



## 科研进展

### 哈密翼龙化石风化机理研究取得新进展

发表日期: 2021-02-03

[【放大】](#) [【缩小】](#)

近日,《中国科学:地球科学》及其英文版(SCIENCE CHINA Earth Sciences)同时在线发表了中国科学院古脊椎动物与古人类研究所汪筱林团队和中国科学院大学合作关于哈密翼龙化石风化机理的最新研究成果。

发现于我国新疆哈密戈壁的数以千万计的哈密翼龙及其三维保存的蛋与胚胎化石,被认为是翼龙研究两百年来最激动人心的发现之一。作为目前世界上唯一一处三维保存的翼龙蛋、胚胎和雌、雄个体共生的翼龙化石地点,这一发现和研究,在翼龙的性双型、生长发育、繁殖行为以及生态习性等方面都取得若干重要进展。

然而,化石标本从极其干旱炎热的原产地戈壁大漠到了相对潮湿的地方后,就会出现严重的自然风化现象,具体表现为化石围岩粉化和翼龙骨骼破碎。即便是进行渗胶加固处理后,依旧出现上述问题,严重威胁化石的安全,也影响后续研究和博物馆展陈。常规的化石修复加固手段已无法对化石进行有效地保护,需要开展针对性很强的风化机理研究。

早在2019年,研究团队对哈密翼龙化石围岩粉化破碎的原因就已进行了初步分析研究。通过岩相和扫描分析,结合X射线衍射结果,发现组成围岩的碎屑颗粒之间起着粘结作用的是石盐、方解石和黏土矿物。通过离子色谱分析,发现化石围岩的可溶盐含量高出安全域值近4倍。基于以上认识,认为导致围岩逐渐粉化脱落破碎的原因主要包括以下三点:1)钙质胶结物和石盐胶结物的溶解,使颗粒之间起胶结作用的物质减少,一旦受到外力,颗粒很容易从围岩母体上脱落。2)因环境湿度变化,蒙脱石等黏土类矿物吸水膨胀、失水收缩所产生的应力破坏。以钠蒙脱石为例,其吸水膨胀后体积可膨胀至原的30倍。黏土矿物膨胀对围岩中的石英及长石颗粒产生巨大的挤压力;而蒙脱石失水之后,又会收缩回原样。这样随着干湿变化,反复多次地膨胀收缩之后,将加大围岩颗粒之间的空隙,不断降低围岩的强度,导致围岩结构破坏。

3) 在温湿度变化下, 可溶盐溶解—重结晶作用对化石围岩造成破坏。NaCl溶解重结晶时产生的结晶压力为221.9 MPa, 而Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>吸收水分变成 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·10H<sub>2</sub>O 的过程体积膨胀, 其水化压高达48 MPa。可溶盐结晶时产生的结晶压及盐分水化作用产生的水化压等将对周围岩石产生巨大应力, 从而导致围岩变得酥松。

本次研究是在对哈密翼龙化石围岩风化机理研究的基础上, 对骨骼化石开展进一步的研究, 主要是要了解骨骼化石自然风化破碎的原因, 以及了解化石与围岩自然风化破碎的异同。

借助X射线荧光光谱分析, 发现骨骼化石钙磷比约为1.16, 明显低于羟基磷灰石的1.67。通过傅里叶红外光谱仪分析, 发现骨骼的磷酸盐结晶度指数高达4.17, 且存在CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>替代骨骼中羟基磷灰石PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>的现象。通过X射线衍射图谱发现骨骼化石中含有少量方解石, 借助扫描电镜及能谱仪, 发现这些方解石填充在骨骼的脉管道内。以上结果均表明化石经历了严重的后期成岩改造作用。除此之外, 通过X射线衍射对中空骨骼内部的填充物进行分析, 发现填充物主要为石英、长石等碎屑颗粒, 以及方解石胶结物, 其成分与围岩基本一致。借助离子色谱分析, 发现骨骼化石中含有大量的Cl<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Na<sup>+</sup>和Ca<sup>2+</sup> 等离子, 总可溶盐离子含量高达35584 μg/g, 超出可溶盐含量安全域值近10倍。基于以上分析结果, 初步认为骨骼化石自然开裂剥落破碎的主要原因包括两个方面:

