

哈密翼龙骨骼及其蛋(胚胎)化石 差异风化原因分析

韩向娜¹⁾, 赵文华¹⁾, 陈德¹⁾, 蒋顺兴^{2,3)}, 汪筱林^{2,3,4)}

1) 北京科技大学科技史与文化遗产研究院, 北京, 100083;

2) 中国科学院古脊椎动物与古人类研究所 脊椎动物演化与人类起源重点实验室, 北京, 100044;

3) 中国科学院生物演化与环境卓越创新中心, 北京, 100044;

4) 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京, 100049

内容提要:翼龙骨骼及其蛋与胚胎化石对研究翼龙生殖和胚胎发育方面具有重要意义。在哈密戈壁发现的一件超过200枚翼龙蛋、胚胎和骨骼三位一体保存的哈密翼龙化石标本从极干旱强盐碱的戈壁滩搬运至相对潮湿的环境后,就会发生明显的风化破碎,表现为由外向内逐渐蚕食性风化,富含骨骼/蛋化石的区域风暴岩快速发生崩解,造成化石脱落,不含化石的区域砂岩情况稳定。针对在同一件标本上发生差异风化的现象,本文利用PLM、XRD、MIP、IC、Raman、FTIR、SEM-EDS等多种分析方法,对出现风化的围岩与稳定区域围岩进行对比研究,探寻出现不同风化表现的原因。结果表明,风化区域围岩的黏土矿物(Ca型蒙脱石为主)含量较低,孔隙较大,孔径是稳定区域围岩的7倍以上,可溶盐含量较高,是稳定区域的约36倍,可溶盐种类以极易潮解的CaCl₂和Ca(NO₃)₂·4H₂O为主,而稳定区域围岩中可溶盐主要是NaCl和Na₂SO₄。通过模拟风化实验说明,造成化石标本出现差异风化的原因有以下两点,一是富集翼龙骨骼和蛋(胚胎)区域的风暴岩结构不均一,孔隙较大,结构疏松,内部胶结较弱;二是该化石区域中对温湿度变化敏感的易潮解钙盐含量较高,加之化石与围岩边界不均一性极大,与稳定区域围岩的致密均匀不同,在北京四季温湿度变化下更容易迅速风化。根据风化原因对此类标本的风化治理提出一些初步建议。本研究对发掘出的干旱地区特异埋藏的化石标本的保存及保护具有一定的指导意义。

关键词:哈密翼龙; 蛋与胚胎; 风化机理; 潮解盐; 新疆哈密

翼龙是地球上第一类真正飞行也是唯一绝灭的飞行脊椎动物。由于飞行的需要,翼龙演化出了纤细中空的骨骼,因此翼龙化石十分稀少,而翼龙蛋和胚胎化石更是罕见。在哈密翼龙动物群发现之前,全世界仅发现4枚二维保存的翼龙蛋(Wang Xiaolin et al., 2014; 张鑫俊等, 2017)。自2006年以来,中国科学院古脊椎动物与古人类研究所的科研人员在新疆哈密戈壁进行了大量的野外考察与抢救性发掘,发现了目前世界上保存面积最大和最富集的翼龙化石产地和首个三维立体保存的翼龙蛋与胚胎,这一翼龙化石被命名为天山哈密翼龙(*Hamipterus tianshanensis*),在翼龙的性双型,生殖等方面具有重要科学价值(Wang Xiaolin et al., 2014; Martill, 2014)。通过对一件超过200枚翼龙蛋,16枚胚胎

和骨骼化石三位一体保存的重要标本的研究(图1c),在翼龙的胚胎发育、个体发育等方面都取得重要进展(Wang Xiaolin et al., 2017; Deeming, 2017),这一以翼龙为主,包含恐龙等其他脊椎动物的化石群被称之为哈密翼龙动物群(汪筱林等, 2018)。但是这件重要的翼龙骨骼、蛋与胚胎化石标本自极干旱高盐碱的哈密戈壁抢救性采集并搬运到相对潮湿的地区(北京)后,就出现了不同程度的风化破碎,严重影响化石的研究、保存和展示。观察发现,风化破碎过程先从靠近标本外侧的一端逐渐向内部蔓延,造成围岩和蛋化石粉化、崩解以及失去支撑后的化石脱落等(图1a, b)。风化最严重的一端是富含翼龙蛋与胚胎和骨骼的风暴沉积区域,内侧不含化石的砂岩暂时未出现明显的风化。

注:本文为国家自然科学基金资助项目(编号:41572020, 41688103)、中央高校基本科研业务费项目(编号:FRF-BR-19-019A)及哈密市政府合作项目的成果。

收稿日期:2021-09-13; 改回日期:2021-11-17; 网络首发:2021-12-20; 责任编辑:刘志强。DOI: 10.16509/j.georeview.2021.12.011

作者简介:韩向娜,女,1984年生,博士,副教授,材料物理与化学专业;Email: jayna422@ustb.edu.cn。通讯作者:汪筱林,男,1963年生,研究员,博士生导师,主要从事翼龙、恐龙、恐龙蛋及其他地层学、沉积学、古环境等研究;Email: wangxiaolin@igpp.ac.cn

图1 新疆哈密翼龙骨骼和蛋(胚胎)样品照片

Fig. 1 Bones, eggs and embryos of *Hamipterus* preserved in tempestite and photos of sandstone samples

(a) 2014年3月照片,发黄部位是被树脂胶加固过;(b) 2019年12月标本状态及样品采集位置,颜色深的部位为502胶加固;
(c) 2013年10月照片,蛋和骨骼富集的风暴岩;(d) 围岩样品照片

(a) Photo in March 2014, and yellow area was consolidated by resin; (b) situation of specimen in December 2019 and sampling position, and dark area was strengthened by cyanoacrylate; (c) photo in October 2013, the tempestite where bones and eggs are concentrated; (d) photos of sandstone samples

针对极干旱高盐碱哈密地区翼龙化石及其围岩的风化问题已有少量研究(李颖等,2019,2021),认为化石骨骼风化的原因,一是在戈壁温差剧烈变化下,化石中不同物质(围岩、化石和填充物)的热膨胀系数不同造成的热应力局部集中使化石开裂剥落;二是在温湿度变化时,化石中大量 NaCl 、 Na_2SO_4 等可溶盐溶解重结晶反复作用产生的结晶压、水合压等压力对化石造成破坏(李颖等,2021)。认为围岩风化的原因是,当环境湿度变化时, NaCl 等盐胶结物溶解,可溶盐溶解重结晶时产生的巨大结晶压力,以及蒙脱石等黏土矿物吸水后体积膨胀的挤压力造成化石围岩内部结构破坏,逐渐粉化脱落,最终彻底破碎(李颖等,2019)。

