

# 埋藏哈密翼龙化石的雅丹风化的光谱分析 ——以大海道2号水源地雅丹为例

赵文华<sup>1</sup>, 韩向娜<sup>1\*</sup>, 陈 熹<sup>1</sup>, 汪筱林<sup>2, 3, 4\*</sup>

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

**摘要** 新疆哈密地区翼龙化石具有极高的科学研究价值。哈密翼龙动物群主要埋藏在早白垩世湖相地层形成的雅丹中, 富集在风暴沉积层。化石一旦暴露地表, 就会发生不同程度的自然风化破碎, 尤其是见水或受潮后风化更为严重。哈密大海道2号水源地附近的雅丹底部由于地下水和间歇性地表水的作用, 发生了严重的盐碱析出导致的强烈风化现象, 造成雅丹下部剥落侵蚀和上层雅丹重力坍塌, 从下到上不同地层的风化程度差异较大, 底部地层的风化最为剧烈。对大海道雅丹地层剖面取样, 利用多种分析方法确定每一层的岩性和可溶盐种类, 从微观上揭示雅丹风化的机理。偏光显微观察和X射线衍射(XRD)结果显示每一层都含有石英、长石、方解石和粘土矿物, 矿物组成无较大差异, 但粘土含量差别较大。精确的可溶盐种类鉴别方法, 包括离子色谱(IC)确定出样品中可溶盐离子含量及种类, 拉曼光谱(Raman)和傅里叶变换红外光谱(FTIR)鉴别出样品中的硝酸盐和硫酸盐, 扫描电子显微镜能谱仪(SEM-EDS)鉴别出氯盐、硝酸盐和硫酸盐。结果显示雅丹各风化层中最底层可溶盐主要是NaCl和Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 第二层是NaCl和CaCl<sub>2</sub>, 第三层是NaCl, 盐种类/含量的差别是此处雅丹从下到上发生不同风化现象的重要原因。结合大海道雅丹所处的气候地理环境(极干旱高盐碱地区、水源地附近), 探讨水盐活动规律并关联风化表现, 分析该处雅丹风化原因, 内因是每层沉积岩的岩性不同, 外因是水和盐(NaCl, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, CaCl<sub>2</sub>)的共同作用下, 强烈的水盐活动造成了埋藏有哈密翼龙化石的雅丹严重化学风化。这一风化机理也可很好地解释哈密翼龙化石及其围岩层受潮后的强烈风化破碎现象。

**关键词** 哈密翼龙; 雅丹; 风化机理; 可溶盐; 哈密

**中图分类号:** Q915.2 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)02-0561-07

## 引言

翼龙的化石记录在全世界范围内都较为稀少, 有关翼龙群居地和翼龙蛋的记录更为罕见。新疆哈密戈壁雅丹地区的早白垩世湖相地层中, 发现了大面积分布的三维立体保存的哈密翼龙及其蛋与胚胎, 对了解翼龙的生长、发育、繁殖行为以及翼龙生态习性等都具有重要意义<sup>[1-4]</sup>。哈密翼龙化石产地目前已然成为世界上分布面积最大和最富集的翼龙化石产地, 也是唯一一处翼龙和蛋与胚胎共生保存的地点<sup>[5-6]</sup>。

哈密翼龙化石埋藏在强烈干旱的戈壁滩雅丹地层中, 富

集在风暴沉积层。这里终年几乎无降水, 夏季地表温度接近60℃, 冬季低于-20℃, 早晚温差大<sup>[7]</sup>。经现场考察发现, 翼龙化石一旦暴露到地表就会发生不同程度的自然风化, 主要是风的物理风化作用, 将表面的骨骼打磨破碎, 仅剩中空部分的充填物。哈密雅丹的形成及其风化也主要是风的作用造成的, 但在大海道2号水源地附近的雅丹存在另外一种严重的风化现象, 由于存在地下水和地表水的溢出, 雅丹底部有大量白色盐结晶析出, 岩石酥粉、层层剥落, 上部雅丹在失去支撑后发生坍塌等[图1(a)]。在雅丹下部, 从下到上可分为三层, 各层的风化表现差异较大。因哈密翼龙化石都埋藏在类似的雅丹地层中, 强烈的风化作用将会危害到岩石内

**收稿日期:** 2021-02-07, **修订日期:** 2021-02-25

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41572020, 41688103), 中央高校基本科研业务费(FRF-BR-19-019A, FRF-MP-20-53)资助

