# 中国不同气候带盐风化作用的地貌特征

吕洪波[1)]，苏德辰[2)]，章雨旭[3)]，冯雪东[1)]，李春旺[4)]

1）中国石油大学地学院，山东青岛，266580；2）中国地质科学院地质研究所，北京，100037；
3）中国地质科学院，北京，100037；4）北京市门头沟区教师进修学校，北京，102300

**内容提要**：盐风化作用是地球表面普遍存在的一种物理风化作用，由于盐类的周期性结晶作用而造成地表岩石和建筑材料的破坏，形成诸如风化穴或蜂窝石构造等地貌景观。盐风化作用也是差异风化的主要表现形式之一。然而，到目前为止盐风化作用在中国地学界仍然被严重忽视，以至于盐风化作用造成的地貌景观常常被地学研究者和科普人士误读为海浪冲蚀、流水侵蚀、风蚀作用等。经过近十年的野外观察与探讨，笔者等对盐风化的形成机理和表现形式有了深入的理解。本文以中国境内东部海岸带、华北半干旱区、西北干旱区和东南湿热气候带基岩露头为例，系统地分析了盐风化作用的机理及其在不同气候带的表现形式。盐风化的必要条件是：适当的可溶性盐类（如 $Na_2SO_4$、NaCl 等）供应、周期性的干湿交替和温度变化。盐风化作用主要在发育可渗性孔隙的砂砾岩类和富含微裂隙的花岗岩类之露头表面表现明显，可以形成特征显著的盐风化穴。盐风化作用形成的地貌景观在东部海岸带和西北干旱区表现尤为明显，常常形成蜂窝石构造和大型风化穴，与风蚀作用的痕迹明显有别；而在华北半干旱区和南方湿热气候带虽然受到降雨等其他因素的影响而常常遭受改造、叠加甚或清除，但在某些露头区仍然保留有重要的识别标志，形成大型风化穴以及小型蜂窝石构造。笔者等强调：地表各种地貌景观形成过程中都有盐风化作用的贡献，而建筑物和景观保护也必须考虑到盐风化作用的影响。建议地学同仁重视盐风化作用的普遍性和重要性，在相关教材中补充更新盐风化的概念，并以科普的方式通过多种媒体纠正过去的错误认识。

**关键词**：盐风化；砂岩；花岗岩；片麻岩；蜂窝石；风化穴；差异风化

盐风化作用（Salt weathering）是陆地上普遍存在的物理风化作用，不仅导致岩石表面的破碎分解，也造成建筑石材的粉化脱落，而且在地貌形态塑造过程中扮演着重要的角色。然而，盐风化作用却一直被地学界忽视，以至于地表很多盐风化形成的宏观和微观地貌景观都被解释为其他作用的结果。为了让盐风化作用不再被地学界忽视，也让广大民众知道盐风化作用的普遍性和重要性，笔者等以东部海岸带、西北干旱区、华北半干旱区和东南潮湿气候区典型的盐风化地貌为例介绍盐风化作用的机理和其在不同气候带的表现形式，欢迎地学同仁批评指正。

（1）盐风化的定义和研究历史。Wellman 和 Wilson（1965）正式提出盐风化作用的概念，当时作者就强调：盐风化作用是一种被忽视的侵蚀营力。后被收录到地质学词典中：盐风化作用是指岩石物质在盐溶解或结晶作用的影响下粒状崩解或破碎的作用（Gary et al.，1972）。随着观察和研究的深入，盐风化作用的机理逐渐清晰，在 20 世纪 80 年代的词典里就出现较为完善和清晰的定义：盐风化是一种导致岩石表面物理崩解和破损的地貌过程，其原因主要是各种盐类晶体的生长膨胀。建筑物石材也可以遭受类似的风化作用（Yaalon，1982）。近年来的地貌专著上提供了较新的盐风化定义：盐风化是由于岩石孔隙或裂隙中的盐类结晶而导致的机械风化作用，多发生于干旱区或海岸带（Harvey，2012）。根据近 30 年的研究进展，笔者等在此给盐风化作用下一个中文的定义：盐风化作用（Salt weathering）是指因岩石孔隙（或裂隙）中的盐类结晶膨胀而导致的岩石露头表面颗粒分解或脱落的物理风化作用。盐风化作用在地貌上表现为形成大小不等的风化穴（Tafoni），小的厘米级，大的可以达到几米以上。盐

注：本文对盐风化作用的研究借助于中陕核工业集团委托的研究项目“测老庙盆地区域地质研究与铀矿有利区带预测”以及其他众多地质调查项目野外考察之机顺便完成现场观测，为相关项目计划外的附加成果。

收稿日期：2017-03-06；改回日期：2017-06-16。责任编辑：刘志强。Doi：10.16509/j.georeview.2017.04.006

作者简介：吕洪波，男，1957 年生。教授。从事构造地质学、沉积学、第四纪地质学等方向的教学与研究工作，擅长地学科普。Email：luhongbogeo@163.com；hongbolu@upc.edu.cn。

风化现象可见于陆地上任何气候带,但在内陆干旱区和海边表现更为明显。

盐风化作用也称为盐晶生长(Salt-crystal growth)、盐结晶作用(Salt crystallization)或盐屑作用(Haloclasty)。盐风化有时也叫蜂窝状风化(Honeycomb weathering)(Mustoe, 1982),因为在海边和某些潮湿地带可以形成密集分布的小型风化穴,看上去像蜂巢一样紧密排列。盐风化的结果是在岩石表面形成大小不等、形状各异的风化穴,导致岩石由表及里逐渐松散、脱落和破碎。尽管这种风化穴随处可见,但人们认识到盐风化对岩石的破坏作用却有着漫长的历史:最早有文献记述建筑石材受到盐结晶破坏的学者是古希腊的亚里士多德(Herodotus),他在公元前 420 年的文字提及金字塔被盐结晶所腐蚀(Doehne, 2002)。但此后一直没有文献介绍相关现象,直到公元 1895 年以后才逐渐有人记述建筑石材受盐类结晶破坏的事例(Kwaad, 1970; Doehne, 2002)。20 世纪初期,有很多学者开始注意到盐风化现象(Wellman and Wilson, 1965)。从 20 世纪 60 年代起,专门介绍盐风化的文章开始增多,如:Wellman 和 Wilson (1965)正式提出盐风化(salt weathering)的概念,并明确指出盐风化在海岸带和干旱地区最明显。Rutter 和 Edwards(1967)通过观察发现:海水中的盐分可以被风带走并随着雨水降落在陆地表面。Cooke 等(1968)研究沙漠中的盐风化,进一步肯定了盐类结晶造成了岩石表面破碎的机理,并指出海雾携带着盐分。Kwaad (1970)通过实验研究了花岗岩的颗粒分解,将花岗岩样品分别浸泡于不同的盐类溶液中,经过比较发现:$Na_2SO_4$破坏力最大,然后依次是 $Na_2CO_3$、$MgSO_4$和 NaCl,而 $CaSO_4$对花岗岩没什么影响。近年来的实验研究都证明 $Na_2SO_4$的破坏力最大(Lindstrom et al., 2015)。此外盐风化可以发生在低温的冻融条件之下(Kwaad, 1970)。