为揭示这件三位一体保存的哈密翼龙骨骼、蛋与胚胎化石标本发生差异性风化的原因,本文拟通过对该标本整体的风化状况进行细致观察和分类,按照风化发生的先后顺序和风化程度划分风化区域,对不同风化区域的围岩进行采样,通过岩性分析、孔隙性质、可溶盐种类分析,和模拟风化实验验证蒙脱石和可溶盐的作用,提出发生差异风化的机

理并厘清主次因素,以期为此件及这类哈密翼龙化石标本的风化治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验样品

2013年10月的照片(图1c)可以清晰地看到翼龙蛋与骨骼化石,但到2014年3月(图1a)标本已经出现风化,部分翼龙蛋脱落,到2019年12月(图1b),该标本发生了严重的风化,围岩崩解,化石部分脱落。按化石标本从外到内的风化方向、先后顺序和风化程度,分别判定为早/易风化区域、风化区域和稳定区域(均不含化石),再根据分区对标本不同位置的围岩进行取样。样品055-1、055-2分别取自早/易风化区域和风化区域,样品055-3取自标本的未风化区域(图1b,d)。因标本风化速度过快,科研人员曾使用502胶对标本进行加固(图1b颜色较深部位),采样时尽量选取未被加固过的位置。

1.2 实验材料

NaCl (分析纯),无锡市亚泰联合化工有限公司; CaCl_2 (分析纯),北京市通广精细化工公司;

Na_2SO_4 (分析纯), 国药集团化学试剂有限公司; CaSO_4 (化学纯), 国药集团化学试剂有限公司; 石英砂(200目), 北京伊诺凯科技有限公司; 长石(200目)灵寿县泓耀矿产加工厂; 蒙脱石粉, 燕新矿产加工厂。

1.3 测试方法

1.3.1 岩性分析

偏光显微镜观察(中徕徕博北京仪器有限公司, Leica DM2700P); 将岩石样品制成薄片(35 mm×25 mm, 厚0.03 mm)后分别在单偏光及正交偏光下观察, 确定岩石的矿物组成、结构构造、蚀变及变质特征等。X射线衍射分析(XRD仪, 德国Bruker公司, D8 advance); 参照《SY/T 5163-2018 沉积岩中黏土矿物和常见非黏土矿物X射线衍射分析方法》对围岩样品的矿物组成进行定性和定量分析。测试条件: LYNXEYE_XE_T一维阵列探测器, 步长 0.02° , 停留时间0.15 s, 测角仪半径280 mm, 发散狭缝0.6 mm, 防散射狭缝5.7 mm, 电压40 kV, 电流40 mA。采用通用的定向片测试方法。

1.3.2 孔隙性质分析

依据GB/T 21650.1-200810在压汞仪(麦克默瑞提克仪器有限公司, MicroActive AutoPore V 9600)上测试样品的孔隙率和孔径分布情况。测试条件: 将样品置于20 mL无水乙醇超声处理5 min, 重复3次, 烘干(120°C , 2 h)后进行测试。

1.3.3 可溶盐分析

提取盐结晶并计算含盐量。分别称取一定量的样品加高纯水, 超声波震荡30 min, 静置24 h, 取上层清液后烘干得到样品的盐结晶, 称重后用盐结晶的质量除以原样品的质量计算得到样品含盐量百分比。将提取到的盐结晶分别进行显微观察、红外光谱分析、拉曼光谱分析和扫描电子显微镜能谱分析, 结合离子色谱分析结果鉴别得出具体的盐种类。使用仪器: 显微观察(KEYENCE VHX-6000); 红外光谱(Thermo Fisher Scientific, IS5); 拉曼光谱(HORIBA Scientific, LabRAM XploRA PLUS), 测试条件: 激光波长为785 nm; 激光功率为100%; 激光光栅为1200 gr/mm; 扫描范围是 $2000\sim 50\text{ cm}^{-1}$; 扫描3次, 每次60 s。扫描电子显微镜(TESCAN VEGA 3 XMU), 离子色谱(Thermo Fisher Scientific, ICS-600)。

1.3.4 模拟风化实验

(1)为研究黏土矿物对风化的贡献, 将石英、长石、蒙脱石粉分别与5%的NaCl、 CaCl_2 试剂均匀混

表1 黏土矿物风化实验中模拟样块的组成配比(w/w)

样品编号	样块组成成分
D1	55%石英+45%长石
D2	40%石英+30%长石+30%蒙脱石
D3	50%石英+45%长石+2.5%NaCl+2.5% CaCl_2
D4	45%石英+40%长石+2.5%NaCl+2.5% CaCl_2 +10%蒙脱石
D5	40%石英+35%长石+2.5%NaCl+2.5% CaCl_2 +20%蒙脱石
D6	35%石英+30%长石+2.5%NaCl+2.5% CaCl_2 +30%蒙脱石

表2 盐风化实验中模拟样块的组成配比(w/w)

样块编号	样块组成成分
1	100% 055-1(无盐)
2	100% 055-2(无盐)
3	100% 055-3(无盐)
4	95% 055-3(无盐)+5%NaCl
5	95% 055-3(无盐)+5% CaCl_2
6	95% 055-3(无盐)+5% Na_2SO_4
7	95% 055-3(无盐)+5% CaSO_4
8	95% 055-3(无盐)+2.5%NaCl+2.5% CaCl_2
9	95% 055-3(无盐)+2.5% Na_2SO_4 +2.5% CaSO_4
10	95% 055-3(无盐)+1.25%NaCl+1.25% CaCl_2 +1.25% Na_2SO_4 +1.25% CaSO_4

合, 使用压力机(SampTech AP-40T)压片制成模拟围岩样块(表1), 将样块放入环境试验箱(ESPEC SH-222)内, 定期观察样块的变化情况。环境试验箱条件设置: 步骤1: 15°C , 55% RH; 步骤2: 45°C , 95% RH。每个步骤持续4 h, 一个循环周期为8 h。

(2)为验证不同种类的可溶盐在风化中所起的作用, 将提取完上层清液的哈密围岩(055-3)烘干后研成粉末, 作为脱盐样品待用。将脱盐样品分别与5%的可溶盐(NaCl、 CaCl_2 、 Na_2SO_4 和 CaSO_4)均匀混合, 使用压力机压片制备模拟样块(表2), 置于环境试验箱内进行老化实验。条件设置同模拟风化实验(1)。

2 结果与讨论

2.1 岩性分析

分别对3个样品的薄片进行偏光显微镜观察并鉴定矿物种类, 同时结合XRD分析结果确定样品的矿物成分及含量。

3个样品在单偏光和正交偏光下(图2), 结合岩石样品, 可知, 样品号055-1、055-2属灰白色石

图2 新疆哈密3个砂岩样品在正交偏光和单偏光(100倍)下的照片

Fig. 2 Photos of three Hami sandstone samples under orthogonal and single polarization (100×)