**作者简介:** 赵文华, 1996年生, 北京科技大学科技史与文化遗产研究院硕士研究生 e-mail: 1445640927@qq.com

\* 通讯作者 e-mail: jayna422@ustb.edu.cn; wangxiaolin@ivpp.ac.cn

的化石。近两年,一些研究者对哈密翼龙化石骨骼及其围岩的风化机理进行了初步探讨<sup>[8-9]</sup>,同时开展了哈密化石及其围岩标本加固保护材料研究<sup>[10]</sup>。曾有学者通过科技手段分析了自贡地区的恐龙化石围岩的本体特征<sup>[11]</sup>,但是对埋藏有翼龙化石的哈密雅丹野外原位风化问题尚未开展研究工作。

通过野外采样和实验室多种分析技术,从相对微观的角度,对哈密大海道 2 号水源地雅丹下部严重风化现象的原因进行研究,以期探讨水分和可溶盐在不同地层中的变化导致的不同风化程度的机理,为未来哈密翼龙和恐龙等古生物化石的现场保护提供科学依据。

## 1 实验部分

### 1.1 样品

样品采自哈密大海道 2 号水源地附近雅丹下部的不同沉积层,从下到上分别对不同岩层进行取样分析。第一层砂岩来自雅丹的最底层,含水量最高,风化现象最严重,表面有大量盐析出、层状剥蚀(样品 061-1);第二层砂岩相对比较潮湿,表面多呈酥粉状(样品 061-2);第三层风暴沉积岩层,由大小不同杂乱堆积的泥质砾屑和砂质成分组成,化石主要产自这一层,由于岩石结构不均匀,风化脱落严重(061-3),见图 1(a-c)。

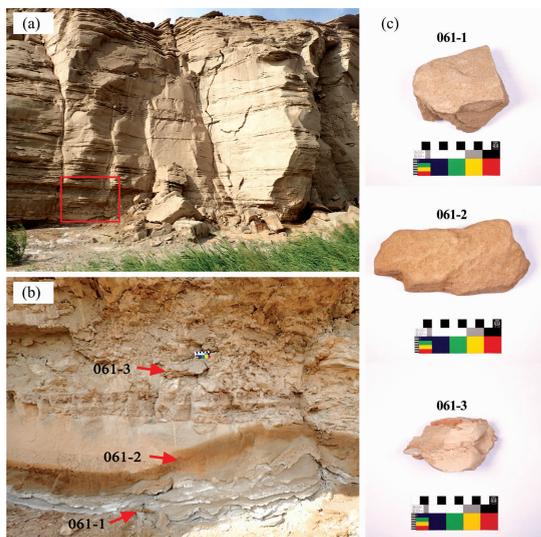


图 1 实验样品的采集位置和样品照片

(a): 大海道 2 号水源地附近雅丹底部的风化现象;

(b): 实验样品的采集位置; (c): 样品照片

Fig. 1 Sample collection position and photos of samples

(a): Weathering at the bottom of Yardang near the No. 2 water source of Dahaidao; (b): Sample collection position; (c): Photos of samples

### 1.2 仪器

偏光显微镜,中辉徕博(北京)仪器有限公司 Leica DM2700P。X 射线衍射仪,德国 Bruker(布鲁克)公司 D8 advance。压汞仪,麦克默瑞提克(上海)仪器有限公司 Micro-

Active AutoPore V 9600。离子色谱仪,赛默飞世尔科技有限公司 ICS-600。红外光谱分析仪,美国赛默飞世尔科技(Thermo Fisher Scientific)公司 IS5。拉曼成像光谱仪,法国 HORIBA Scientific 厂家 LabRAM XploRA PLUS 型。扫描电子显微镜能谱仪,泰思肯贸易(上海)有限公司 TESCAN VEGA 3 XMU。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 岩性分析

对制成的薄片(35 mm×25 mm,厚 0.03 mm)进行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。按照 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样品进行 XRD 测试,验证岩石的成分组成并得出各成分的半定量结果。测试条件: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。测试角度:自然风干定向片:2.5°~15°;甘油饱和定向片:2.5°~30°;加热(450 °C)定向片:2.5°~15°。

#### 1.3.2 孔隙性质分析

依据 GB/T 21650.1—2008 压汞法和气体吸附法测定固体材料孔径分布和孔隙度方法测试样品的孔隙率和孔径分布情况。测试条件:汞密度为 13.546 2 g·mL<sup>-1</sup>,汞与石墨接触角为 130°,低压范围为 3.789 5~206.7 kPa,高压范围为 206.7~413 400 kPa。