20 世纪 70 年代开始,学者们就对各种石材进行模拟实验(Kwaad, 1970),通常是将样品浸泡在不同的盐类溶液中然后在空气中自然风干或人工吹干,结果发现:$Na_2SO_4$引起的盐风化作用最明显(Cooke, 1979, 1981; Smith and McGreevy, 1988),而且发现岩石孔隙度和吸水能力等都影响着盐风化的结果(Cooke, 1979, 1981)。Mustoe(1982)观察海岸带的风化作用发现:长石砂岩表面的蜂窝状风化是海浪溅起的海水不均匀泼溅到岩石上之后再蒸发造成的,而其"侵蚀"过程仅仅是砂岩颗粒的崩解而不涉及化学变化,因此仅仅是物理风化。McGreevy 等(1984)用纹层状砂岩做实验发现:含有黏土杂基的砂岩在盐风化作用中更容易破碎。Robinson 等(1987)通过英国海岸带冬季观察和室内模拟实验发现:霜冻和盐风化的共同作用加剧了海岸带岩石的破碎。Goudie 等(1997, 2002)研究海岸沙漠带风化现象,发现大雾中携带的盐分给盐风化提供了盐类物质,进一步证明盐风化造成岩石强度的明显降低。Rodriguez-Navarro 等(1999)用 $Na_2SO_4$模拟海边的蜂窝石构造发现:海风促进蒸发作用而加速了盐类结晶,因而导致蜂窝状风化穴的随机分布。进一步的研究发现:相对湿度小于 50% 时结晶成无水硫酸钠,而相对湿度大于 50% 时则形成含水硫酸钠,这种盐类相变对岩石表面颗粒的破坏比 NaCl 还要强烈(Rodriguez-Navarro and Doehne, 1999)。

20 世纪 90 年代以来,研究者注意区分盐风化与风蚀作用等多种破坏的差异和影响,对盐风化的机理更加清楚了。Young 等(1992)总结了砂岩地貌的特征,介绍了美国和澳大利亚多处砂岩的盐风化地貌。Kuchitsu 等(1999)研究泰国许多青砖建筑景点的风化破坏现象,发现从雨季转为旱季阶段盐风化比雨季严重,因为雨季没有盐类结晶。French 等(1999)观测了南极冰缘强风区的风蚀作用和盐风化现象发现:风蚀速度大约为 0.10 ~ 0.30 cm/ka,而盐风化速度可以达到 2 ~ 10 cm/ka 之间,是风蚀速度的 10 倍以上,说明冰缘气候带的盐风化作用非常强大。Aref 等(2002)研究埃及西部一个低于海平面 134 m 的风蚀洼地时发现:由于萨布哈机制使得盐类在地表附近结晶而导致岩石表面崩解破碎,而破碎的产物被大风吹走。这说明盐风化促进了风蚀作用的进行,同时风也将地表的盐类晶体搬运到其他地方。

21 世纪初,人们通过实验模拟进一步探讨盐风化的破坏机制,并逐渐将风蚀作用等与盐风化作用造成的地貌景观区分开来。如在地貌学词典中明确指出:尽管水合作用和热膨胀都能产生影响,但盐风化是导致风化穴(包括干旱区大漂砾侧面的大型风化穴)形成的最主要营力,而风蚀作用却与此无关(Goudie, 2004)。很多热带严酷环境的盐风化作用往往是通过实验模拟探讨的(Smith et al., 2005; Viles and Goudie, 2007)。实验表明:岩石孔隙度和杂基中的黏土含量影响着盐风化的效果(Warkeand Smith, 2000)。Chabas 等(2000)用过滤网实验收集到大雾带来的海盐证实盐类主要是外来的而非岩石

本身。Benavente 等(2001,2007)用多孔岩石浸泡盐溶液发现:岩石一直浸泡在溶液里的部分没有盐类结晶故没有明显破碎,而水面之上的毛细带内却见明显的盐类结晶,岩石也粉化脱落;进一步研究发现:岩石孔隙度好且有弱的杂基充填更有利于盐风化破坏,而过大的裂缝只能提供盐溶液通道而不利于盐风化破坏。Cardell 等(2003)用混合盐溶液模拟海水对花岗岩风化的影响,结果发现:中粗粒花岗岩更容易遭受盐风化作用,而且盐类主要在靠近岩块表面的微裂隙中结晶,因此导致花岗岩表面矿物颗粒脱落。Angeli 等(2010)用 $Na_2SO_4$ 溶液实验探讨了不同温度和不同盐度下的盐风化,研究发现:5°C时盐风化破坏作用要比室温(22°C)条件下严重,盐度低时岩石表面趋于颗粒状粉化破碎,而盐度高时则趋于表面鳞片状脱落;实验证实:岩石孔隙度高并能渗水是风化作用的重要条件(Labus and Bochen, 2012),这里所说的风化作用主要就是盐风化。

越来越多的研究证实:盐风化不仅发生于孔隙度发育的砂砾岩表面,花岗岩也容易发生盐风化,因为构造运动导致各种微裂隙的产生(Cardell et al., 2003)。各类花岗岩受到关注是因为很多建筑物都用花岗岩做石材(Lopez-Arce et al., 2010);除了花岗岩石材的盐风化受到关注外,干旱区很多大的漂砾侧面发育的风化穴也受到研究者的重视(Paradise, 2013; Coeur, 2014),这些风化穴现在看来就是盐风化造成的。盐风化不仅在地球上普遍存在,有人认为火星上也存在(Jagoutz, 2006)。

与国外地学界相比,中国地学界对盐风化的研究要落后得多,笔者等至今没有找到中国作者全面介绍盐风化地貌的研究文献。徐叔鹰(1993)根据国外研究文献初步归纳了盐风化的基本特征,并指出喀喇昆仑山谷冰川退缩后露出的漂砾上就发育了明显的盐风化穴,他称之为"蜂窝洞"。尽管他没有提供盐风化的照片,也没有完全清晰地阐述盐风化的机理,但他却是中国第一个介绍盐风化作用的学者。

屈建军等(1995)研究了敦煌莫高窟壁画的风化作用,认为壁画的粉化是盐风化造成的,但他们认为盐分来自碎屑岩本身。Jiang Guanghui 等(2015)研究了云冈石窟内壁上的盐风化现象。遗憾的是,他们都没有研究当地地表岩石露头的盐风化地貌。

