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⁾,陈熜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 lc),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。



geojournals.cn/georev

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、恐龙蛋及其地层学、沉积学、古环境等研究;Email: wangxiaolin@ivpp.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、Na₂SO₄ 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,以期为这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;CaCl₂(分析纯),北京市通广精细化工公司;

Na₂SO₄(分析纯),国药集团化学试剂有限公司; CaSO₄(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(中辉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℃, 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 2000~50 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、CaCl₂ 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)

Table 1 Composition and formula of clay mineralsimulation samples (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) Table 2 Composition and formula of salt simulation

sample(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 ₂ SO 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 ₂ SO ₄ +2. 5% CaSO ₄
10	95% 055-3(无盐)+1.25%NaCl+1.25%CaCl ₂
10	+1.25%Na ₂ SO 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℃,55% RH;步骤 2:45℃, 95% RH。每个步骤持续4h,一个循环周期为8h。

(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、CaCl₂、Na₂SO₄和CaSO₄)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×)





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 半定量分析结果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 anal	vsis results of three sandstone samples (%)
------------------------------------	---------------------------------------------

中田田臣宜 日文 新田田 成新田 第60 円 第60 円	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		
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	17 11 12 14	TTHILL	蒙脱石							伊利石	绿泥石	
055-2 风化区域 48 19 9 3 - 1 19 0.6 0.4	_	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
<u>055-3</u> 稳定区域 45 21 10 23.3 0.5 0.2	_	055-3	稳定区域	45	21	10	-	-	-	23.3	0.5	0.2



sandstone samples

黏土矿物总量的 96%、95%、97%,定向片自然风干 处理后(N),d001 = 1.52 nm,经甘油饱和处理后 (E),d001 膨胀到 1.7 nm,经 450℃加热处理后 (T),d001 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 6.0~60.2 μm、0.67~11.3 μm、 0.43~9.0 μm,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 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	0	Na	Mg	s	Cl	Са
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

表 4 新疆哈密 3 个样品的浸出液的离子色谱分析结果

样品 编号	样品位置	离子相对含量(mg/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



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 Ca(NO₃)₂ · 4H₂O 中 NO₃ 的反对称伸缩振动模式, 1051 cm⁻¹、1036 cm⁻¹ 处归属于 Ca (NO₃)₂ · 4H₂O 中 NO₃ 的对称伸缩振动模式, 817 cm⁻¹ 处归属于 Ca(NO₃)₂ · 4H₂O 中 NO₃ 的面外弯 曲振动模式, 751 cm⁻¹ 处归属于 Ca(NO₃)₂ · 4H₂O 中 NO₃ 的面内弯曲振动模式。1115 cm⁻¹ 归属于 Na₂SO₄ 的对称伸缩振动模式, 618 cm⁻¹ 处归属于 Na₂SO₄ 的不对称变角振动模式, 468 cm⁻¹ 处归属于 Na₂SO₄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 Ca(NO₃)₂・ 4H₂O,055-3 中有 Na₂SO₄ 和 Ca(NO₃)₂・4H₂O。

拉曼光谱分析结果(图 8)可知,样品号 055-1 中有 $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ 和 $NaNO_3$,样品号 055-2 中 有硬石膏 $CaSO_4$ 、 $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ 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): $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ 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





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 CaSO₄ 中 SO₄²⁻ 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 Na₂SO₄ 中 SO₄²⁻ 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、Ca(NO₃)₂ · 4H₂O、CaCl₂和少量 NaNO₃; 风化区域(样品号 055-2)含有 NaCl、Ca(NO₃)₂ · 4H₂O、CaCl₂和少量 CaSO₄、Na₂SO₄、NaNO₃。稳定区 域(样品号 055-3)含有 NaCl、Na₂SO₄ 和少量 CaSO₄、、Ca(NO₃)₂ · 4H₂O、NaNO₃。

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 的窟龛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;





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(Goudie 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 Na₂SO₄ 变成 Na₂SO₄ · 10H₂O 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,SO4 所在区域是最稳定 的未风化区,说明 NaCl 和 Na2SO4 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、NaNO3、 CaCl₂、Ca(NO₃),和 Na₂SO₄,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: CaCl₂ > Ca(NO₃)₂ > NaCl > NaNO₃ > Na₂SO₄₀

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,

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 (%KH; Arnoid et al., 1991)									
温度/相对湿度/盐分	0°C	10°C	20°C	30℃	40℃	50℃			
$CaCl_2 \cdot 6H_2O$	41	39.4	30.8	22.4	18.4	16.3			
$Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$	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			
$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$	84.4	85.6	93.6	87.9	87.9	88.4			

