”,那么这种“普遍性相关”可能说明我们还没有揭示出岩石物理风化机制的本质因素,即“直接的/简单的影响因素”或“单一影响因素”,而不是“普遍性的影响”。

总体而言,目前我们仍然需要开展更多、更精确的单因素(或单一动力学机制)案例研究去准确揭示不同环境因素(气候和非气候因素)到底是如何影响岩石的机械破裂过程的。这对理解某些特殊环境或简单环境中的岩石物理风化是至关重要的。因为我们无法把一种综合环境效应的认知应用到非综合因素组成的环境中来,自然界(乃至宇宙星空)中并非所有的风化环境都如同我们已知的地球地理环境,甚至气候因素可能在某些特殊环境下都不存在(如月球等星际环境)。

1.4 行星尺度的物理风化——撞击驱动或热循环(气候)驱动?

同地球一样,许多类地行星的地表也存在着由细粒碎屑岩石物质构成的风化层。由于与地球存在显著的环境差异(特别是气候),上述气候驱动理论显然难以解释这些风化现象。因此,这些星体风化层是如何形成的,这一科学问题一直是学术界的热点问题。

不少研究利用基于巴黎定律和查尔斯定律建立的标准模型,来估算不同类地天体表面风化层形成所需要的动力和时间。有研究利用该标准模型估算了月球地表1~10 cm粒径的岩石(玄武岩)颗粒的形成条件,这些能够在微流星体撞击作用下破碎成细颗粒的风化层的形成,所需要的时间大约是数个百万年^[64-65]。而利用相同模型和方法计算的太阳系近地小行星(简称NEA,指 $q < 1.3$ AU的小行星,1 AU是日地距离)表面岩石风化层的形成(撞击成因),也需要与月球岩石破碎大约相同的时间;而在主体小行星带(简称MBA,位于火星与土星之间的小行星带)上,这一时间则大约是月球的10倍^[65]。

上述行星表面风化层模拟研究结果表明,撞击

成因的星体表面风化层是在地质时间尺度上(几个百万年)才能形成的。但近期来自太空探测和热红外观测的结果表明,太阳系中一些“年轻的”小行星天体表面也几乎都被一层厘米级或更小的碎屑颗粒所覆盖^[3],它们构成了这些星体的表土或风化层。如果用传统看法去理解而将这些风化层的形成归因于流星体撞击作用的话,不仅从其形成年龄上无法解释(形成风化层的时间不够),而且撞击模型模拟还表明这些陨石坑喷出物的速度通常大于每秒几十厘米(相当于千米大小的小行星引力逃逸速度,风化层无法保留),这些显然无法解释小行星表面风化层的存在。因此撞击作用和撞击碎片无法解释这些小行星风化层的起源和成因。

新近的一些研究在地球实验室基于类似星际环境的温度循环或湿度循环等控制手段,观测了不同类型球粒陨石或玄武岩岩石表面的裂纹扩展过程^[3,5,9]。一些球粒陨石热循环研究的测量结果显示,在模拟星空环境的实验室条件下,岩石表面的裂纹能以约 $0.5\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 的速率扩展^[3]。温度循环实验结果的裂纹扩展速率还表明在NEA(近地小行星)表面1 cm厚的岩石可以在不到20年的时间内碎裂成更小的碎片,比微流星体撞击粉碎要快几个数量级;而后者在NEA需要约2 Ma,在MBA(主体小行星带)则需要约20 Ma^[64-65]。

这些研究表明,有一种物理风化作用而非撞击作用才是控制近地小行星表面风化层形成的主要机制。这种机制可能就是太阳辐射所导致的“热疲劳/热循环”(thermal fatigue)作用^[3]。本质上,它也属于上文我们所阐述的“气候因素”,这里的物理风化也属于“气候驱动”。尽管这些太阳系小行星的星际环境可能由于缺乏水分和大气而不能构成严谨的“气候”,但太阳辐射带来的热力作用与地球相似,且这些小行星几乎都是“岩石行星”,与地球的地质条件也有相似性。因此,上述这种“热疲劳/热循环”风化机制,不仅适用于小行星体,也可以适用于更大尺度的行星系统。

总体而言,在太阳系内,太阳辐射日变化产生的“热疲劳/热循环”作用比其他气候因素和非气候因素的环境效应更具普遍性。它所引起的岩石碎裂能够比星体撞击等作用更快更有效地风化类地行星体地表几厘米以上的岩石碎屑,且这种风化作用与行星的大小无关,因此这一过程也能解释较大行星体(如