本文第一作者从 2010 年开始关注青岛海岸带碎屑岩的蜂窝状风化和西北干旱区碎屑岩的风化穴,并在《地球科学概论》课程教学中增加了盐风化的内容,同时通过科学网、科学画报等介绍盐风化地貌的形成机理(吕洪波,2014a, 2014b),并将盐风化的现象和机理讨论一节加入到英文版《地球科学概论》(第二版)教材中(吕洪波,2016)。王振亭等通过应力参数数值模拟计算了巴丹吉林沙漠岩石露头盐风化穴底部盐晶的热膨胀机制,认为盐类晶体的热膨胀力无法导致岩石的破坏(Wang Zhenting and An Zhishan, 2016)。

鉴于至今没有一篇全面介绍盐风化的中文研究文献,希望本文为这个目标做一点补缺的工作。

(2)盐风化作用被严重忽视和误读。尽管盐风化作用非常普遍,但在一般地质学、地理学经典教材中有关风化作用的章节很少提及盐风化作用的概念。在笔者等阅读过的各类《普通地质学》、《地球科学概论》、《地质学基础》、《自然地理学》、《地貌学》教材中没有盐风化的定义和现象描述,即使在国际上具有代表性的普通地质学教材中,也仅仅简单提及盐类晶体生长(Crystal growth)对岩石或建筑材料产生破坏作用,并未提及盐风化作用及其机理(Skinner and Porter, 1989)。这些事实说明,地学界确实忽视了盐风化作用。

不仅如此,盐风化作用形成的地貌景观也被广泛地误读为风蚀作用的结果。如:中国西北干旱区最常见的风化穴(Tafoni)本来是盐风化作用造成的,可在地质学相关文献中却普遍被看作风蚀坑,即使在国内广泛使用的普通地质学和地貌学经典教材中仍被当作风蚀地貌介绍(舒良树,2010;曹伯勋,1995)。在科普作品和大众媒介中解释错误就更加普遍,如:在百度中搜寻"风蚀壁龛(Alcove)"、"石格子(Stone lace)"、"蜂窝石"、"石窝"等词汇,出现成百上千个网站链接,其网页介绍几乎千篇一律地强调"风蚀作用",而给出的图片却是盐风化作用形成的典型的蜂窝石或大型风化穴。

上述事实告诉我们,盐风化作用在中国地学界已经被严重忽视和误读,应该及时纠正。

## 1　盐风化穴的形成机理和盐风化作用的基本特征

尽管我们已经弄清盐风化作用的定义和研究历史,但必须用实例阐述盐风化作用导致岩石表面风化穴形成的机理。影响盐风化的三个基本条件是:岩石结构——可渗孔隙(裂隙)、含盐溶液和干湿交替的小气候环境。其中,岩性是基础,这就将盐风化

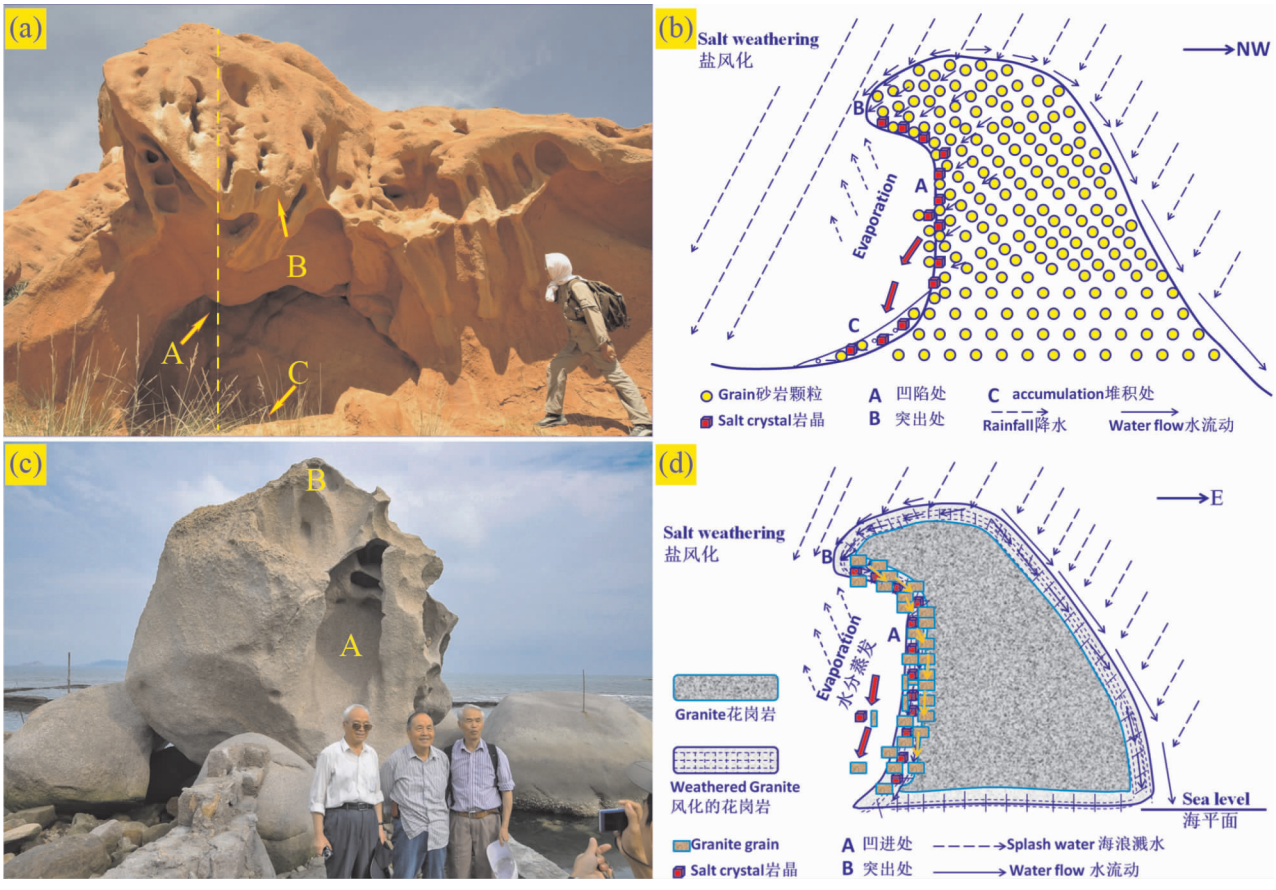



图 1 砂岩和花岗岩盐风化穴照片及其形成机理示意图(据吕洪波,2016 修改)