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 CaCl₂、Ca(NO₃)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 CaCl₂和 Ca(NO₃)₂·4H₂O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 Na₂SO₄。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, 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, 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,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 Ca(NO₃), · 4H₂O 和 NaNO₃ 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 CaCl₂ 和 Ca(NO₃)₂·4H₂O 将会起到更强烈 的破坏作用。6,7 为添加 5% Na₂SO₄、CaSO₄ 的样







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 Na₂SO₄ 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,Na₂SO₄ 的破坏作用强于 CaSO₄。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 CaCl₂和 Ca(NO₃)₂·4H₂O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 CaCl₂和 Ca(NO₃)₂ •4H₂O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 CaCl₂/Ca(NO₃)₂·4H₂O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,陈伟十. 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疱疹病害中的作用. 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,夏娅娜,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,刘端端,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毁损机理. 文物保 护与考古科学,29(5):102~116.
- 李黎, 谷本亲伯. 2005. 龙游石窟砂岩的水稳定性研究. 文物保护 与考古科学, 17(4): 28~33.
- 李黎,王思敬,谷本親伯. 2008. 龙游石窟砂岩风化特征研究. 岩石 力学与工程学报,(6):1217~222.
- 李颖, 罗武干, 杨益民, 汪筱林. 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.
- 李颖, 罗武干, 杨益民, 蒋顺兴, 汪筱林. 2021. 新疆哈密翼龙化石 风化机理初步研究. 中国科学: 地球科学, 51(3): 398~410.
- 李最雄. 1985. 炳灵寺、麦积山和庆阳北石窟寺石窟风化研究. 文博, (3): 66~75.
- 吕功煊,张尚新,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,王远萍,戴枫年,张虎元,曾正中. 1995. 敦煌莫高窟岩体盐风化过程的初步研究.地理科学,(2):182 ~187.
- 汪筱林, 蒋顺兴, 程心. 2018. 哈密翼龙及其 3D 胚胎化石研究. 科 技导报, 36(23): 11~19.
- 翁诗甫, 徐怡庄. 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,谭松娥. 2013. 可溶盐对云冈石窟砂岩劣化 试验及模型建立. 岩土力学,34(12):3410~3416.
- 张鑫俊, 蒋顺兴, 汪筱林. 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, Zehnder K. 1991. Monitoring wall paintings affected by soluble salts. The Conservation of Wall Paintings, 1: 103~135.

Benavente D, Garca Del Cura M A, Fort R, Ordez S. 1999.

Thermodynamic modelling of changes induced by SALT pressure crystallization in porous media of stone. Journal of Crystal Growth, $204(1 \sim 2)$: $168 \sim 178$.

- Database: Saltwiki. 2021. A database of water salt system phase diagram. ttps://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.
- Espinosa 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.
- Goudie 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 Lihe, 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 Bomin, 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 Bomin, 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 Bomin, 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, Tanimoto Chikaosa. 2005&. Study of the water- stabilization of the sandstone of the Lonyou grottoes. Sciences of Conservation and Archaeology, 17(4): 28~33.
- Li Li, Wang Sijing, Tanimoto Chikaosa. 2008&. Study of weathering characteristics of sandstone at Longyou Grottoes. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, (6): 1217~1222.
- Li Ying, Luo Wugan, Yang Yimin, Wang Xiaolin. 2019&. The weathering mechanism of surrounding rocks in Hamipterusfossil. 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 Maiji Mountain and Qingyang North Grottoes Temple. Relics and Museolgy, (3): 66~75.
- Jin Zhiliang, Liu Duanduan, Zhang Yongke, Chen Gangquan, Xia Yin, Su Bomin, 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 Mausolesum 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, Oguchi C T, Kuchitsu 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 Fengnian, Zhang Huyuan, Zeng Zhengzhong. 1995&. A preliminary study on weathering process of salt in rock body at Mogao Grottes, 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, Yahefujiang Paidoula, Cheng Xin, Taissa Rodrigues, Meng Xi, Zhang Jialiang, 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, Yahefujiang Paidoula, Rodrigues T, Chen He, Sayao J M, Li Ning, Zhang Jialiang, Bantim R A M, Meng Xi, Zhang Xinjun, Qiu Rui, Zhou Zhonghe. 2017. Egg accumulation 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 Songe. 2013&. Deterioration experiment with soluble salt on sandstone of Yungang 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 Paleoenvironment, 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 $CaCl_2$, $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ and NaCl, while the salts in the no weathered rock are mainly NaCl and Na₂SO₄.

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