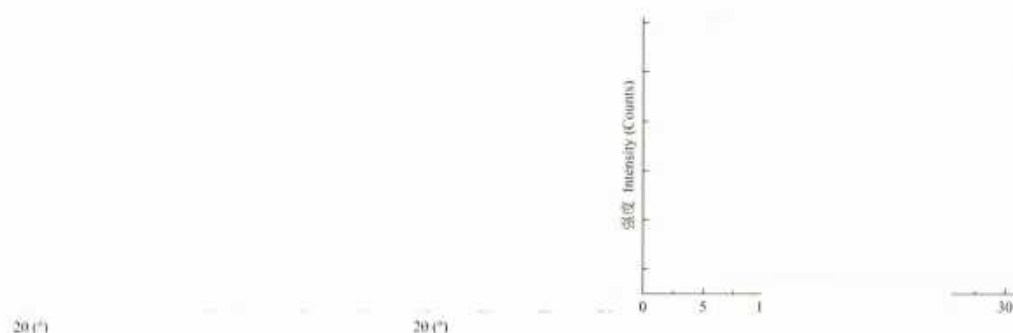


图3 新疆哈密样品号055-1(a)、055-2(b)、055-3(c)的X射线衍射图谱

Fig. 3 X-ray diffraction patterns of 055-1 (a), 055-2 (b) and 055-3 (c)

英质岩屑砂岩,样品号055-3为灰白色含长石细粒石英砂岩。3个样品都以浅色矿物石英、长石为主,含有岩屑和少量暗色矿物,孔隙发育,未见或少见胶结物。3个样品中都含有黏土矿物(单偏光下为淡黄色,正交偏光下为无色),样品号055-3含量较多。

样品号055-1、055-2、055-3的XRD谱图如图3所示,XRD半定量分析及样品中黏土矿物的相对含量见表3。3个样品都以石英、长石和黏土矿物

为主,样品号055-1含有少量的方解石和方沸石,样品号055-2含有少量的方解石和赤铁矿;样品号055-1、055-2、055-3中黏土矿物的含量分别为17%、20%、24%,以蒙脱石为主。稳定区域的黏土矿物含量大于风化区域,即黏土矿物含量高的区域保存状态反而较好,因此可判断蒙脱石含量与标本的风化程度相反。

样品号055-1、055-2、055-3中,蒙脱石分别占总

表3 新疆哈密3个岩石样品的XRD半定量分析结果(%)

Table 3 XRD semi quantitative analysis results of three sandstone samples(%)

样品名称	样品位置	石英	斜长石	微斜长石	方解石	方沸石	赤铁矿	黏土矿物		
								蒙脱石	伊利石	绿泥石
055-1	早/易风化区域	43	29	7	3	1	-	16.3	0.5	0.2
055-2	风化区域	48	19	9	3	-	1	19	0.6	0.4
055-3	稳定区域	45	21	10	-	-	-	23.3	0.5	0.2

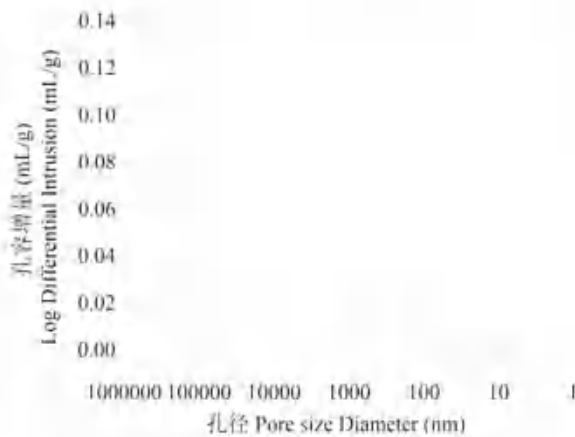


图 4 新疆哈密 3 个样品的孔径分布图
Fig. 4 Pore size distribution of three Hami sandstone samples

黏土矿物总量的 96%、95%、97%，定向片自然风干处理后 (N)， $d_{001} = 1.52 \text{ nm}$ ，经甘油饱和处理后 (E)， d_{001} 膨胀到 1.7 nm ，经 450°C 加热处理后 (T)， d_{001} 收缩到 0.96 nm ，显示出 Ca 型蒙脱石的特征。有报道对哈密化石围岩风化研究(李颖等, 2019)认为蒙脱石吸水膨胀,失水收缩反复循环过程产生的应力导致围岩结构破坏。但在翼龙蛋(胚胎)化石标本中,蒙脱石含量是与风化表现相反的,稳定区域含有更多的蒙脱石,因此蒙脱石在哈密化石围岩风化过程中所起的作用还需要再讨论。

2.2 孔隙性质

样品号 055-1、055-2、055-3 的孔隙率和孔径分布结果如图 4 所示

样品号 055-1、055-2、055-3 的孔隙率分别为 20.9499%、22.3285%、24.6684%，逐渐递增,孔径主要分布范围分别为 $6.0 \sim 60.2 \mu\text{m}$ 、 $0.67 \sim 11.3 \mu\text{m}$ 、 $0.43 \sim 9.0 \mu\text{m}$ ，急速变小,早/易风化区域的主孔径尺寸远远大于其他区域(7~14 倍),稳定区域的孔径最窄。结合风化表现来看,与稳定区域相比,富含翼龙蛋(胚胎)、骨骼的风暴岩结构不均一,有大量杂乱堆积的泥质砾屑,质地疏松,孔径较大,内聚力

表 4 新疆哈密 3 个样品的浸出液的离子色谱分析结果

Table 4 Ion chromatography analysis results of three Hami sandstone samples

样品编号	样品位置	离子相对含量(μg/L)						
		Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻
055-1	早/易风化区域	1.15	0.0584	1.32	0.228	1.64	0.192	2.86
055-2	风化区域	1.30	0.0608	2.35	0.347	2.27	0.637	4.30
055-3	稳定区域	0.485	0.0070	0.0063	0.0012	0.128	0.136	0.0137

较小,所以更容易发生风化。由此可以推断标本自身不同区域沉积岩的不均一和孔径大小是影响风化作用的重要内部因素。

表 5 新疆哈密 3 个砂岩样品提取结晶盐的能谱分析结果(%)

Table 5 EDS analysis results of salts extracted from three Hami sandstone samples (%)