Fig. 1 Salt weathering photos of sandstone and granite and the sketch diagrams showing the formation mechanisms (Modified after Lü Hongbo, 2016)

(a) 甘肃酒泉青稞地古近纪砂岩盐风化穴;(b) 图(a)风化穴形成机理剖面示意图;(c) 青岛崂山海岸带花岗岩漂砾盐风化穴;(d):图(c)风化穴形成机理剖面示意图

(a) Salt weathering landforms of sandstone in Qingkedi, Jiuquan, Gansu; (b) Sketch profile showing the formation mechanism of salt weathering in sandstone; (c) Tafoni on the landward side of a granite boulder on the seaside of Mount Laoshan, Qingdao; (d) Sketch profile showing the formation mechanism of tafoni in a granite boulder

作用的场所限制在具有孔隙或微裂隙的岩石表面,目前已知的岩石类型主要是:碎屑岩类(砂岩或含砾砂岩为主)和花岗岩类(包括片麻岩类变质岩)。即使都是砂岩,也因内部孔隙度和渗透性不均一而不一样,因此就显现出差异风化的特征。笔者等在这里以两类岩石——碎屑岩类和花岗岩类为例,分别展示盐风化穴的形成机理。

### 1.1 砂岩表面盐风化穴的形成机理

这里以甘肃酒泉青稞地古近纪红层砂岩露头的盐风化穴为例,介绍其形成机理(图 1)。

以降水方式,含盐溶液从岩石表面透过碎屑岩颗粒之间的孔隙向砂岩内部渗透,当内部充满水分后只能从岩块四周的下方渗出。在中国北方西北风为主,降水雨滴多从西北向东南方向下降,所以主要冲刷岩块露头的北西侧,而雨滴一般不直接滴落在南东侧。渗出的含盐溶液在露头的迎风侧(主要是北西侧)随着雨水的冲刷而流失,而在背风侧(主要是南东侧)下部因干燥而水分蒸发,盐类(如:硫酸钠、氯化钠等)在靠近露头侧面近底部表面的颗粒之间结晶。盐类晶体结晶产生的张力将靠近表面的碎屑颗粒撑开而脱落,其中部分盐晶也随着脱落的碎屑颗粒和黏土掉落在岩块下方边缘。经过长时间的连续蒸发或者频繁干湿交替的蒸发作用,岩石碎屑脱落的地方就逐渐形成凹槽,这便是盐风化穴。因为含盐溶液总是趋于在岩块的底部周围向外渗出,因此风化穴总是在岩石露头的底部侧面先发育,然后向内、向上延伸开来而逐渐扩大。由于北方以西北风居多,故下雨时岩石露头的西北侧一直受到

雨水的冲刷,即使含盐溶液从这侧渗出也被降水带走,加之南东侧日照多而蒸发量大,因此露头北西侧的盐风化穴一般比南东侧的发育得弱(图 1a、1b),当然也有少数例外存在。

在海岸带砂岩表面的盐风化作用之主要盐分是由海雾和风浪从海水中带来的,其风化穴的形成机理略有不同,但不均匀蒸发造成了不同形状的风化穴的形成。总之,蒸发量相对大的地方形成盐风化穴的中心凹进区,而蒸发相对弱的地方风化强度也弱,最终就显得突出于表面,位于风化穴的周围。

通俗地讲,盐风化作用就是因盐结晶而导致岩块表面的差异风化现象,这种差异造就了砂岩露头表面(主要是侧面)各种形态的风化穴。

### 1.2　花岗岩类岩石表面盐风化穴的形成机理

这里所说的花岗岩类岩石包括花岗岩、片麻岩和混合岩,因为这些岩石都是以颗粒状矿物晶体紧密结合在一起,露头上又被几个方向的断裂(节理)切割成大小不等的块体,而这些岩块可能出露地表甚至形成孤立的石蛋而进一步遭受盐风化的破坏。从微观上看,块体内部因地应力作用而形成微细裂隙,但这些裂隙连通性差,不足以成为渗水通道。然而,岩石露头表层就不一样了,不仅发育构造微裂隙,还发育规模不等的风化微裂隙:因为岩石近表面的部分遭受频繁的日温差和季温差变化,而长石、石英等不同矿物颗粒热胀系数不同,温度变化导致的矿物颗粒反复膨胀与收缩就会形成规模不等的微裂隙,特别是发育与岩石表面起伏一致的微型剥离面理(Micro-exfoliation),这些微裂隙可以切穿石英和长石颗粒,一般深入岩块内部几厘米,为含盐溶液的渗透提供了通道,也为盐类的结晶提供了场所。现以青岛崂山海边白垩纪花岗岩漂砾为例介绍花岗岩盐风化穴的形成过程(图 1c、1d)。

花岗岩漂砾的底部位于海平面附近,每次海浪打来的海水溅到漂砾的靠海一侧和顶部,唯有向陆的侧面没有遭受海水的直接拍打。溅到花岗岩表面的盐水多数直接从表面流失,还有少量的则沿着花岗岩风化表层的微裂隙向周围渗透。因为裂隙连通的风化表层厚度有限(1 ~ 3 cm),盐水无法向花岗岩内部渗透,于是从顶部向下渗透并从下部渗出。多数渗出的含盐溶液随着后续海水的浪打而流失,只有背面局部保持干燥的部位少量渗出的盐水被蒸发。随着盐水不断的渗入补充和蒸发流失,花岗岩漂砾背面局部裂缝里的盐类就会因过饱和而结晶,于是给裂缝两侧的长石、石英颗粒增加了额外的膨胀力,导致表层的矿物颗粒或岩石碎片逐渐松动和脱落。矿物颗粒或碎片脱落后形成的新表面为温差造成的热胀冷缩提供了新的边界条件,导致表层风化层向岩块内部迁移,为进一步的盐风化提供新的微裂隙。久而久之,经常蒸发的一侧就形成风化穴(图 1c、1d)。

在内陆干旱区的花岗岩陡崖或漂砾侧面经常有类似的盐风化穴形成,其机理与海边的类似,只是其盐类来自于空气,而水是大气降水。

### 1.3　盐风化作用的基本特征

根据地学同仁数十年的研究积累,笔者依照自己的理解归纳一下盐风化的基本特征:

(1)盐风化是盐类在岩石孔隙或裂隙中结晶导致的岩石露头表面破碎脱落的物理风化,其直观表现是在岩石露头形成形态各异的盐风化穴。

(2)盐风化不仅影响孔隙发育的碎屑岩类,也影响颗粒状的花岗岩类。也正因为如此,盐风化具有选择性发育的特征,在碎屑岩中孔隙适中的特定层段发育明显,是差异风化的重要表现形式之一。