地球、火星等)最初始表面风化层的形成。

2 结论和展望

诚然,我们在文中所陈述的各种岩石物理风化研究中有一个共同存在的问题,就是其实验研究方法和实验材料都是比较简单的(基于假设某些环境条件的恒定或忽略)。然而我们知道,任何一种岩石颗粒的晶间尺度裂纹(亚临界裂纹),其扩展速率通常是裂纹尺寸的非线性函数,且晶间尺度裂纹的长度通常要远小于岩石颗粒直径或岩石颗粒表面裂纹的长度。因此,基于“亚临界裂纹”理论认识的薄弱,我们需要进行更多详细的、不同岩石颗粒尺度的破碎/断裂力学分析,以调查对于较大的岩石体或星体岩石(例如NEA、MBA、地球、火星等)和较低的温度(零下数十度的寒冻)环境下,岩石颗粒晶间与晶外尺度破裂的快速扩展速率是否会保持到岩石断裂点的产生从而导致岩石颗粒大尺度裂纹的出现和高效的破碎,以及在不同的循环周期内是否都会发生相似的岩石裂纹和破碎。

而针对上述理论认识和存在问题,学术界目前还缺乏进一步的详细研究,不管是模型模拟数字研究还是实验室地质样品实例研究。因此,我们建议相关学者们加强微观尺度上的“亚临界裂纹”研究和宏微观尺度上的“单一热循环/热疲劳”机理研究。这可以作为岩石物理风化未来的研究方向之一,并恳请相关部门予以资助。

参考文献:

- [1] Heimsath A M, Dietrich W E, Nishiizumi K, et al. The soil production function and landscape equilibrium [J]. *Nature*, 1997, 388(6640): 358-361.
- [2] Kirchner J W, Riebe C S, Ferrier K L, et al. Cosmogenic nuclide methods for measuring long-term rates of physical erosion and chemical weathering [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2006, 88(1): 296-299.
- [3] Delbo M, Libourel G, Wilkerson J, et al. Thermal fatigue as the origin of regolith on small asteroids [J]. *Nature*, 2014, 508(7495): 233-236.
- [4] Collins B D, Stock G M. Rockfall triggering by cyclic thermal stressing of exfoliation fractures [J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9(5): 395-400.
- [5] Eppes M C, Keanini R. Mechanical weathering and rock erosion by climate-dependent subcritical cracking [J]. *Reviews of Geophysics*, 2017, 55(2): 470-508.
- [6] Lebedeva M I, Brantley S L. Weathering and erosion of fractured bedrock systems [J]. *Earth Surface Processes and Land-*