首先, 与围岩风化原因类似, 骨骼化石也遭受强烈的盐碱矿物遇潮自然风化作用(盐风化)。离子色谱分析结果推测骨骼化石当中含有大量NaCl、Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、CaCl<sub>2</sub>等可溶盐。化石从常年干旱炎热的戈壁地区到了相对湿润的新环境后, 随着外界环境温度和湿度的变化, NaCl、Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>等可溶盐在骨骼内不断溶解—重结晶, 必然产生巨大的结晶压和水化压。而翼龙化石在埋藏后的成岩过程中, 有机质流失, 其抗拉强度急剧下降。当温湿度发生变化, 可溶盐不断溶解重结晶, 此过程中释放的结晶压和水化压已经超过化石的抗拉强度, 使化石开裂剥落。

其次, 由于化石各组分之间热膨胀系数不同, 在巨大温差作用下, 化石内部产生巨大热应力导致开裂。应力的来源有两方面: 一是在骨骼的脉管道等孔隙中存在一定量的方解石, 其热膨胀系数存在各向异性, 随着温度不断变化, 骨骼内的方解石与羟基磷灰石膨胀收缩的体积不同, 造成应力的局部集中, 产生微裂隙, 从而对化石结构造成破坏; 二是由于外部围岩、骨骼化石和内部填充物三者之间的热膨胀系数不同, 在温度变化下, 以方解石为主的内部填充物、骨骼化石和外部砂岩的热膨胀系数不同导致化石产生热应力, 在昼夜温度的循环变化下, 围岩—骨骼化石界面和骨骼化石—填充物界面会不断产生应力, 在长期的应力作用下会使得化石开裂剥落。

通过哈密翼龙化石及围岩风化机理的研究, 可为后续保护工作奠定基础。在日后进行保护时, 除了研发合适的加固材料对化石和围岩进行加固保护处理外, 盐害治理也是重中之重。这一研究结果对极干旱高盐碱地区的化石保护具有普遍意义, 具有潜在的应用价值。

本研究共同第一作者为中国科学院大学博士研究生李颖和罗武干副教授, 中国科学院古脊椎动物与古人类研究所汪筱林研究员为通讯作者, 其他作者包括中国科学院大学杨益民教授和中国科学院古脊椎动物与古人类研究所蒋顺兴副研究员。

本项研究得到国家自然科学基金面上项目(41572020)和基础科学中心项目(41688103)、中国科学院青年创新促进会基金(2019075)和哈密市政府合作项目的资助。