	N	O	Na	Mg	S	Cl	Ca
1	-	50.1	15.3	1.5	2.0	27.7	2.5
2	10.5	49.4	-	3.1	-	13.4	23.7
3	5.9	52.7	25.1	-	14.7	1.7	-
4	8.6	52.3	-	2.9	-	17.5	18.6
5	-	47.8	3.1	-	19.2	-	29.9
6	4.8	49.2	28.0	-	16.8	1.2	-
7	-	60.4	4.0	-	16.3	-	19.3

2.3 可溶盐分析

采用离子色谱测试得出样品中可溶盐的各离子含量;通过烘干上清液计算得出样品的含盐量,使用超景深显微镜对结晶盐进行显微观察,再结合红外光谱、拉曼光谱和 SEM-EDS 鉴别出具体的可溶盐种类。

样品号 055-1、055-2 中结晶盐离子主要是 Na⁺、Ca²⁺、Cl⁻ 和 NO₃⁻,推测主要的结晶盐可能是氯化盐和硝酸盐。样品号 055-3 中的各离子含量较少,主要是 Na⁺、Cl⁻ 和 SO₄²⁻,推测主要的结晶盐可能是氯化盐和硫酸盐。样品号 055-1、055-2、055-3 的可溶盐含量分别为 0.9%、1.09%、0.03%,稳定区域可溶盐含量远低于风化区域,是后者的 1/30~1/36。

使用超景深三维视频显微镜分别观察提取到的结晶盐(图 5),可以看到样品号 055-1 和 055-2 中有块状 NaCl 晶体,055-3 中有针状 CaSO₄ 晶体。此外,还发现样品号 055-1 和 055-2 的结晶盐暴露在空气中会迅速潮解,样品号 055-3 的结晶盐无此现象,说明风化区域含有易潮解盐。

结合图 6 和表 5 结晶盐的 SEM-EDS 可知,样品号 055-1 中有明显的 NaCl 立方颗粒,大量无定形盐 Ca(NO₃)₂·4H₂O 和 CaCl₂;样品号 055-2 中有 NaCl 颗粒,片状 Na₂SO₄ 和六边形 CaSO₄,大量无定形盐 Ca(NO₃)₂·4H₂O 和 CaCl₂。样品号 055-3 中含有 NaCl、Na₂SO₄ 和棱柱状 CaSO₄。

图 7 红外光谱中 3420 cm^{-1} 归属于结晶水的伸缩振动模式, 1636 cm^{-1}

图5 新疆哈密3个砂岩样品提取出的盐结晶显微照片:(a) 055-1, 200倍;(b) 055-2, 500倍;(c) 055-3, 1000倍
 Fig. 5 Micrographs of salts extracted from three Hami sandstone samples:(a) 055-1, 200×;
 (b) 055-2, 500×; (c) 055-3, 1000×

图6 新疆哈密3个砂岩样品提取结晶盐的SEM照片
 Fig. 6 SEM photos of salts extracted from three Hami sandstone samples

是结晶水的变角振动模式; 1442 cm^{-1} 、 1434 cm^{-1} 、 1383 cm^{-1} 归属于 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 中 NO_3^- 的反对称伸缩振动模式, 1051 cm^{-1} 、 1036 cm^{-1} 处归属于 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 中 NO_3^- 的对称伸缩振动模式, 817 cm^{-1} 处归属于 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 中 NO_3^- 的面外弯曲振动模式, 751 cm^{-1} 处归属于 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 中 NO_3^- 的面内弯曲振动模式。 1115 cm^{-1} 归属于 Na_2SO_4 的对称伸缩振动模式, 618 cm^{-1} 处归属于 Na_2SO_4 的不对称变角振动模式, 468 cm^{-1} 处归属于

Na_2SO_4 的对称变角振动模式(翁诗甫等, 2016)。据此可判断, 样品号 055-1、055-2 中有 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 055-3 中有 Na_2SO_4 和 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 。

拉曼光谱分析结果(图8)可知, 样品号 055-1 中有 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 和 NaNO_3 , 样品号 055-2 中有硬石膏 CaSO_4 、 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 和 NaNO_3 , 样品号 055-3 中有无水 Na_2SO_4 和 NaNO_3 。拉曼峰归属如下(韩景仪等, 2016): $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 中 NO_3^- 的拉曼峰在 1052 cm^{-1} 处为对称伸缩振动, 在 742 cm^{-1} 处为面内弯曲振动; NaNO_3 中 NO_3^- 的拉曼峰在

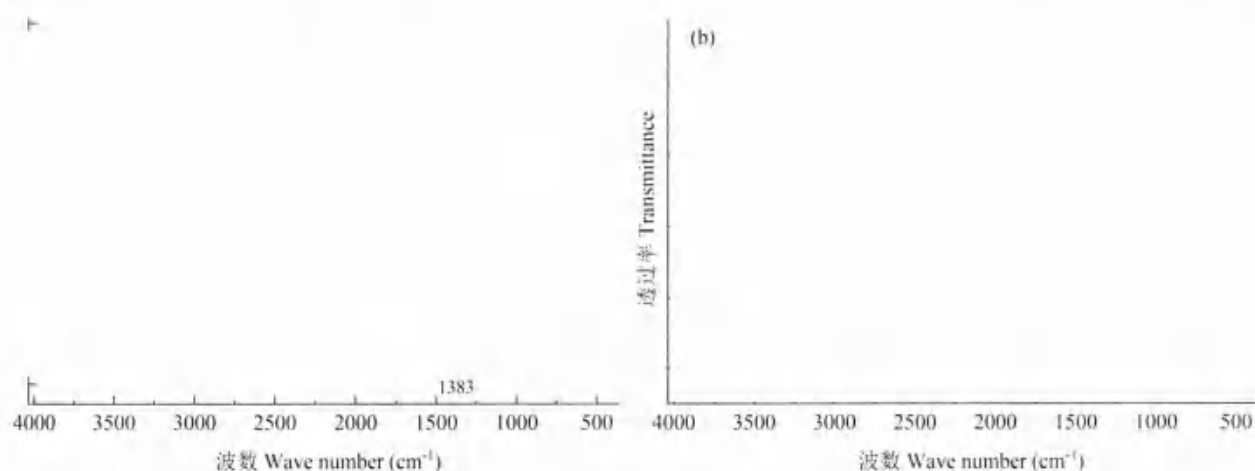


图 7 新疆哈密 3 个砂岩样品提取结晶盐的红外光谱图
Fig. 7 FTIR spectra of salts extracted from three Hami sandstone samples

1353 cm^{-1} 处为反对称伸缩振动,在 1067 cm^{-1} 处为对称伸缩振动;硬石膏 CaSO_4 中 SO_4^{2-} 的拉曼峰在 1014 cm^{-1} 为对称伸缩振动,1129 cm^{-1} 、1160 cm^{-1} 为反对称伸缩振动,在 631 cm^{-1} 处为不对称变角振动,在 427 cm^{-1} 、485 cm^{-1} 处为对称变角振动;无水 Na_2SO_4 中 SO_4^{2-} 的拉曼峰在 995 cm^{-1} 处为对称伸缩振动,在 625 cm^{-1} 、634 cm^{-1} 处为不对称变角振动。