#### 1.3.3 可溶盐分析

提取盐结晶并计算含盐量。将提取到的盐结晶分别进行红外光谱、拉曼光谱和扫描电子显微镜能谱分析,结合离子色谱分析结果鉴别出样品中精确的盐种类。红外光谱(溴化钾压片法)测试条件:扫描次数为 16,光谱分辨率为 4 cm<sup>-1</sup>,采集时间为 32 s;拉曼光谱测试条件:激光波长为 785 nm;激光功率为 100%;激光光栅为 1 200 gr·mm<sup>-1</sup>;扫描范围是 2 000~50 cm<sup>-1</sup>;扫描 3 次,每次 60 s;离子色谱测试方法:分别称取等量的样品加高纯水至 50 mL,超声波震荡 30 min,静置 24 h,取上层清液,用孔径 0.22 μm,直径 13 mm 的水系针头式过滤器过滤,取滤液进行离子色谱测试。

## 2 结果与讨论

### 2.1 岩性分析

采用偏光显微镜分别对三个样品的薄片进行观察并鉴定出矿物种类,同时结合 XRD 分析结果确定样品的矿物成分及相对含量。

图 2 显示,样品 061-1 和 061-2 属灰白色石英质岩屑砂岩,浅色矿物以石英、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。061-3 为粉砂质砾岩,砾石为泥岩,钙质胶结,含有大量粘土矿物,石英和长石颗粒粒度较 061-1 和 061-2 小。三个样品的组成成分一致,但矿物含量有较大差异,粘土矿物(单偏光下为淡黄色,正交偏光下为无色)的含量差异最大,从图中可以看出,第三层粘土矿物含量最高,第一层粘土矿物含量最低。

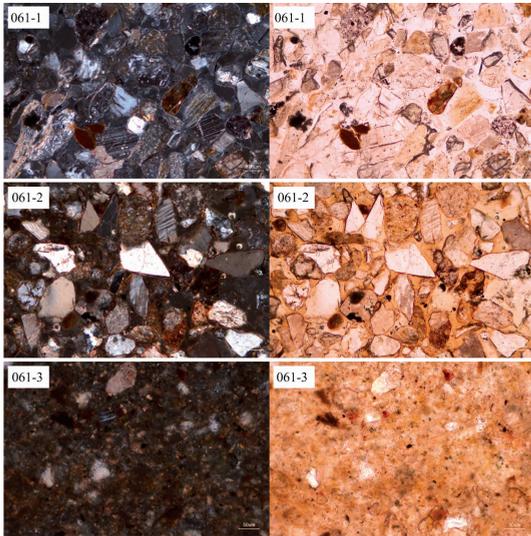


图 2 三个样品在正交偏光和单偏光下的照片  
061-1, 061-2: 100 倍; 061-3: 250 倍

Fig. 2 Photos of three samples under orthogonal polarization and single polarization  
061-1, 061-2: 100X; 061-3: 250X

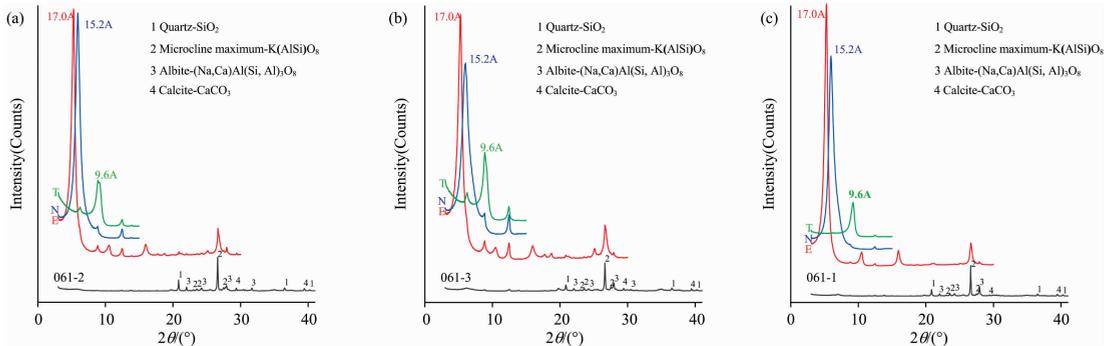


图 3 061-1(a), 061-2(b), 061-3(c) 的 X 射线衍射图谱  
Fig. 3 X-ray diffraction patterns of 061-1 (a), 061-2 (b) and 061-3 (c)

表 1 三个样品的 XRD 半定量分析结果 (%)

Table 1 XRD semi quantitative analysis results of three rock samples (%)

样品名称	样品位置	石英	斜长石	微斜长石	方解石	石膏	石盐	粘土矿物		
								蒙脱石	伊利石	绿泥石
061-1	第一层	44	29	7	3	1	—	15.6	0.2	0.2
061-2	第二层	44	18	10	6	—	3	17.6	0.8	0.6
061-3	第三层	30	21	11	5	—	—	28.7	2.3	2.0