(3)盐类中破坏力最大的是硫酸钠,其次是碳酸钠、硫酸镁和氯化钠等。

(4)尽管碎屑岩本身可以含有盐类矿物,但导致盐风化的主要盐分却是外来的。盐类被风或雾从海水、盐湖甚或含盐表土中带到空气中最后降落在岩石表面,被雨露等溶解带进岩石孔隙或微裂隙中,最终在蒸发强烈的岩石表面附近因过饱和而结晶,晶体生长撑破孔隙周围的表面颗粒而形成形态各异的风化穴。

(5)周期性的干湿交替是盐风化作用的气候条件。这个条件在陆地上最容易满足:只要不被水覆盖着,总有干湿交替的变化,因此盐风化现象普遍存在:不仅可以存在于海岸带和干旱的内陆区,也可以发生在相对潮湿的亚热带和寒冷的两极或高山区,只是表现形式有所差别而已。

(6)水是盐风化作用的重要介质。海水直接泼溅在海岸带岩石露头上为盐风化带来盐分,降水和雾气也可以携带盐分,关键的是携带盐分的水渗入到岩石孔隙或裂隙中在某些局部露头表面蒸发而导致盐风化穴的发育,而过量的水沿着岩石露头表面流淌恰恰带走了流经处的盐分而减缓了盐风化作用。水在岩石露头的不均匀运移途径直接造成了盐风化作用和差异风化表现,但盐风化穴却不是水流侵蚀的结果。

(7)风除了携带盐类粉尘外,更主要的作用是

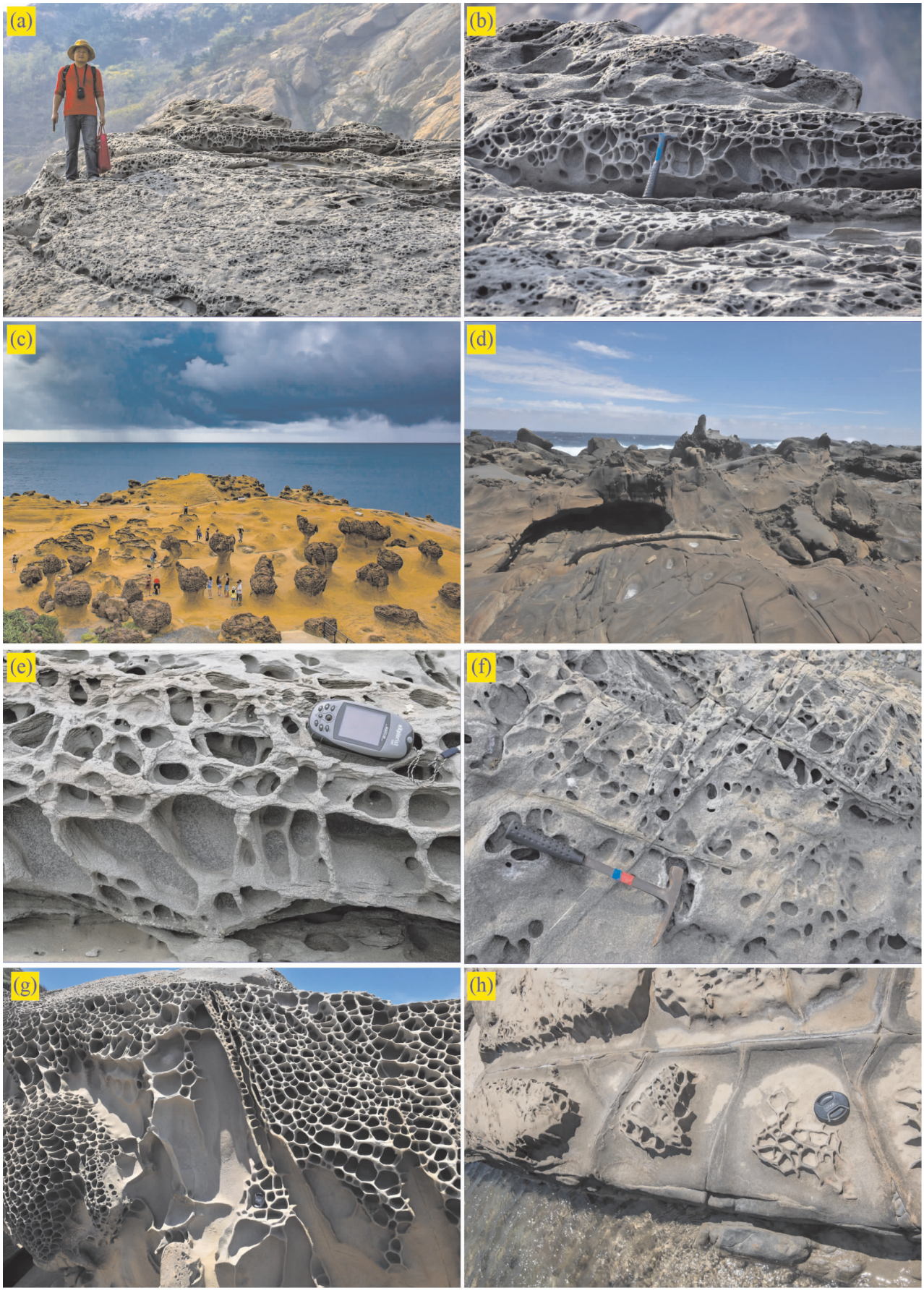

(a)
(b)
(c)
(d)
(e)
(f)
(g)
(h)

图 2 中国东部海边碎屑岩露头的盐风化现象

Fig. 2 Salt weathering phenomena found in Qingdao and Taiwan, China

(a) 青岛灵山岛潮上带砂岩露头发育蜂窝石构造;(b) 灵山岛海边白垩纪砂岩的蜂窝石构造;(c) 台湾野柳海岸带差异风化宏观露头;(d) 台湾佳乐水海岸带差异风化宏观露头;(e) 青岛灵山岛砂岩露头上的蜂窝石构造;(f) 砂岩解理缝附近因潮湿而相对突出;(g) 台湾佳乐水火山碎屑岩的蜂窝石构造;(h) 台湾佳乐水碎屑岩解理缝处形成突脊。

(a), (b) Honeycomb structures found on the sandstone outcrop in the supratidal zone, Lingshan Island, Qingdao; (c) Differential weathering landform on the coast in Yeliu, Taiwan; (d) Differential weathering landform on the coast in Jialeshui, Taiwan; (e) Honeycomb structures on the sandstone outcrop in the Lingshan Island, Qingdao; (f) The narrow ridges showed along the joints because of more water supply from the joints; (g) The honeycomb structures on the volcaniclastic rocks in Jialeshui, Taiwan; (h) Differential weathering along the coast of Jialeshui, Taiwan