综合离子色谱、拉曼、红外、SEM-EDS 等分析结果,早/易风化区域的可溶盐含量远大于稳定区域,约是后者的 36 倍,早/易风化区域(样品号 055-1)含有 NaCl 、 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、 CaCl_2 和少量 NaNO_3 ; 风化区域(样品号 055-2)含有 NaCl 、 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、 CaCl_2 和少量 CaSO_4 、 Na_2SO_4 、 NaNO_3 。稳定区域(样品号 055-3)含有 NaCl 、 Na_2SO_4 和少量 CaSO_4 、 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、 NaNO_3 。

2.4 蒙脱石和可溶盐对风化贡献的讨论

在这件珍稀的翼龙骨骼、蛋与胚胎三位一体保存标本围岩中,不同风化区域的黏土矿物(主要是

Ca 型蒙脱石)含量有明显差异,早/易风化区域中蒙脱石含量最少,稳定区域中最多。甘肃炳灵寺、麦积山、北山石窟寺风化机理研究中发现高含量的蒙脱石遇水膨胀是石造像风化的主要根源,风化最严重的窟龕能直接淋到雨水或者存在严重渗水(李最雄等,1985)。李黎等在龙游石窟砂岩泥质胶结物研究中发现该砂岩中蒙脱石含量较高,认为 Ca 型蒙脱石是 Na 型蒙脱石通过离子交换转变而来,龙游石窟砂岩劣化与蒙脱石频繁吸水膨胀失水收缩有关(李黎等,2005;李黎等,2008)。本研究中发现哈密翼龙化石围岩泡水会崩解,与炳灵寺和龙游石窟报道的高蒙脱石岩样遇水泡散现象一致。这件翼龙骨骼和蛋(胚胎)化石标本中的可溶盐,主要为氯盐和硫酸盐,这两类盐是造成土遗址(吕功煊等,2015;靳治良等,2016)、石窟寺(屈建军等,1995;严绍军等,2013)和壁画(靳治良等,2015;胡红岩等,2016)盐害损毁的主力军,通过结晶压力(Benavente et al., 1999; Oude Essink, 2001;

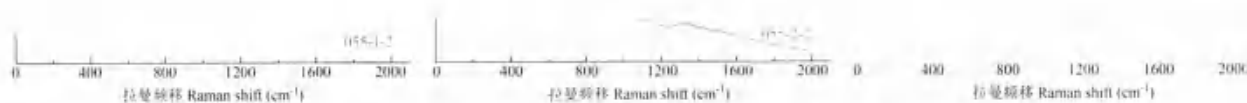


图 8 新疆哈密 3 个砂岩样品结晶盐的拉曼图谱
Fig. 8 Raman spectra of salts from three Hami sandstone samples

Matsukura et al., 2004; Steiger et al., 2007; Espinosa et al., 2008; 靳治良等, 2017)、水合压力 (Steiger, 2005) 以及盐与基质发生离子交换引起的化学变化 (Gondie et al., 1997) 等, 对不可移动文物造成较大破坏。前人推测蒙脱石和可溶盐是哈密翼龙化石围岩风化的重要原因 (李颖等, 2019)。但是蒙脱石和可溶盐到底谁是主因, 分别起到什么破坏作用还需深入分析。

前人研究推测膨胀性黏土矿物蒙脱石是围岩风化的重要原因, 因为蒙脱石吸水膨胀, 失水收缩产生应力导致围岩颗粒脱落崩解 (李颖等, 2019)。但是前面的分析结果显示翼龙蛋 (胚胎) 化石标本中稳定区域的蒙脱石含量大于风化区域, 蒙脱石含量高低与风化表现相反, 从蒙脱石的角度似乎不能很好地解释翼龙蛋 (胚胎) 化石的真实风化现象, 说明主要的风化机理可能另有原因。推测 NaCl 的溶解—重结晶的结晶压, 和 Na_2SO_4 变成 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 的水合压是造成围岩风化的原因, 但在这件翼龙蛋 (胚胎) 标本中 NaCl 和 Na_2SO_4 所在区域是最稳定的未风化区, 说明 NaCl 和 Na_2SO_4 不是造成标本风化的主要原因。化石标本从野外采集搬运存放到北京室内后, 经历北京四季环境温湿度的变化, 期间可溶盐的作用机制是潮解—干燥, 在该过程中发生结晶压和水合压破坏, 因此研究盐的潮解活动才是解开这件翼龙蛋 (胚胎) 标本发生差异风化的钥匙。结合水盐体系相图可知 (Database: saltwiki, 2021) 标本中具有潮解吸湿性的可溶盐有 NaCl, NaNO_3 , CaCl_2 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 和 Na_2SO_4 , 这 5 种盐在不同温度下的饱和相对湿度如表 6 所示。潮解/干燥活动能力排序为: $\text{CaCl}_2 > \text{Ca}(\text{NO}_3)_2 > \text{NaCl} > \text{NaNO}_3 > \text{Na}_2\text{SO}_4$ 。

以 2018 年北京气候记录为例, 全年最高湿度为 68% (8 月温度 30℃), 最低湿度为 38% (3 月温度 10℃), 湿度变化范围是 38%—68% (Web: weather,

2018), 据此推测标本存放在库房的数年间湿度的变化, 应至少包含了 CaCl_2 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 等易潮解盐的湿度范围。早/易风化区域和风化区域中主要可溶盐类型恰好是 CaCl_2 和 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 等极易潮解盐, 含盐量分别是 0.9% 和 1.09%。此外, 早/易风化区域的孔隙孔径远大于稳定区域, 是后者的 7~14 倍, 结构疏松、内部结合力差, 有利于盐结晶的生长。稳定区域不易风化的原因首先是含盐量是早/易风化区域的 1/36, 其次主要盐种类是难潮解盐 NaCl 和 Na_2SO_4 。因此初步推论: 含化石的围岩中易潮解的钙盐含量较高, 加之化石与围岩边界不均一性极大, 结构疏松, 与稳定区域围岩的致密均匀不同, 在北京四季温湿度变化下更容易迅速风化。