表 2 三层风化区域样品浸出液的离子色谱分析结果 (mg · L<sup>-1</sup>)

Table 2 Ion chromatography analysis results of three samples (mg · L<sup>-1</sup>)

样品编号	样品位置	离子相对含量/(mg · L <sup>-1</sup> )						
		Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
061-1	第一层	3.12	0.036 4	0.162	0.015 4	0.608	3.26	0.231
061-2	第二层	12.88	0.144	9.16	0.854	22.92	0.164	0.632
061-3	第三层	2.64	0.029 5	0.128	0.0137	1.86	0.559	0.846

由 XRD 图谱(图 3)和半定量分析结果(表 1)可知:三个样品矿物组成无较大差异,以石英、长石和粘土矿物(杂基)为主,含有少量的方解石胶结物。图 3(a)中 061-1 中含有 1% 的石膏,图 3(b)中 061-2 中含有 3% 的石盐,这是后期盐碱化形成的二次胶结。061-1, 061-2 和 061-3 中粘土矿物总含量分别为 16%, 19% 和 33%, 粘土矿物以蒙脱石为主,图 3(c)中 061-3 含有大量粘土矿物和薄片观察一致;由 SY/T 5163—2018 可知,通过不同处理方法可以有效鉴别粘土矿物, Ca 型蒙脱石经自然风干(N)处理后,  $d_{001} = 15.2 \text{ \AA}$ , 经甘油饱和(E)处理后,  $d_{001}$  膨胀到  $17 \text{ \AA}$ , 经  $450 \text{ }^\circ\text{C}$  加热(T)处理后,  $d_{001}$  收缩到  $9.6 \text{ \AA}$ 。因此样品中的蒙脱石属于 Ca 型蒙脱石。

### 2.2 孔隙分析

061-1, 061-2 和 061-3 的孔隙率分别为 30.788 6%, 29.825 0% 和 28.9276%, 差异较小, 孔径主要分布范围分别为下层  $6.0 \sim 40.2 \text{ }\mu\text{m}$ 、中层  $3.7 \sim 45.2 \text{ }\mu\text{m}$ 、上层  $6.0 \sim 46.2 \text{ }\mu\text{m}$ , 差异不大(图 4)。三个风化区域的孔隙度和孔径分布差别不大, 表明哈密雅丹不同地层的风化表现与孔隙性质无法关联。

### 2.3 可溶盐分析

由表 2 离子色谱测试结果可知, 样品 061-1 含有  $\text{Na}^+$ ,

SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 和少量 Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup>。样品 061-2 含有大量 Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Cl<sup>-</sup> 和少量 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Mg<sup>2+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>。样品 061-3 含有 Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup> 和少量 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Ca<sup>2+</sup>。含盐量分别为 0.78%, 3.34% 和 1.23%, 第二层盐含量远远高于第一层和第三层。

品中以硫酸盐(Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)为主。

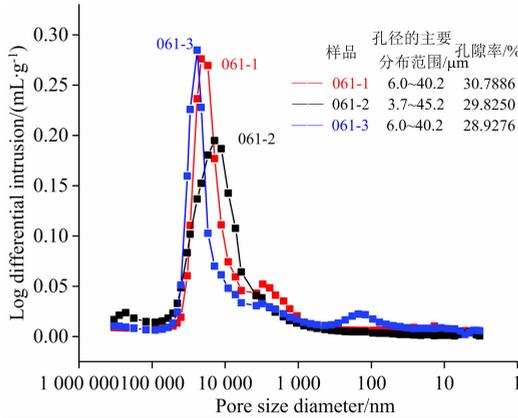


图 4 三个样品的孔径分布图

Fig. 4 Pore size distribution of three samples

由 061-1, 061-2 和 061-3 样品中结晶盐 SEM(图 5) 和 EDS(表 3) 可知, 061-1 中有 NaCl 立方颗粒、片状 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 晶体以及无定形盐 CaCl<sub>2</sub>; 061-2 中有 NaCl 和棒状 CaSO<sub>4</sub> 晶体以及无定形盐 Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> · 4H<sub>2</sub>O 和 CaCl<sub>2</sub>; 061-3 中有大量的 NaCl 颗粒和无定形盐 NaNO<sub>3</sub>。

表 3 三个样品结晶盐的 EDS 分析结果(Wt%)

Table 3 EDS analysis results of salt crystallization of three samples(Wt%)