- forms, 2017, 42(13): 2090–2108.
- [7] McAllister D, Warke P, McCabe S. Stone temperature and moisture variability under temperate environmental conditions: implications for sandstone weathering[J]. *Geomorphology*, 2017, 280: 137–152.
 - [8] Shobe C M, Hancock G S, Eppes M C, et al. Field evidence for the influence of weathering on rock erodibility and channel form in bedrock rivers[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2017, 42(13): 1997–2012.
 - [9] Eppes M C, Magi B, Scheff J, et al. Warmer, wetter climates accelerate mechanical weathering in field data, independent of stress-loading[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(24): 2020GL089062.
 - [10] Murphy B P, Johnson J P L, Gasparini N M, et al. Chemical weathering as a mechanism for the climatic control of bedrock river incision[J]. *Nature*, 2016, 532(7598): 223–227.
 - [11] Richter D D, Eppes M C, Austin J C, et al. Soil production and the soil geomorphology legacy of Grove Karl Gilbert[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2020, 84(1): 1–20.
 - [12] Kasting J F. The Goldilocks planet? How silicate weathering maintains Earth “just right” [J]. *Elements: An International Magazine of Mineralogy, Geochemistry, and Petrology*, 2019, 15(4): 235–240.
 - [13] Lu M, Hedin L O. Global plant-symbiont organization and emergence of biogeochemical cycles resolved by evolution-based trait modelling[J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2019, 3(2): 239–250.
 - [14] Phillipson M C, Emmanuel R, Baker P H. The durability of building materials under a changing climate[J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2016, 7(4): 590–599.
 - [15] Walker J C G, Hays P B, Kasting J F. A negative feedback mechanism for the long-term stabilization of Earth's surface temperature [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1981, 86(C10): 9776–9782.
 - [16] Macdonald F A, Swanson-Hysell N L, Park Y, et al. Arc-continent collisions in the tropics set Earth's climate state[J]. *Science*, 2019, 364(6436): 181–184.
 - [17] Isson T T, Planavsky N J, Coogan L A, et al. Evolution of the global carbon cycle and climate regulation on earth[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2020, 34(2): e2018GB006061.
 - [18] Ravina I. The electrical double layer as a possible factor in desert weathering [J]. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 1974, 21: 13–18.
 - [19] Walder J, Hallet B. A theoretical model of the fracture of rock during freezing [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1985, 96(3): 336–346.
 - [20] Jiménez-González I, Rodríguez-Navarro C, Scherer G W. Role of clay minerals in the physicomaterial deterioration of sandstone [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2008, 113(F2): F02021.
 - [21] Roering J J, Marshall J, Booth A M, et al. Evidence for biotic controls on topography and soil production[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 298(1/2): 183–190.
 - [22] Al-Omari A, Brunetaud X, Beck K, et al. Effect of thermal stress, condensation and freezing-thawing action on the degradation of stones on the Castle of Chambord, France[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 71(9): 3977–3989.
 - [23] Eppes M C, Willis A, Molaro J, et al. Cracks in Martian boulders exhibit preferred orientations that point to solar-induced thermal stress[J]. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 1–11.
 - [24] Bost M, Pouya A. Stress generated by the freeze-thaw process in open cracks of rock walls: empirical model for tight limestone [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2017, 76(4): 1491–1505.
 - [25] Eppes M C, Magi B, Hallet B, et al. Deciphering the role of solar-induced thermal stresses in rock weathering [J]. *Bulletin*, 2016, 128(9): 1315–1338.
 - [26] Wang Z T, An Z S. A simple theoretical approach to the thermal expansion mechanism of salt weathering[J]. *Catena*, 2016, 147: 695–698.
 - [27] Lamp J L, Marchant D R, Mackay S L, et al. Thermal stress weathering and the spalling of Antarctic rocks [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2017, 122(1): 3–24.
 - [28] Atkinson B K. Subcritical crack growth in geological materials [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1984, 89(B6): 4077–4114.
 - [29] Anderson T L. *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*[M]. Boca Raton, USA: CRC Press, 2017.
 - [30] Griggs D T. The factor of fatigue in rock exfoliation [J]. *The Journal of Geology*, 1936, 44(7): 783–796.
 - [31] Hall K. Rock moisture content in the field and the laboratory and its relationship to mechanical weathering studies [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1986, 11(2): 131–142.
 - [32] Hall K, Hall A. Weathering by wetting and drying: some experimental results [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1996, 21(4): 365–376.
 - [33] Halsey D P, Mitchell D J, Dews S J. Influence of climatically induced cycles in physical weathering [J]. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 1998, 31(4): 359–367.
 - [34] Matsukura Y, Takahashi K. A new technique for rapid and non-destructive measurement of rock-surface moisture content; preliminary application to weathering studies of sandstone blocks [J]. *Developments in Geotechnical Engineering*, 2000, 84: 47–54.
 - [35] Sass O. Rock moisture measurements: techniques, results, and implications for weathering [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2005, 30(3): 359–374.
 - [36] Burke B C, Heimsath A M, White A F. Coupling chemical weathering with soil production across soil-mantled landscapes [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2007, 32(6): 853–873.
 - [37] Burnett B N, Meyer G A, McFadden L D. Aspect-related micro-