2.5 模拟实验及其结果讨论

为验证上述推测设计了两个模拟风化实验, 分别观察蒙脱石和可溶盐在温湿度 (15℃/55% RH ~ 45℃/95% RH) 循环变化下的风化表现, 评估蒙脱石和盐种类对风化的破坏程度。实验前后模拟样块的宏观形貌变化如图 9、图 10 所示。D1 样块为不含蒙脱石、不含盐样块, D2 样块为 30% 蒙脱石, 不含盐样块, 由图 9 可知, 21 次循环后 D1、D2 均无风化现象, 表明在温湿度循环变化的条件下无论蒙脱石含量多少, 不含盐的样块不会产生风化现象。D3~D6 样块为 5% 的潮解盐与不同含量蒙脱石的混合样块, D3、D4 样块呈严重吸湿状态, D5、D6 样块吸湿程度轻并开裂, D6 样块开裂更严重。表明在温湿度变化过程中, 高潮解盐含量的样块中, 蒙脱石含量越高, 样块风化越严重, 但其中蒙脱石和复盐的协同作用机理尚不清楚。1~3 号为不加盐样块, 由图 10 可知, 60 次循环后无风化现象, 表明温湿度变化对无盐样块没有影响; 4~10 号为添加 5% 不同盐分的样块, 2 次循环后就都产生不同程度的风化, 表明温湿度变化会造成高含盐量围岩快速风化; 4、5 号为添加 5% NaCl、 CaCl_2 的样块, 2 次循环后 4 号样块产生崩解, 5 号样块有吸潮现象但无崩解, 结合氯盐的潮解相对湿度可知, 在 55%~95% RH 湿度范围内, 包含了 NaCl 的潮解相对湿度, 高于 CaCl_2 的潮解相对湿度, NaCl 一直处于潮解—干燥循环状态, 因此 4 号崩解严重; CaCl_2 一直处于吸湿潮解状态, 无结晶应力, 所以 5 号无崩解。因硝酸盐属于危化品, 未进行 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 和 NaNO_3 的测试。但由 4 号样块中弱潮解性 NaCl 的快速崩解现象可以推测强潮解盐 CaCl_2 和 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 将会起到更强烈的破坏作用。6、7 为添加 5% Na_2SO_4 、 CaSO_4 的样

表 6 具有吸湿性的潮解盐在不同温度下的潮解相对湿度 (%RH; 据 Arnold et al., 1991)

Table 6 Deliquescence humidity of hygroscopic salts at various temperatures (%RH; Arnold et al., 1991)

温度/相对湿度/盐分	0℃	10℃	20℃	30℃	40℃	50℃
$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	41	39.4	30.8	22.4	18.4	16.3
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	59	56.5	53.6	46.8	35.5	21.3
NaCl	75.5	75.7	75.5	75.1	75.2	74.8
NaNO_3	80.1	77.5	75.4	73.1	70.4	68.0
$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	84.4	85.6	93.6	87.9	87.9	88.4

图 9 风化实验(1)中模拟样块的宏观变化

Fig. 9 Phenomenon changes of simulated samples in temperature and humidity cycle weathering experiment (1)



6

图 10 风化实验(2)中模拟样块的宏观变化

Fig. 10 Phenomenon changes of simulated samples in temperature and humidity cycle weathering experiment (2)

块,2次循环后6号样块崩解严重,原理和4号样品类似,湿度循环条件在 Na_2SO_4 的吸湿—干燥范围内;7号样块崩解程度较6号轻,表明在哈密化石围岩中, Na_2SO_4 的破坏作用强于 CaSO_4 。8,9,10为添加复合盐的样块,2次循环后均有风化表现,但同添加单盐的样块4,6号相比,添加复盐的样块8,10号风化程度较轻。说明在相同条件下,复合盐对哈密化石围岩的破坏作用小于单盐的破坏作用。根据这2个模拟风化实验结果可以推论,在北京四季温湿度变化下,蒙脱石自身不会造成围岩风化,可溶盐是翼龙蛋(胚胎)化石围岩快速风化的主因,蒙脱石和盐协同作用下会加速风化,对温湿度变化敏感的易潮解盐 CaCl_2 和 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 等起到主要破坏作用。

3 结论与建议

哈密翼龙动物群是近年来发现的重要的白垩纪化石生物群,具有重要的科学研究价值,但其风化问题极为突出,尤其是在戈壁大漠采集的标本搬运到北京等相对潮湿的新环境后,容易发生被称为“化石癌症”的严重的蚕食性风化,逐渐造成化石标本的致命损毁。通过对这件三位一体保存的翼龙骨骼、蛋和胚胎化石标本发生差异风化原因的初步研究,得出如下两点结论:

(1) 与富含化石的风暴岩结构和孔隙度有关。风暴岩结构不均一,孔隙度大,结构疏松,内部胶结较弱,是导致化石区域围岩强烈风化的主要内部原因之一。

(2) 可溶盐是翼龙骨骼、蛋与胚胎化石围岩快速风化的主因,蒙脱石和盐协同作用下会加速风化,对温湿度变化敏感的易潮解盐 CaCl_2 和 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 等起到主要破坏作用。富集骨骼、蛋的围岩中易潮解的钙盐含量较高,加之化石与围岩边界不均一性极大,结构疏松,与稳定区域围岩的致密均匀不同,在北京四季温湿度变化下更容易迅速风化。

根据以上研究结果,借鉴文物领域可移动文物防盐风化的防治措施,对这件翼龙骨骼及其蛋(胚胎)化石标本的风化治理提出一些初步建议:从外界环境因素——温湿度的角度考虑,控制存放地室内温湿度,尽可能保持恒定环境,避开标本中潮解盐 $\text{CaCl}_2/\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 的潮解范围。从内部主影响因素——可溶盐的角度考虑,对标本进行脱盐处理;或将易潮解盐转化为难潮解盐/难溶盐,留在围岩内部。从化石先天内因——结构疏松的角度,可

以通过适时地化学试剂加固,填充孔隙,增加强度,以抵抗潮解盐活动带来的应力破坏。本研究对发掘出的干旱地区特异埋藏的化石标本的保存及保护具有一定的指导意义。

致谢:感谢中国科学院古脊椎动物与古人类研究所周红娇、向龙、李阳在野外考察与样品采集中提供的大力协助;感谢上海大学文物保护基础科学研究院黄晓教授、罗宏杰教授在数据讨论中给予的建设性意见;感谢审稿专家对本文提出的有益的修改建议。