加速了岩石表面水分蒸发,促进盐类结晶。虽然局部也可以吹走盐风化脱落的粉末,但盐风化穴的形成却与风蚀作用无关。

## 2　盐风化作用在中国不同气候带的地貌特征

前人的研究告诉我们:盐风化作用在陆地上普遍存在,无论是岩石露头还是建筑物都不同程度地遭受盐风化的破坏,中国也不例外。然而,在不同的气候带其盐风化的表现形式(即:地貌景观)是不一样的。下面以明显不同的四个气候带为代表,分别介绍中国不同气候带盐风化的表现形式。

### 2.1　盐风化作用在东部海岸带的表现

我们选择青岛(灵山岛)海岸带、台湾佳乐水和野柳的碎屑岩为代表,介绍以蜂窝石构造为主的盐风化现象(图 2a—d)。砂岩的渗透性良好,孔隙大小适中,最容易遭受盐风化作用而形成各种风化穴,而海边的潮上带长期受海浪拍打、海雾浸润等事件的影响,形成干湿频繁交替的局部气候条件,因此容易形成蜂窝石构造。其形成过程如下:

位于潮上带的砂岩露头在高潮时受海浪拍打而被海水溅湿或海雾带来含盐溶液渗入内部,在每天低潮期遭受日晒而水分蒸发,盐类在近表面的碎屑颗粒之间结晶,导致表面碎屑颗粒脱落。因为海浪的打击和海雾的气团和风的不均匀,在砂岩露头表面形成一系列密集的干燥中心,表皮之下和周围孔隙中的含盐水分则向一个个中心集中并随即蒸发,留下的盐分则在这些中心首先结晶,将表皮的碎屑颗粒撑掉,因此就逐渐形成了小型风化穴的雏形,而雏形一旦形成则风化穴的形态与分布格局也就基本固定了。这些小型风化穴越来越深并向四周拓展,相邻"中心"之间的区域干燥最弱因而盐类结晶就弱,因此遭受的破坏就弱。天长日久,就会形成紧密排列的风化穴,这便是蜂窝石构造(图 2)。

如果砂岩的节理比较发育,风化穴的发育就同时受到岩石节理的控制:在离开节理的地方因率先干燥而容易形成小型风化坑,而靠近节理的地方因为解理缝深处水分及时补充而很少干燥,这就造成盐类很少在解理缝附近结晶,时间久了则会使解理缝附近相对突出(图 2f、h)。因为海岸带或南方湿热地区每个干湿交替的周期很短,干燥中心密集,无法造成深度干旱和大规模的盐类结晶区,所以只能形成密集分布的小型风化穴——蜂窝石构造。然而,这些密集分布的小型风化穴影响的深度也有限,发育到一定程度后就会整层脱落,然后等待下一个发育周期(图 2h)。

对于避开海浪泼溅而干湿交替周期长的砂岩露头或者花岗岩露头则可形成规模较大的盐风化穴(图 1c)。

### 2.2　盐风化作用在西北干旱气候带的表现

中国西北地区降水稀少,几乎常年干旱,因此以砂岩类和花岗岩类(包括片麻岩和混合岩)为代表的岩石露头容易形成盐风化穴,而这些风化穴过去多被当作风蚀穴看待。为了纠正过去的错误认识,我们选择甘肃酒泉青稞地、甘肃玉门北山、内蒙古西部狼山南麓、内蒙古西部巴丹吉林沙漠边缘等地的碎屑岩和片麻岩等地表露头发育的典型风化穴作为实例,讨论西北干旱区盐风化的机理和地貌景观特征(图 3)。

西北地区以西北风为主,降水时雨滴被风吹向东南,因此岩石露头的北西坡首先遭受雨水的洗礼,而南东坡一般保持干燥。加之南坡比北坡日照多,蒸发量大,所以南东坡最容易受盐风化作用的破坏而形成风化穴,而北坡发育盐风化穴的几率和规模都小得多。主要特征如下:

(1)盐风化穴总是选择性地发育于雨水淋不到的侧面之孔隙适当的层段,而其上方总是有接收雨水的暴露面(图 3)。该侧面很少淋雨而以蒸发为主,而其上方的暴露面为携带盐分的雨水接收区,下渗的盐分在该侧面的下部适当位置结晶,长期积累


(a)
(b)
(c)
(d)
(e)
(f)
(g)
(h)

图 3 中国西北干旱区碎屑岩和花岗岩类盐风化地貌

Fig. 3 Salt weathering landforms of clastic rocks and granitic rocks in the northwest area

(a)—甘肃酒泉青稞地砂岩盐风化穴;(b)—内蒙古西部狼山南麓白垩纪砂岩盐风化穴;(c)—甘肃酒泉青稞地砂岩盐风化穴;(d)—内蒙古西部狼山南麓白垩纪砂岩微型风化穴;(e)—内蒙古狼山南麓大型盐风化穴;(f)—内蒙古狼山南麓含砾砂岩盐风化穴及碎屑物;(g)—巴丹吉林沙漠片麻岩盐风化穴;(h)—甘肃玉门北山条带状混合岩表面盐风化穴

(a), (c): Salt weathering tafoni on sandstone outcrop in Qingkedi, Jiuquan, Gansu; (b), (d), (e), (f): Salt weathering tafoni on the sandstone outcrops in southern piedmont of Mount Langshan, Inner Mongolia; (g): Tafone on gneiss outcrop in the margin of BadanJaran Desert, Inner Mongolia; (h): Tafone on the migmatite outcrop in Beishan, Yumen, Gansu Province

导致风化穴的形成。

(2)顶部多余的雨水经过该侧面向下流淌所经过的地方往往缺少盐类结晶而形成突出的脊,而且一般上下延伸而分隔两侧的风化穴(图 3a、c、)。原因是:流水带走了这里的盐分而无多余的盐分结晶。这些上下延伸的突脊与岩性差异和节理等造成的突脊相互交织,构成盐风化穴的隔档,也就是前人所说的石格子的棱(图 3d)。

(3)能渗水的解理缝经过的地方不但不形成风化穴,反而相对于两边的风化穴而突出。这是因为:雨水下渗过程中将裂缝附近岩石孔隙中的盐分带走,干燥后也没有多余的盐分结晶,而且相对于其他部位干燥过程也滞后,于是就相对突出了(图 3b)。

(4)盐风化穴往往发育于厚层砂岩的下部或底部,这是因为一般雨水很难彻底浸透厚层砂岩,而少量携带盐分的潮湿水汽通过毛细作用从下部旁侧地表渗到露头下方时就很容易蒸发而造成盐分结晶,于是总在露头岩块的下方形成风化穴并向内向上拓展(图 3e、f)。这些巨大的风化穴可以成为野生动物的避难所,甚至成为古人类的居所。