编号	N	O	Na	Mg	S	Cl	Ca
1	—	16.9	26.2	—	1.8	55.1	—
2	—	45.9	27.9	—	26.2	—	—
3	4.1	50.4	29.5	—	16.0	—	—
4	5.5	46.0	—	0.7	—	23.0	24.8
5	5.4	47.4	—	2.6	—	24.2	20.5
6	—	51.6	4.0	—	20.6	—	23.8
7	—	3.1	33.0	—	—	63.9	—
8	15.0	50.5	28.0	—	—	6.4	—

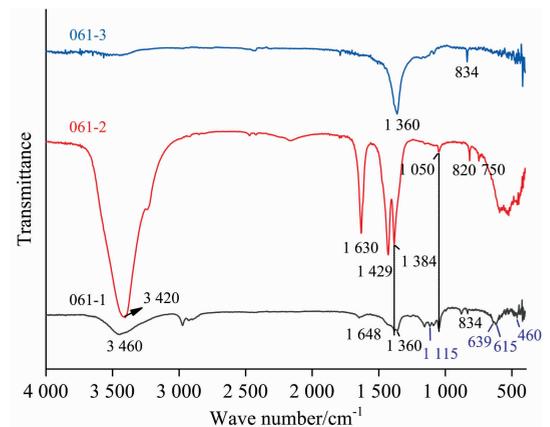


图 6 三个样品结晶盐的红外光谱

Fig. 6 FTIR spectra of salts from three samples

图 7(a-c) 分别是样品中提取的结晶盐的拉曼光谱, 与标准盐特征峰值对应情况见表 5。061-1 中有 NaNO<sub>3</sub> 和无水 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; 061-2 中有硬石膏 CaSO<sub>4</sub> 和 Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> · 4H<sub>2</sub>O; 061-3 中有 NaNO<sub>3</sub>、硬石膏 CaSO<sub>4</sub>。

结合离子色谱、SEM-EDS、红外光谱、拉曼光谱等分析可知, 061 样品中最底层地层可溶盐以 NaCl 和 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 为主, 含有少量 CaSO<sub>4</sub>, NaNO<sub>3</sub> 和 CaCl<sub>2</sub>; 第二层以 NaCl 和 CaCl<sub>2</sub> 为主, 含有少量 Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> · 4H<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 和 CaSO<sub>4</sub>; 第三层以 NaCl 为主, 含有少量 CaSO<sub>4</sub>, NaNO<sub>3</sub> 和 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>。第二层的可溶盐含量最高(3.34%)。

哈密大海道 2 号水源地附近的雅丹中间形成一细长的峡谷, 含有大量的地下水, 在不同地段地下水溢出, 形成数千米长的地表水河段, 间歇性的洪水也会补充地下水并形成地表水。在水的作用下雅丹底层发生强烈的水盐活动, 在毛细水上升的过程中, 会带动盐分进行迁移, 在表面形成白色的盐类晶体析出。不同盐分再结晶沉淀的位置决定了硅酸盐类材料的盐风化程度<sup>[12]</sup>, 由于盐溶液在硅酸盐基质(土遗址、石材)中的毛细迁移过程中, 难溶盐最先析出, 其次是中溶盐和易溶盐<sup>[13]</sup>, 而且氯盐的毛细水最大上升高度大于硫酸盐<sup>[14]</sup>。此雅丹靠近峡谷底部的三层岩石风化区域的不同盐

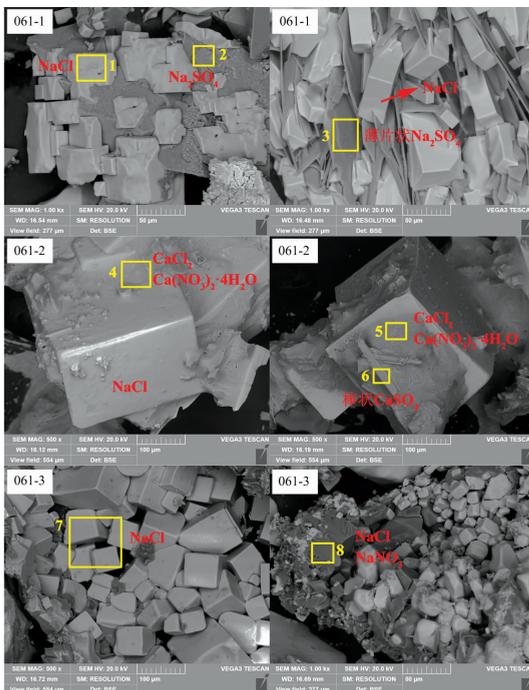


图 5 三个样品结晶盐的 SEM 照片

Fig. 5 SEM photos of salt crystallization of three samples

图 6 是样品中提取的结晶盐的红外光谱分析结果, 与标准盐特征峰对应情况见表 4。061-1 中含有 NaNO<sub>3</sub> 和无水 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; 061-2 中含有 Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> · 4H<sub>2</sub>O; 061-3 中含有 NaNO<sub>3</sub>。其中 061-1 样品中的硫酸盐特征峰更强, 表明该样