参 考 文 献 / References

- (The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)
- 韩景仪, 郭立鹤, 陈伟士. 2016. 矿物拉曼光谱图集. 北京: 地质出版社: 72~74.
- 胡红岩, 陈港泉, 钱玲, 容波, 靳治良, 周铁, 苏伯民, 吕功煊. 2016. NaCl 盐的结晶形态及在莫高窟壁画收缩病害中的作用. 自然杂志, 38(1): 39~44.
- 靳治良, 陈港泉, 夏寅, 苏伯民, 周铁, 吕功煊. 2015. 硫酸盐与氯化物对壁画的破坏性对比研究——硫酸钠超强的穿透、迁移及结晶破坏力证据. 文物保护与考古科学, 27(1): 29~38.
- 靳治良, 陈港泉, 夏寅, 胡红岩, 容波, 夏娜娜, 张尚欣, 苏伯民, 周铁, 吕功煊. 2016. 土质文物盐害中硫酸钠的研究——从微观到宏观. 文物保护与考古科学, 28(1): 54~62.
- 靳治良, 刘瑞瑞, 张永科, 陈港泉, 夏寅, 苏伯民, 周铁, 吕功煊, 罗宏杰. 2017. 盐分在文物本体中的迁移及降解机理. 文物保护与考古科学, 29(5): 102~116.
- 李黎, 谷本亲伯. 2005. 龙游石原砂岩的水稳定性研究. 文物保护与考古科学, 17(4): 28~33.
- 李黎, 王惠敏, 谷本亲伯. 2008. 龙游石原砂岩风化特征研究. 岩石力学与工程学报, (6): 1217~1222.
- 李强, 罗武干, 杨益民, 江筱林. 2019. 天山哈密翼龙化石围岩风化机理初步分析. 古生物学报, 58(4): 515~525.
- 李强, 罗武干, 杨益民, 蒋顺兴, 江筱林. 2021. 新疆哈密翼龙化石围岩风化机理初步研究. 中国科学: 地球科学, 51(3): 398~410.
- 李殿雄. 1985. 胡乐寺、麦积山和庆阳北石窟寺石窟风化研究. 文博, (3): 66~75.
- 吕功煊, 张尚欣, 钱玲, 夏寅, 胡红岩, 容波, 周铁. 2015. 秦始皇帝陵土遗址可溶盐特征与脱盐试探. 自然杂志, 37(5): 341~347.
- 屈建军, 张明泉, 张伟民, 王远洋, 戴佩华, 张虎元, 曹正中. 1995. 敦煌莫高窟岩体盐渍风化过程的初步研究. 地理科学, (2): 182~187.
- 江筱林, 蒋顺兴, 程心. 2018. 哈密翼龙及其30胚胎化石研究. 科技导报, 36(23): 11~19.
- 翁诗甫, 徐拾庄. 2016. 傅里叶变换红外光谱分析. 第3版. 北京: 化学工业出版社: 419~446.
- 严绍军, 方云, 刘俊红, 谭松琳. 2013. 可溶盐对云冈石窟砂岩劣化试验及模型建立. 岩石力学, 34(12): 3410~3416.
- 张鑫俊, 蒋顺兴, 江筱林. 2017. 翼龙蛋与胚胎化石的发现及研究进展. 自然杂志, 2017, 39(03): 157~165.
- Arnold A, Zemanek K. 1991. Monitoring wall paintings affected by soluble salts. The Conservation of Wall Paintings, 1: 103~135.
- Benavente D, Garcia Del Cura M A, Fort B, Ochoa S. 1999.

- Thermodynamic modelling of changes induced by SALT pressure crystallization in porous media of stone. *Journal of Crystal Growth*, 204(1-2): 168-178.
- Database: Saltwiki. 2021. A database of water-salt system phase diagram. <https://www.saltwiki.net/index.php/Home>
- Deeming D C. 2017. How pterosaurs bred. *Science*, American Association for the Advancement of Science, 358(6367): 1124-1125.
- Espínosa R M, Franke L, Deckelmann G. 2008. Model for the mechanical stress due to the salt crystallization in porous materials. *Construction and Building Materials*, 22(7): 1350-1367.
- Goadie A S, Viles H A, Parker A G. 1997. Monitoring of rapid salt weathering in the central Namib Desert using limestone blocks. *Journal of Arid Environments*, 37(4): 581-598.
- Han Jingyi, Guo Libe, Chen Weishi, 2016#. *Atlas of Raman Spectra of Minerals*. Beijing: Geology Press: 72-74.
- Hu Hongyan, Chen Gangquan, Qian Ling, Rong Bo, Jin Zhiliang, Zhou Tie, Su Bomín, Lv Gongxuan. 2016#. NaCl crystal and its roles on the blister damage at the wall-painting of Mogao Grottoes. *Chinese Journal of Nature*, 38(1): 39-44.
- Jin Zhiliang, Chen Gangquan, Xia Yin, Su Bomín, Zhou Tie, Lv Gongxuan. 2015#. Comparative study of salt damage caused by sulfates and chlorides to mural paintings—evidence of superpenetration, migration and crystallization destruction resulting from sodium sulfate. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 27(1): 29-38.
- Jin Zhiliang, Chen Gangquan, Xia Yin, Hu Hongyan, Rong Bo, Xia Yana, Zhang Shangxin, Su Bomín, Zhou Tie, Lü Gongxuan. 2016#. Sodium sulfate behind earthen relics salt damages from micro to macro. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 28(1): 54-62.
- Li Li, Tamimoto Chikaosa. 2005#. Study of the water-stabilization of the sandstone of the Lanyou grottoes. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 17(4): 28-33.
- Li Li, Wang Sijing, Tamimoto Chikaosa. 2008#. Study of weathering characteristics of sandstone at Longyou Grottoes. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 16): 1217-1222.
- Li Ying, Luo Wugan, Yang Yimin, Wang Xiaolin. 2019#. The weathering mechanism of surrounding rocks in Hamipterussil. *Acta Palaeontologica Sinica*, 58(4): 515-525.
- Li Ying, Luo Wugan, Yang Yimin, Jiang Shunxing, Wang Xiaolin. 2021#. A preliminary study of the weathering mechanism of fossilized cretaceous Hamipterus bones. *Science China Earth Science*, 51(3): 398-410.
- Li Zuixiong. 1985#. Study on cave weathering in Bingling Temple Maji Mountain and Qingyang North Grottoes Temple. *Relics and Museology*, (3): 66-75.
- Jin Zhiliang, Liu Dianduan, Zhang Yongke, Chen Gangquan, Xia Yin, Su Bomín, Zhou Tie, Lü Gongxuan. 2017#. Salt migrations and damage mechanism in cultural heritage objects. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 29(5): 102-116.
- Lü Gongxuan, Zhang Shangxin, Qian Ling, Xia Yin, Hu Hongyan, Rong Bo, Zhou Tie. 2015#. The characteristics of the main dissolved salt and the desalination experiments in Terra-Cotta Warriors and Horses of Emperor Qin Shihuang Mausoleum Site. *Chinese Journal of Nature*, 37(5): 341-347.
- Martill D. 2014. Palaeontology: Which came first, the pterosaur or the egg? *Current Biology* = CB, 24(13): R615-R617.
- Matsukura Y, Ogoji C T, Kuohitsu N. 2004. Salt damage to brick kiln walls in Japan: spatial and seasonal variation of efflorescence and moisture content. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 63(2): 167-176.
- Oude Essink G H P. 2001. Salt water intrusion in a three-dimensional groundwater system in the Netherlands: A numerical study. *Transport in Porous Media*, 43(1): 137-158.
- Qu Jianjun, Zhang Mingquan, Zhang Weimin, Wang Yuanping, Dai Fengman, Zhang Huyuan, Zeng Zhengzhong. 1995#. A preliminary study on weathering process of salt in rock body at Mogao Grottoes, Dunhuang. *Scientia Geographica Sinica*, (2): 182-187.
- Steiger M, Siegesmund S. 2007. Special issue on salt decay. *Environmental Geology*, 52(2): 185-186.
- Steiger M. 2005. Crystal growth in porous materials—I: The crystallization pressure of large crystals. *Journal of Crystal Growth*: 282(3): 455-469.
- Web: Weather. 2018. Monthly average temperature and humidity data of Beijing in 2018. <http://www.weather.com.cn/forecast/history.shtml?areaid=101010100&month=11>
- Wang Xiaolin, Kellner A W A, Jiang Shunxing, Wang Qiang, Ma Yingxia, Yahetujiang Paidoula, Cheng Xin, Taissa Rodrigues, Meng Xi, Zhang Jiali, Li Ning, Zhou Zhonghe. 2014. Sexually dimorphic tridimensionally preserved pterosaurs and their eggs from China. *Current Biology*, 24(12): 1323-1330.
- Wang Xiaolin, Kellner A W A, Jiang Shunxing, Cheng Xin, Wang Qiang, Ma Yingxia, Yahetujiang Paidoula, Rodrigues T, Chen He, Sayao J M, Li Ning, Zhang Jiali, Banim R A M, Meng Xi, Zhang Xinjun, Qiu Rui, Zhou Zhonghe. 2017. Egg accumulator with 3D embryos provides insight into the life history of a pterosaur. *Science*, 358(6367): 1197-1201.
- Wang Xiaolin, Jiang Shunxing, Cheng Xin. 2018#. Study on *Hamipterus* and their 3D embryos. *Science & Technology Review*, 36(23): 11-19.
- Weng Shifu, Xu Yizhuang. 2016. *Fourier Transform Infrared Spectroscopy*. 3rd Edition#. Beijing: Chemical Industry Press: 419-446.
- Yan Shaojun, Fang Yun, Liu Junhong, Tan Song. 2013#. Deterioration experiment with soluble salt on sandstone of Yanggao grottoes and its model creation. *Rock and Soil Mechanics*, 34(12): 3410-3416.
- Zhang Xinjun, Jiang Shunxing, Wang Xiaolin. 2017#. Recent discoveries and research progress on pterosaur eggs and embryos. *Chinese Journal of Nature*, 39(3): 157-165.