(5)盐风化穴多位于突起露头的南坡或山脉的南坡背风处(图 3a—e, g—h),而个别露头盐风化穴发育于露头北侧,那是因为厚砂岩层向南倾斜而使北侧成为下方的避雨面(图 3f)。

(6)盐风化穴的内壁上往往有白色的盐类晶体粉末残留,盐类有硫酸钠和氯化钠等,有苦涩和咸味(图 3c、d)。

(7)砂岩盐风化穴内脱落的碎屑往往呈粉末状(图 3a—f),而花岗岩类风化穴内壁上可见鳞片状成片脱落(图 3g、h)。

(8)盐风化穴往往上下延伸,而盐风化脱落的碎屑就堆积于风化穴的底部(图 3),说明这些风化穴的形成与风蚀无关,因为风蚀痕是横向发育的而且规模不大(图 4d)。

### 2.3　盐风化作用在北方半干旱气候带的表现

华北半干旱区没有西北干旱,所以其盐风化形成的地貌景观保留的也较少,但一旦发育就有特色。笔者等选择山西黎城黄崖洞地质公园景点新元古界砂岩(图 4a、b)、山西临县曲峪镇开阳村“黄河浮雕壁画”景点和内蒙古赤峰北部花岗岩(图 4c—f)为例,介绍盐风化在这些地区的表现形式及其与风蚀痕的主要差别。

山西黎城黄崖洞地质公园内出露的新元古界砂岩被纵横交错的断裂沟谷切割出很多陡崖,而崖壁上可见不规则分布的凹坑,以前都被当作风蚀坑看待,其实是典型的盐风化穴(图 4a、b)。仔细观察可见沉积岩的层理,而这些风化穴虽然散乱但却沿着特定的层位发育,而遇到某些薄层时风化穴就会出现水平的隔档(如图 4b 中所示),这是某些薄层粉砂质泥岩不透水造成的。这些薄层无法提供盐分进入并结晶的空间,因此不受盐风化的影响,而那些颗粒相对粗大、孔隙度适中且连通好的层段就容易受盐风化的影响而形成明显的盐风化穴(图 4a、b)。因岩石物性差异而造成盐风化穴的选择性发育,这便是典型的差异风化现象。同时还应注意的是,盐风化一般在陡崖的底部容易发育,而崖壁上这些风化穴之所以没有发育成大型洞穴,主要是地壳运动造成该处岩层相对快速的上升,一旦上升而离开地面抬高,降水造成的陡崖底部毛细扩散及潮湿小气候无法影响,盐风化作用也就基本停止了。如果某些层位恰好长时间处于地面附近就会遭受明显的盐风化作用而导致整层凹进(即掏蚀作用 Undercutting),水平延伸的洞穴发育过大时就会导致上方岩层的崩塌,这也是太行山台阶式地貌形成的机制之一。这些微地貌景观发现于深邃沟谷的崖壁上,基本上没有大风侵蚀,所以这些风化穴的形成与风蚀无关。

黄河在山西临县与陕西佳县交界处切割出深深的峡谷,在河谷北东侧陡峭的砂岩谷壁上发育了十分壮观的风化穴,被称为“黄河浮雕壁画”,百度上查阅这个景点,多被看作是流水和风共同侵蚀的结果,故有人称其为“水蚀地貌”。然而,这里的风化

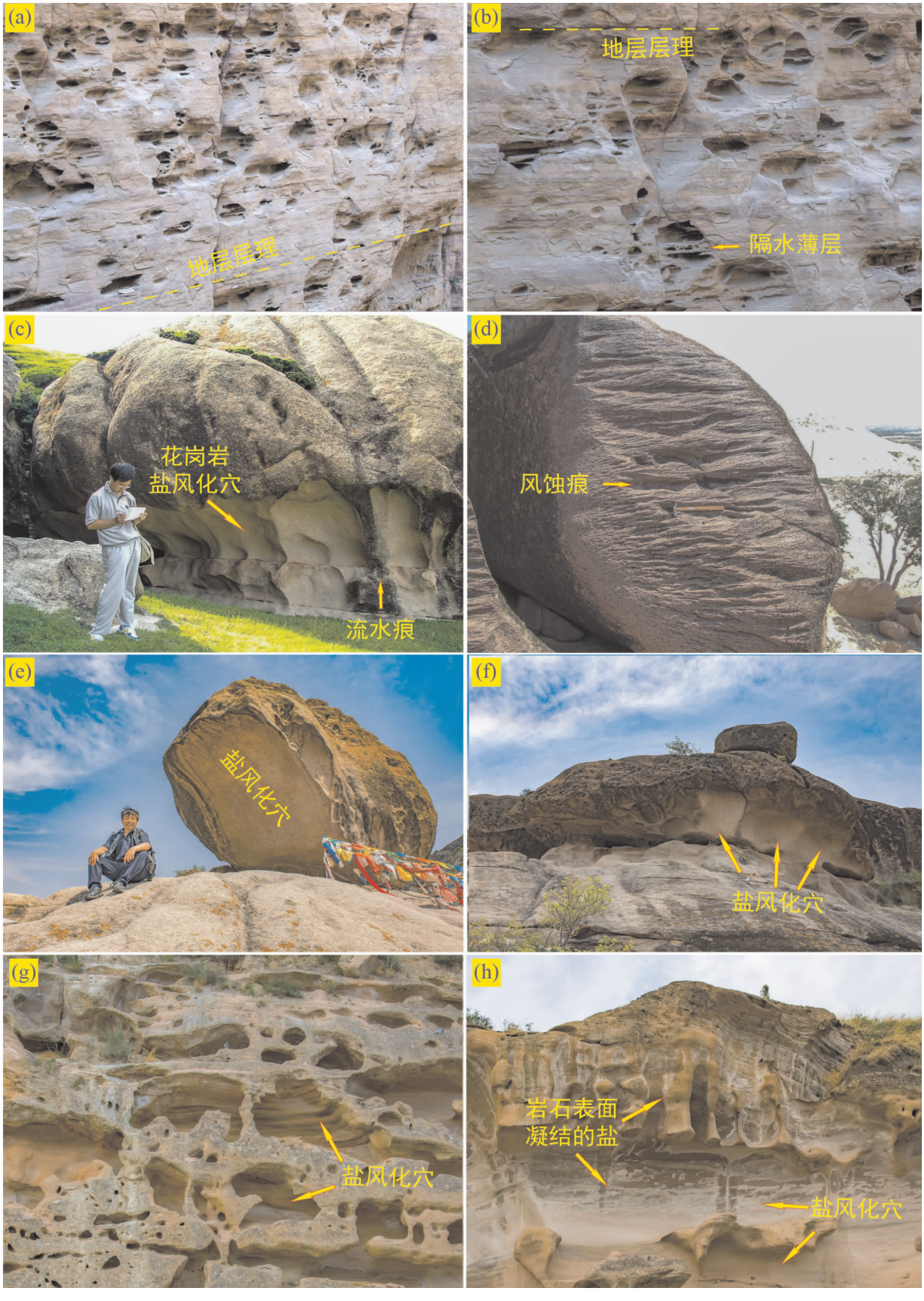

(a)
地层层理
(b)
地层层理
隔水薄层
(c)
花岗岩
盐风化穴
流水痕
(d)
风蚀痕
(e)
盐风化穴
(f)
盐风化穴
(g)
盐风化穴
(h)
岩石表面
凝结的盐
盐风化穴