分分布符合毛细作用下盐分在硅酸盐基质中的迁移规律，遇水后易溶盐种类/含量的差别是雅丹从下到上发生不同风化表现的重要原因。最底层可溶盐以  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  为主， $\text{Na}_2\text{SO}_4$  主要导致岩石内部结构破坏，强度降低，呈层状剥落。NaCl 的迁移能力更强，分布在第二层和第三层，相比  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ，NaCl 的破坏性较小，因此第二层风化程度相对较轻。此外第二层岩石中还含有大量的极易潮解盐  $\text{CaCl}_2$ ， $\text{CaCl}_2$  不断进

行的潮解/干燥产生结晶应力，持续破坏第二层，符合该层围岩潮湿、表面酥粉的风化表现。第三层因为是风暴岩，泥岩砾石为主，充填细粒填隙物，粘土矿物(蒙脱石为主)较多，岩石结构不均匀，强度较低，易受偶发强降雨和地下水及地表水渗流及风的影响，因此第三层围岩颗粒脱落较多。上述机理也可用于解释翼龙化石及其围岩受潮风化的现象。

表 4 061 提取出结晶盐中  $\text{NO}_3^-$  与  $\text{SO}_4^{2-}$  的红外特征峰与标准盐特征峰的对应情况

Table 4 The infrared spectra of characteristic peaks of  $\text{NO}_3^-$  and  $\text{SO}_4^{2-}$  in salts were extracted by 055 corresponds to the characteristic peaks of standard salt

物质名称	反对称伸缩	对称伸缩	面外弯曲	面内弯曲	不对称变角振动	对称变角振动
标准 $\text{NaNO}_3$	1 379, 1 353		837			
标准 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	1 437, 1 367	1 047	815	748		
标准无水 $\text{Na}_2\text{SO}_4$		1 118			635, 610	474
061-1( $\text{NO}_3^-$ )	1 384, 1 360		834			
061-2( $\text{NO}_3^-$ )	1 429, 1 384	1 050	820	750		
061-3( $\text{NO}_3^-$ )	1 360		834			
061-1( $\text{SO}_4^{2-}$ )		1 115			639, 651	460

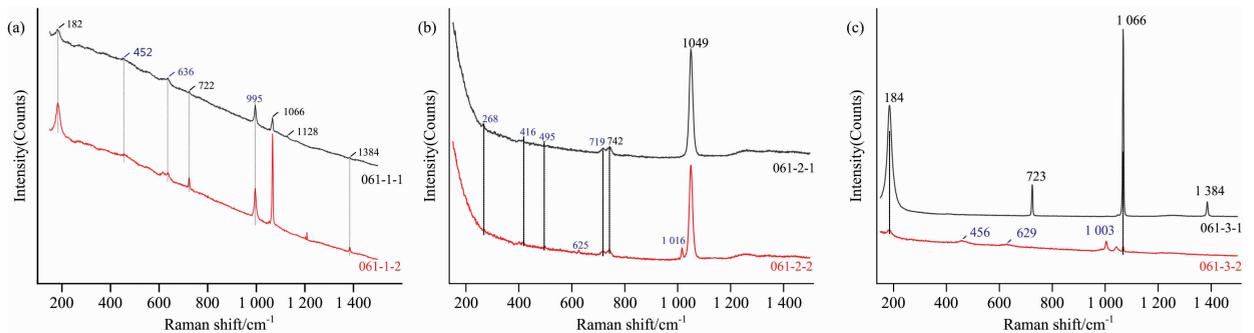


图 7 三个样品结晶盐的拉曼图谱

(a): 061-1; (b): 061-2; (c): 061-3

Fig. 7 Raman spectra of salts from three samples

(a): 061-1; (b): 061-2; (c): 061-3

表 5 061 提取出结晶盐中  $\text{NO}_3^-$  与  $\text{SO}_4^{2-}$  的拉曼特征峰与标准盐特征峰对应情况

Table 5 The Raman spectra of characteristic peaks of  $\text{NO}_3^-$  and  $\text{SO}_4^{2-}$  in salts were extracted by 055 corresponds to the characteristic peaks of standard salt