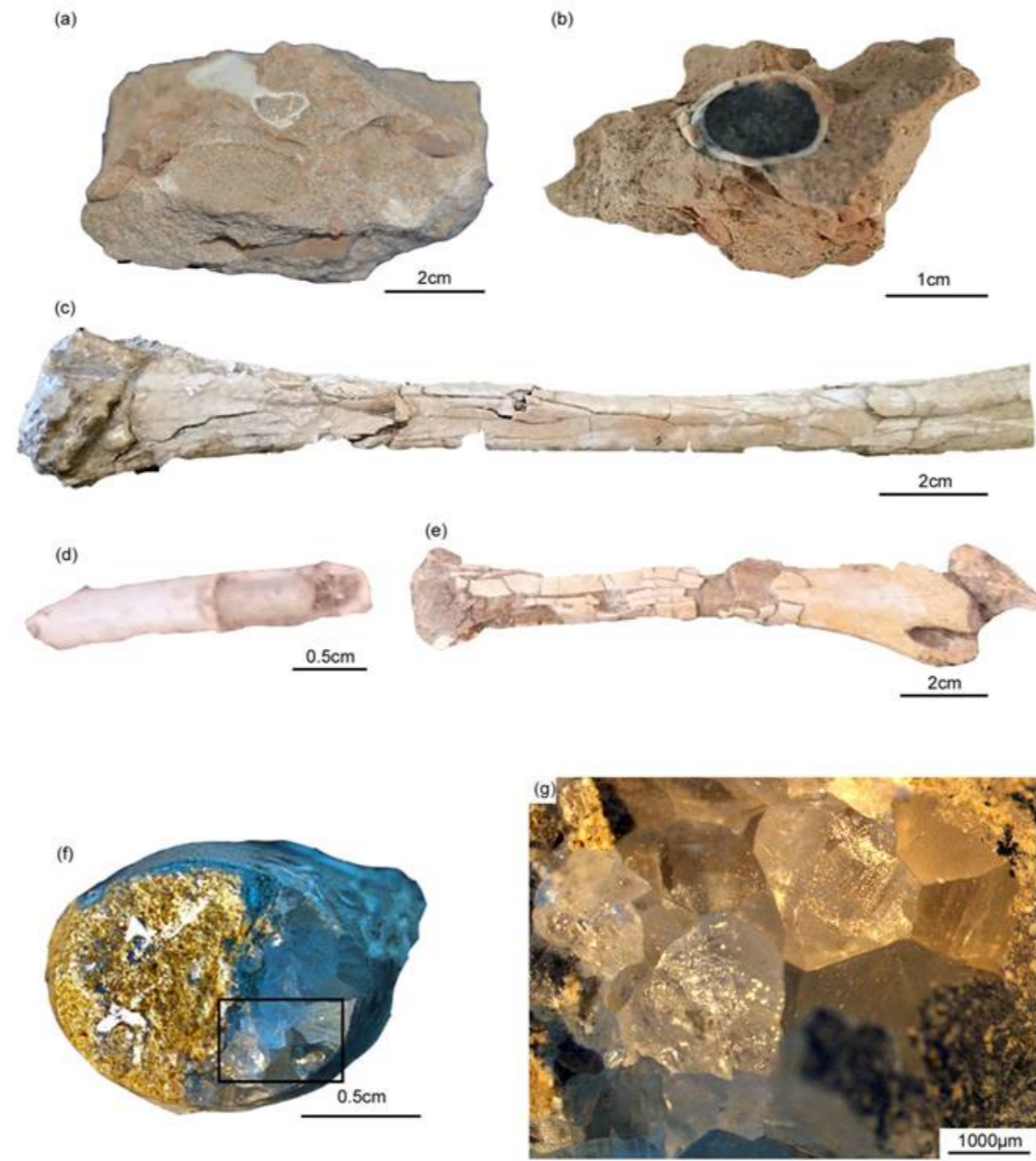


图1 天山哈密翼龙化石标本（李颖 供图）

围岩包裹着骨骼化石，中空骨骼内部为浅色填充物（a）和深色填充物（b）；开裂剥落的骨骼化石（c，d，e）；中空骨骼化石内偶见结晶良好的无色透明晶体（f，g）

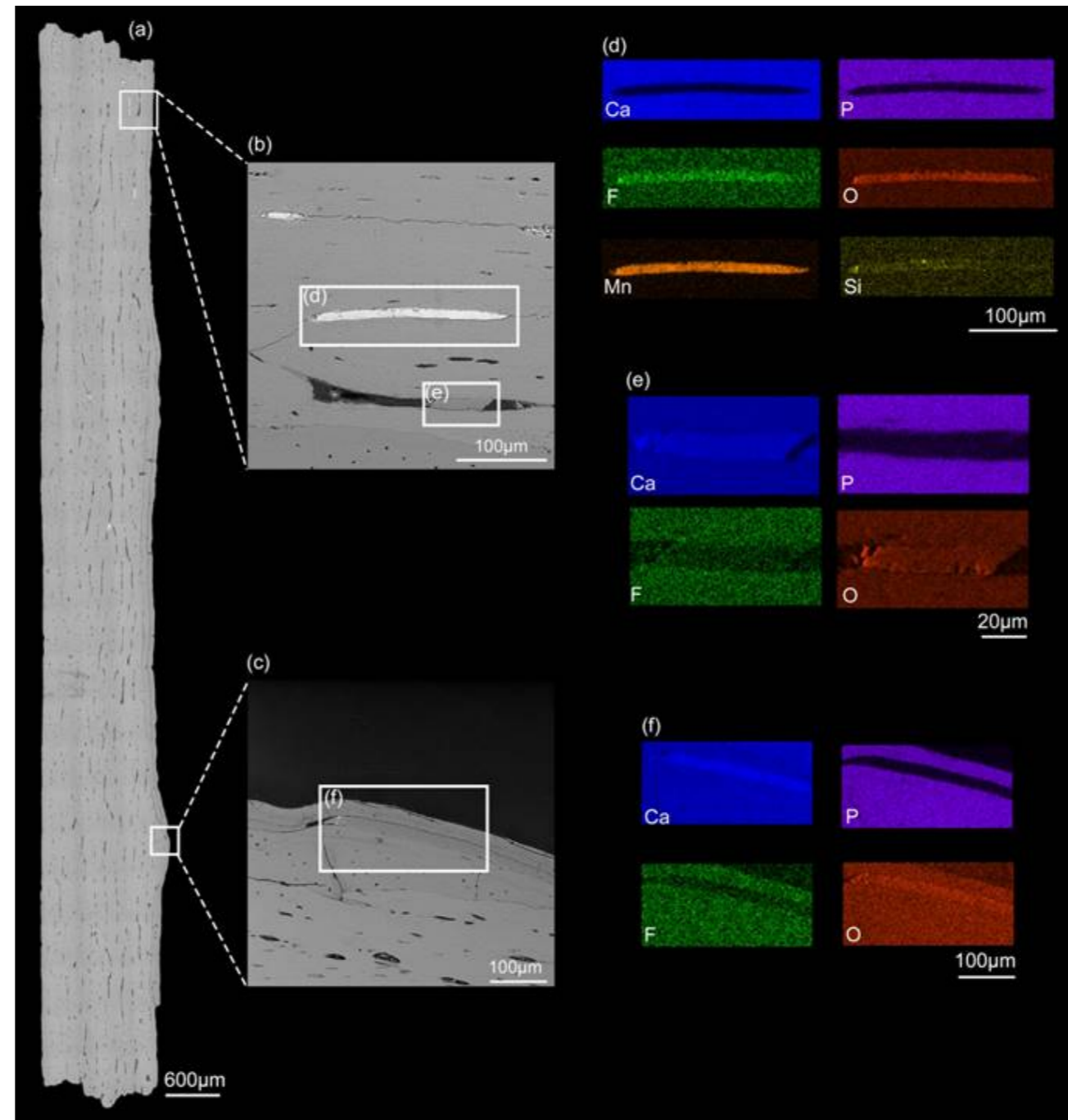


图2 骨组织切片SEM-EDS面扫描结果（李颖 供图）

(a) 骨组织学切片背散射模式下电镜照片；(b, d) 脉管道内填充晶体，其锰氟氧含量高，基本没有钙磷，应是锰质胶结物；(c, e, f) 脉管道内填充晶体，钙氧含量高，基本不含磷，氟含量下降，应是方解石

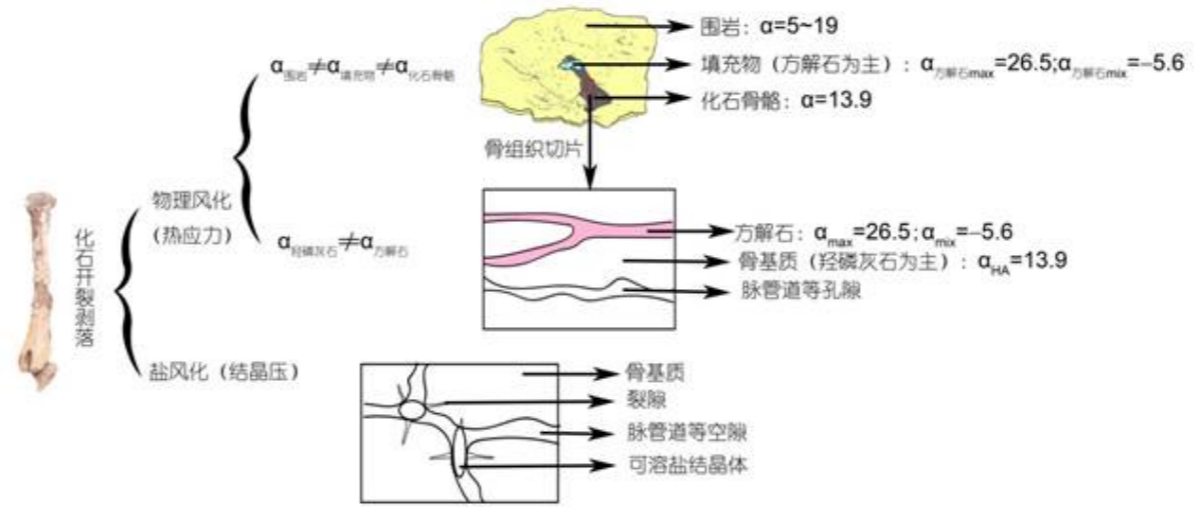


图3 骨骼化石风化机理示意图 (李颖 供图)

$\alpha$  为热膨胀系数, 单位 $10^{-6}/K$ ; HA为羟磷灰石简写; 骨骼中空填充物部分的物相组成较为复杂, 鉴于方解石占比最高 (45%以上) 且方解石的热膨胀各向异性对化石影响最大, 故而以  $\alpha$  方解石作为填充物热膨胀系数的参考

原文链接:

<http://engine.scichina.com/doi/10.1007/s11430-020-9702-8>  
(<http://engine.scichina.com/doi/10.1007/s11430-020-9702-8>)

<http://engine.scichina.com/doi/10.1360/SSTe-2020-0103>  
(<http://engine.scichina.com/doi/10.1360/SSTe-2020-0103>)



版权所有 © 中国科学院古脊椎动物与古人类研究所  
Copyright © 2018 ivpp.ac.cn All rights reserved  
文保网备案号: 110402500044  
地址: 北京市西城区西直门外大街142号 邮编: 100044