- climatic influences on slope forms and processes, northeastern Arizona [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2008, 113(F3): F03002.
- [38] Owen J J, Amundson R, Dietrich W E, et al. The sensitivity of hillslope bedrock erosion to precipitation [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2011, 36(1): 117–135.
- [39] Mol L, Viles H A. The role of rock surface hardness and internal moisture in tafoni development in sandstone [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2012, 37(3): 301–314.
- [40] Larsen I J, Almond P C, Eger A, et al. Rapid soil production and weathering in the Southern Alps, New Zealand [J]. *Science*, 2014, 343(6171): 637–640.
- [41] De Haas T, Conway S J, Krautblatter M. Recent (Late Amazonian) enhanced backweathering rates on Mars: Paracratering evidence from gully alcoves [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2015, 120(12): 2169–2189.
- [42] Gerber E, Scheidegger A E. Stress-induced weathering of rock masses [J]. *Eclogae Geologicae Helveticae*, 1969, 62(2): 401–415.
- [43] Small E E, Anderson R S, Hancock G S. Estimates of the rate of regolith production using ^{10}Be and ^{26}Al from an alpine hillslope [J]. *Geomorphology*, 1999, 27(1): 131–150.
- [44] Wells T, Binning P, Willgoose G. The role of moisture cycling in the weathering of a quartz chlorite schist in a tropical environment: findings of a laboratory simulation [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2005, 30(4): 413–428.
- [45] Humphreys G S, Wilkinson M T. The soil production function: a brief history and its rediscovery [J]. *Geoderma*, 2007, 139(1/2): 73–78.
- [46] Elliott C. Influence of temperature and moisture availability on physical rock weathering along the Victoria land coast, Antarctica [J]. *Antarctic Science*, 2008, 20(1): 61–67.
- [47] Moores J E, Pelletier J D, Smith P H. Crack propagation by differential insolation on desert surface clasts [J]. *Geomorphology*, 2008, 102(3): 472–481.
- [48] West N, Kirby E, Bierman P, et al. Aspect-dependent variations in regolith creep revealed by meteoric ^{10}Be [J]. *Geology*, 2014, 42(6): 507–510.
- [49] Riebe C S, Kirchner J W, Finkel R C. Long-term rates of chemical weathering and physical erosion from cosmogenic nuclides and geochemical mass balance [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, 67(22): 4411–4427.
- [50] Riebe C S, Kirchner J W, Finkel R C. Erosional and climatic effects on long-term chemical weathering rates in granitic landscapes spanning diverse climate regimes [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 224(3/4): 547–562.
- [51] Clift P D. Controls on the erosion of Cenozoic Asia and the flux of clastic sediment to the ocean [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 241(3/4): 571–580.
- [52] Molnar P, Anderson R S, Anderson S P. Tectonics, fracturing of rock, and erosion [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2007, 112(F3): F03014.
- [53] Dixon J L, Heimsath A M, Amundson R. The critical role of climate and saprolite weathering in landscape evolution [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, 34(11): 1507–1521.
- [54] Schoonejans J, Vanacker V, Opfergelt S, et al. Kinetically limited weathering at low denudation rates in semiarid climatic conditions [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2016, 121(2): 336–350.
- [55] Moses C, Robinson D, Barlow J. Methods for measuring rock surface weathering and erosion: a critical review [J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 135: 141–161.
- [56] West N, Kirby E, Bierman P, et al. Regolith production and transport at the Susquehanna Shale Hills Critical Zone Observatory, part 2: insights from meteoric ^{10}Be [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2013, 118(3): 1877–1896.
- [57] Vázquez M, Ramírez S, Morata D, et al. Regolith production and chemical weathering of granitic rocks in central Chile [J]. *Chemical Geology*, 2016, 446: 87–98.
- [58] Heimsath A M, DiBiase R A, Whipple K X. Soil production limits and the transition to bedrock-dominated landscapes [J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5(3): 210–214.
- [59] Von Blanckenburg F. The control mechanisms of erosion and weathering at basin scale from cosmogenic nuclides in river sediment [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 237(3): 462–479.
- [60] Persico L P, McFadden L D, Frechette J D, et al. Rock type and dust influx control accretionary soil development on hillslopes in the Sandia Mountains, New Mexico, USA [J]. *Quaternary Research*, 2011, 76(3): 411–416.
- [61] Portenga E W, Bierman P R. Understanding Earth's eroding surface with ^{10}Be [J]. *GSA Today*, 2011, 21(8): 4–10.
- [62] Ryb U, Matmon A, Erel Y, et al. Controls on denudation rates in tectonically stable Mediterranean carbonate terrain [J]. *Bulletin*, 2014, 126(3/4): 553–568.
- [63] Levenson Y, Ryb U, Emmanuel S. Comparison of field and laboratory weathering rates in carbonate rocks from an Eastern Mediterranean drainage basin [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 465: 176–183.
- [64] Hörz F, Schneider E, Gault D E, et al. Catastrophic rupture of lunar rocks: a Monte Carlo simulation [J]. *The Moon*, 1975, 13(1): 235–258.
- [65] Hörz F, Cintala M. The Barringer Award address-presented 1996 July 25, Berlin, Germany: impact experiments related to the evolution of planetary regoliths [J]. *Meteoritics and Planetary Science*, 1997, 32: 179–209.

An overview of the research progress and problems of rock physical weathering

Zhu Bingqi¹, Sun Chen^{1,2}, Zhang Jiaxin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: This paper briefly reviews the recent theoretical research progress, understanding and existing problems of physical weathering of surface rocks in academia. The theory of "subcritical crack", "Climate driven" and the development of subcritical cracks, the influencing factors of rock weathering-single-factor's effect and comprehensive effect (essentiality and universality), the impact driven or thermal cycle driven on physical weathering in the planetary-scale, are expounded and commented one by one, and new suggestions are put forward for the future research prospects.

Key words: physical weathering/mechanical weathering; rock failure; subcritical crack; climate-forcing/climate-dependent; thermal fatigue/thermal cycling