物质名称	反对称伸缩	对称伸缩	面内弯曲	不对称变角振动	对称变角振动
标准 $\text{NaNO}_3$	1 388	1 071	729		
标准 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	1 419	1 059	744		
标准无水 $\text{Na}_2\text{SO}_4$	1 101, 1 132, 1 153	994		620, 632, 647	449
标准硬石膏 $\text{CaSO}_4$	1 112, 1 128, 1 160	1 016		608, 627, 675	417, 499
061-1( $\text{NO}_3^-$ )	1 384	1 066	722		
061-2( $\text{NO}_3^-$ )		1 049	742		
061-2( $\text{NO}_3^-$ )	1 084	1 066	723		
061-1( $\text{SO}_4^{2-}$ )	1 128	995		625, 634	455
061-2( $\text{SO}_4^{2-}$ )		1 016		636	452
061-3( $\text{SO}_4^{2-}$ )		1 003		625	416, 495

### 3 结 论

哈密大海道 2 号水源地附近的雅丹,除了受到强烈的风沙等物理风化作用外,所处水源地附近的特殊地理环境使其还受到强烈的盐碱化学风化作用。主要原因是在哈密极干旱的环境中,地下水和地表水强烈的水盐运移使盐分不断从内部迁移至雅丹表层,可溶盐( $\text{NaCl}$ 、 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )的反复溶解和结晶等作用,不断破坏雅丹表层;同时还存在大量的强潮解盐( $\text{CaCl}_2$ )随环境湿度变化时的反复潮解/干燥过程,对雅丹风

化区域的第二层造成破坏。

本研究通过精确位置采样和多种分析技术手段联合印证的方法,对埋藏有翼龙化石的哈密雅丹的盐种类和风化机理进行初步探究,这一风化机理也可很好地解释化石及其围岩受潮后的强烈化学风化破碎现象,并为未来哈密翼龙化石野外原地保护提供科学支撑。

**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帮助;感谢审稿专家对本文提出有益的修改建议。

### References

- [ 1 ] Wang X, Kellner A W A, Jiang S, et al. *Current Biology*, 2014, 24(12): 1323.
- [ 2 ] Martill D M. *Current Biology*, 2014, 24(13): R615.
- [ 3 ] Wang X, Kellner A W A, Jiang S, et al. *Science*, 2017, 358(6367): 1197.
- [ 4 ] Deeming D C. *Science*, 2017, 358(6367): 1124.
- [ 5 ] ZHANG Xin-jun, JIANG Shun-xing, WANG Xiao-lin(张鑫俊, 蒋顺兴, 汪筱林). *Chinese Journal of Nature(自然杂志)*, 2017, 39(3): 157.
- [ 6 ] WANG Xiao-lin, JIANG Shun-xing, CHENG Xin(汪筱林, 蒋顺兴, 程 心). *Science & Technology Review(科技导报)*, 2018, 36(23): 11.
- [ 7 ] LIN Hai-yan(林海燕). *Western China Communications Science & Technology(西部交通科技)*, 2017, (9): 37.
- [ 8 ] LI Ying, LUO Wu-gan, YANG Yi-min, et al(李 颖, 罗武干, 杨益民, 等). *Acta Palaeontologica Sinica(古生物学报)*, 2019, 58(4): 515.
- [ 9 ] LI Ying, LUO Wu-gan, YANG Yi-min, et al. *Scientia China Earth Sinica*, 2021, 64(3): 458.
- [10] Peng X, Wang Y, Ma X F, et al. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 2020, 94(2): 347.
- [11] DENG Jian-guo, PENG Guang-zhao, JIN Yong-zhong, et al(邓建国, 彭光照, 金永中, 等). *Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory(光谱实验室)*, 2010, 27(1): 192.
- [12] Arnold A, Zehnder K. *The Conservation of Wall Paintings*, 1991, 1: 103.
- [13] JIANG Xiao, ZHANG Hu-yuan, YAN Geng-sheng, et al(姜 啸, 张虎元, 严耿升, 等). *Rock and Soil Mechanics(岩土力学)*, 2014, 35(2): 459.
- [14] QIN Hu, ZHANG Feng, YU Wei, et al(秦 虎, 张 峰, 于 伟, 等). *World Sci-Tech R&D(世界科技研究与发展)*, 2016, 38(2): 326.