Acknowledgements: This study was jointly funded by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41572020 and 41688103), Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. FRF-BR-19-019A) Cooperation project of Hami Municipal Government

First author: HAN Xiangna, female, born in 1984, University of Science and Technology Beijing; Email: jayna422@ustb.edu.cn

Corresponding author: WANG Xiaolin, male, born in 1963, Institute of Vertebrate Paleontology and Paleoanthropology, Chinese Academy of Sciences; Email: wangxiaolin@ivpp.ac.cn

Study on the unusual weathering of the bones and eggs accumulation with embryos fossils of *Hamipterus tianshanensis*

HAN Xiangna¹⁾, ZHAO Wenhua¹⁾, CHEN Cong¹⁾, JIANG Shunxing^{2,3)}, WANG Xiaolin^{2,3,4)}

1) Institute for Cultural Heritage and History of Science & Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing, 100083;

2) Key Laboratory of Vertebrate Evolution and Human Origins of Chinese Academy of Sciences, Institute of Vertebrate Paleontology and Paleoanthropology, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100044;

3) CAS Center for Excellence in Life and Palaeoenvironment, Beijing, 100044;

4) College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049

Objectives: The skeletons, eggs and embryos are of great importance in the study of pterosaur reproduction and embryonic development. One specimen with more than 200 pterosaur eggs, embryos and skeletons was found in the Hami Gobi. However, after the fossils are transported from extremely arid and strong saline—alkali Gobi desert to the relatively humid environment, such as Beijing, they will undergo severe weathering and become broken gradually from the outside to the inside. The tempestite (surrounding rock) rich in bones and eggs, is prone to disintegration and pulverization, causing precious fossil to fall off due to lack of support from surrounding rock, while tempestite without fossil is stable. In order to understand this unusual weathering phenomenon on the same fossil specimen, the surrounding rocks with weathered fossils of bones and eggs (embryos) were compared with no weathered surrounding rocks in this paper.

Methods: A series of analytic methods, involved polarized light microscope observation, X-ray diffraction (XRD) analysis, mercury intrusion test (MIP), ion chromatography (IC) analysis, Raman spectroscopy (Raman) analysis, Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) analysis and scanning electron microscopy (SEM-EDS) analysis.

Results: The results show that compared with the no weathered surrounding rock, the weathered surrounding rock rich of fossils, the content of clay minerals (mainly calcium montmorillonite) is lower, and the pore size is larger, which is more than 7 times that of the former, and soluble salts content is higher, which is 36 times that of the former. The soluble salts of weathered surrounding rock are mainly deliquescent CaCl_2 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ and NaCl , while the salts in the no weathered rock are mainly NaCl and Na_2SO_4 .

Conclusions: It could be speculated by simulated weathering experiments that there are two reasons for the weathering mechanism of this fossil specimen. First, the tempestite in the area enriched with pterosaur bones and eggs (embryo) are heterogenous and of large pores, with loose structure and weak internal cementation. The second is the high content of strong deliquescent calcium salts in the fossils, which are sensitive to temperature and humidity changes. In addition, different from the dense and uniform surrounding rocks in the stable area, the boundary between the fossil and the surrounding rocks is great inhomogeneity, which is more prone to rapid weathering under the frequently changing temperature and humidity in Beijing. According to the weathering causes, some suggestions on the protection treatment of this specimen were put forward. This study has a guiding significance for the preservation and conservation of special buried fossils after excavation from arid region.

Keywords: *Hamipterus tianshanensis*; eggs and embryos; weathering mechanism; deliquescent salt; Hami; Xinjiang

Manuscript received on: 2021-09-13; Accepted on: 2021-11-17; Network published on: 2021-12-20

Doi: 10. 16509/j. georeview. 2021. 12. 011

Edited by: LIU Zhiqiang