## Spectral Analysis of the Weathering of Yardang Buried Pterosaur Fossils —A Case Study of Yardang Near the No. 2 Water Source of Dahaidao

ZHAO Wen-hua<sup>1</sup>, HAN Xiang-na<sup>1\*</sup>, CHEN Cong<sup>1</sup>, WANG Xiao-lin<sup>2,3,4\*</sup>

1. Institute for Cultural Heritage and History of Science & Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China
2. Key Laboratory of Vertebrate Evolution and Human Origins, Institute of Vertebrate Paleontology and Paleoanthropology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100044, China
3. Center for Excellence in Life and Paleoenvironment, CAS, Beijing 100044, China
4. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** The pterosaur fossils in the Hami area of Xinjiang are very important. The Hami Pterosaur Fauna is mainly buried in the Yardang of the Early Cretaceous lacustrine strata and enriched in tempestite. Once exposed up the ground, the fossils will undergo different degrees of natural weathering, especially when exposed to water or moisture. Due to the action of groundwater and intermittent runoff, serious salt efflorescence was found at the bottom of Yardang near the No. 2 water source of Dahaidao, which caused the spalling of rock and the collapse of the upper Yardang. The weathering phenomenon of different layers from

bottom to top are quite different, and the most intense weathering is found in the bottom rock. By sampling along Yardang stratigraphic section, the lithology and soluble salt types of each layer are determined by using scientific analysis technology, from a microscopic perspective to explain the mechanism of weathering of this Yardang. Polarized light microscopic observation and X-ray diffraction (XRD) results show that each stratum contains quartz, feldspar, calcite, and clay minerals. It is no difference in mineral composition, but there is a great difference in clay content. Accurate methods for identifying soluble salts types include ion chromatography (IC) to determine the content and types of soluble salt ions, Raman spectroscopy (Raman) and Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) to identify nitrate and sulfate, and the Scanning Electron Microscopy Energy Spectrometer (SEM-EDS) to distinguish chloride, nitrate, and sulfate. The results show that the soluble salts in the lowest stratum are mainly NaCl and  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , the middle stratum is NaCl and  $\text{CaCl}_2$ , and the upper stratum is NaCl. The difference in salt type/content in rock layers is important for diverse weathering setting. Combined with the climate and geographical environment of this Yardang (extremely arid area, near the water source), this paper discusses the law of water and salt activities linked to the weathering setting, and illustrates the main weathering mechanism this Yardang. The weathering reasons of Yardang are that, the internal cause is the different lithology of each sedimentary layers, and the external cause is the comprehensive effect of water and salts (NaCl,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{CaCl}_2$ ). The strong water and salt activity caused the serious chemical weathering of Yardang with *Hamipterus* fossils. This weathering mechanism can also explain the strong weathering of *Hamipterus* fossils and their surrounding rocks after undergoing moisture erosion.

**Keywords** *Hamipterus*; Yardang; Weathering mechanism; Soluble salts; Hami

(Received Feb. 7, 2021; accepted Feb. 25, 2021)

\* Corresponding authors

## 《光谱学与光谱分析》期刊社决定采用 ScholarOne Manuscripts 在线投稿审稿系统

《光谱学与光谱分析》期刊社与汤森路透集团签约,自 2010 年 12 月 1 日起《光谱学与光谱分析》决定采用 Thomson Reuters 旗下的 ScholarOne Manuscripts 在线投稿审稿系统。

- ScholarOne Manuscripts, 该系统不仅能轻松处理稿件,而且能提速科技交流。
- 全球已有 360 多家学会和出版社的 3 800 多种期刊选用了 ScholarOne Manuscripts 系统作为在线投稿、审稿平台,全球拥有超过 1 350 万的注册用户,代表着全球学术期刊在线投审稿的一流水平。
- ScholarOne Manuscripts 与 EndNote, Web of Science 无缝链接和整合;使科研探索、论文评阅和信息传播效率大为提高。
- ScholarOne Manuscripts 是汤森路透科技集团的一个业务部门,拥有丰富的学术期刊业务经验,为学术期刊提供综合管理工作流程系统,使期刊更有效管理投稿、同行评审、加工和发表过程,提高作者心中的专业形象,缩短论文发表时间,削减管理成本,帮助期刊提高科研绩效和实现学术创新。

《光谱学与光谱分析》采用“全球学术期刊首选的在线投稿审稿系统—ScholarOne Manuscripts”,势必对 2010 年 11 月 30 日以前向本刊投稿的作者在查阅稿件信息时,会带来某些不便,在此深表歉意!为了推进本刊的网络化、数字化、国际化进程,以实现与国际先进出版系统对接;为了不断提高期刊质量,加快网络化、数字化建设,加快与国际接轨的进程,希望能得到广大作者、读者们的支持与理解,对您的理解和配合深表感激。这是一件新事物,肯定有不周全、不完善的地方,让我们共同努力,不断改进和完善起来。

《光谱学与光谱分析》期刊社

2010 年 12 月 1 日