图 4 中国北方半干旱地区岩石露头的盐风化穴与风蚀痕对比

Fig. 4 Different salt weathering tafoni in the semiarid area compared to eolian erosion marks in the north of China

(a),(b)—山西黎城新元古界砂岩陡壁上发育的盐风化穴(视域宽度大约 5m);(c)—内蒙古赤峰巴林左旗花岗岩陡崖下部发育的盐风化穴;(d)—赤峰勃隆克沙地花岗岩侧面保留的风蚀痕,(a—d,吕洪波摄);(e)、(f)—赤峰巴林左旗真寂之寺花岗岩侧面的盐风化穴;(g)、(h)—山西临县曲峪镇黄河谷壁上发育的盐风化穴,部分风化穴内壁上可见白色的盐晶粉末(视域宽度大约 6m)(e—h,苏德辰摄)

(a), (b): Salt weathering tafoni on the Neoproterozoic sandstone cliff in Licheng, Shanxi (the scope is 5m wide); (c): Tafoni in the lower side of granite outcrop in Balinzuoqi, Chifeng, Inner Mongolia; (d): Eolian erosion marks on the side of a granite boulder in Bolongke Desert, Chifeng, Inner Mongolia (Photos by LüHongbo); (e), (f): Salt weathering tafoni on the granite outcrop in Balinzuoqi, Chifeng, Inner Mongolia; (g), (h): Salt weathering tafoni on the sandstone cliff of Yellow River in Quyu, Linxian County, Shanxi Province (the scope is 6m wide. See the white salt powder on the sandstone surface, photos by Su Dechen)

穴恰恰不是水蚀的,而是典型的盐风化作用的结果(图 4g、h)。水面附近虽然有掏蚀凹槽,但却没有起伏不平的风化穴,离开水面向上却发育了大小不等的风化穴:含盐溶液选择特定的可渗层段渗透和结晶而导致风化穴只在某些层段发育,而雨水从崖顶向下流淌所经过的地方因没有多余的盐分结晶而不受盐风化影响就形成大致垂向的突脊。这些不受盐风化影响的纵横交错的突脊隔开了凹进的风化穴,构成典型的"石格子"图案,使该景区成为中国北方半干旱气候带盐风化作用的典型代表。

赤峰北部巴林左旗真寂之寺景区有大片的燕山期花岗岩出露,由于上方雨水的下渗和底部地面潮气的毛细作用,在很多陡崖底部都发育深度凹进的风化穴,而这些风化穴也经常被人误认为是风蚀作用的结果。事实上,这是典型的盐风化穴(图 4c、e、f),风化穴上方突出的岩石表面呈现出黑褐色(岩石漆和有机质),表明其受到盐风化作用的影响很小,而风化穴发育的凹进部位呈现出新鲜的土黄色,表明其一直遭受盐风化作用,风化穴还在继续凹进扩大(图 4c、e、f)。雨水经过的部位则相对突出,那是因为流水导致盐分被带走而没有盐类结晶,因此就不受盐风化的影响而相对凸出(图 4c、e、f)。这些大型的风化穴常常成为山区牧羊人避雨的场所,其新鲜的风化表面都是岩石颗粒掉落后形成的粗糙面,而非风蚀形成的光滑表面。看看赤峰北部勃隆克沙地上的花岗岩大岩块侧面,因受到强烈的风沙打磨而表现为横向延伸的风蚀痕平行于风向分布,而且表面光滑(图 4d),就很容易将风蚀作用和盐风化作用区分开来了。

从赤峰北部的大兴安岭南段一直延伸到黑龙江伊春一带,花岗岩和碎屑岩露头上的盐风化穴广泛发育,以前多被看作风蚀穴,此处不再举例。

### 2.4　盐风化作用在东南湿热气候带的表现

中国东南湿热气候带与海岸带的风化环境有些相似,处于相对潮湿而且干湿交替比较频繁的小环境中。然而,与海岸带不同的是空气中的盐分相对少些,而干旱的程度又比北方半干旱区弱得多,相反却雨量充沛,所以盐风化形成的地貌景观常常受到过量雨水的破坏而给盐风化地貌的识别增加了难度。笔者等选择广东丹霞山地质公园中的风化穴作为典型实例,探讨湿热气候带的盐风化作用。

广东丹霞山地质公园内多处绝壁上发育大量的风化穴,其中大者直径数十厘米甚至超过 1 m 而形成大型洞穴,小的直径仅数厘米而形成蜂窝石构造,往往都集中分布于流水作用不能直接侵蚀的部位,而其成因一直没有得到很好的解释。

朱诚等近年来探讨了广东丹霞地貌的成因,认为丹霞地貌形成时气候条件与今天的差别巨大;而对于景区洞穴的成因,认为是岩性导致的差异侵蚀、化学溶解和重结晶、冻融作用、酸腐蚀、风化作用、河流的侧向侵蚀、构造抬升等综合作用的结果(Zhu Cheng et al., 2015),但他们全文都没有谈及盐风化作用。谭艳等的中文文章也阐述了类似的认识,但在讨论蜂窝石构造时却明确排除了盐风化的作用,理由是他们于 2011 年 6 月 15 日在"玉女拦江洞"内采集蜂窝石构造发育处的砂岩之全岩分析结果显示:硫酸钠、硫酸镁和氯化钙含量都很低(谭艳等,2015)。

事实上,丹霞山地貌虽然是多种因素促成的,但不同因素导致的地貌景观形成方式还是容易区分的,其中砂岩崖面上的洞穴主要就是盐风化造成的,而这种作用自从砂岩露出地表开始就一直影响着该区地貌景观的发育与演化。这里的盐风化作用可以归纳成如下几条规律:

(1)盐风化选择岩性和岩石结构发育,首先在那些孔隙度适中且渗透性好的层段发育,而渗透性不好的层段就基本上不发育,表现出典型的差异风化特征。在丹霞山地区,白垩系丹霞组中的数层巨

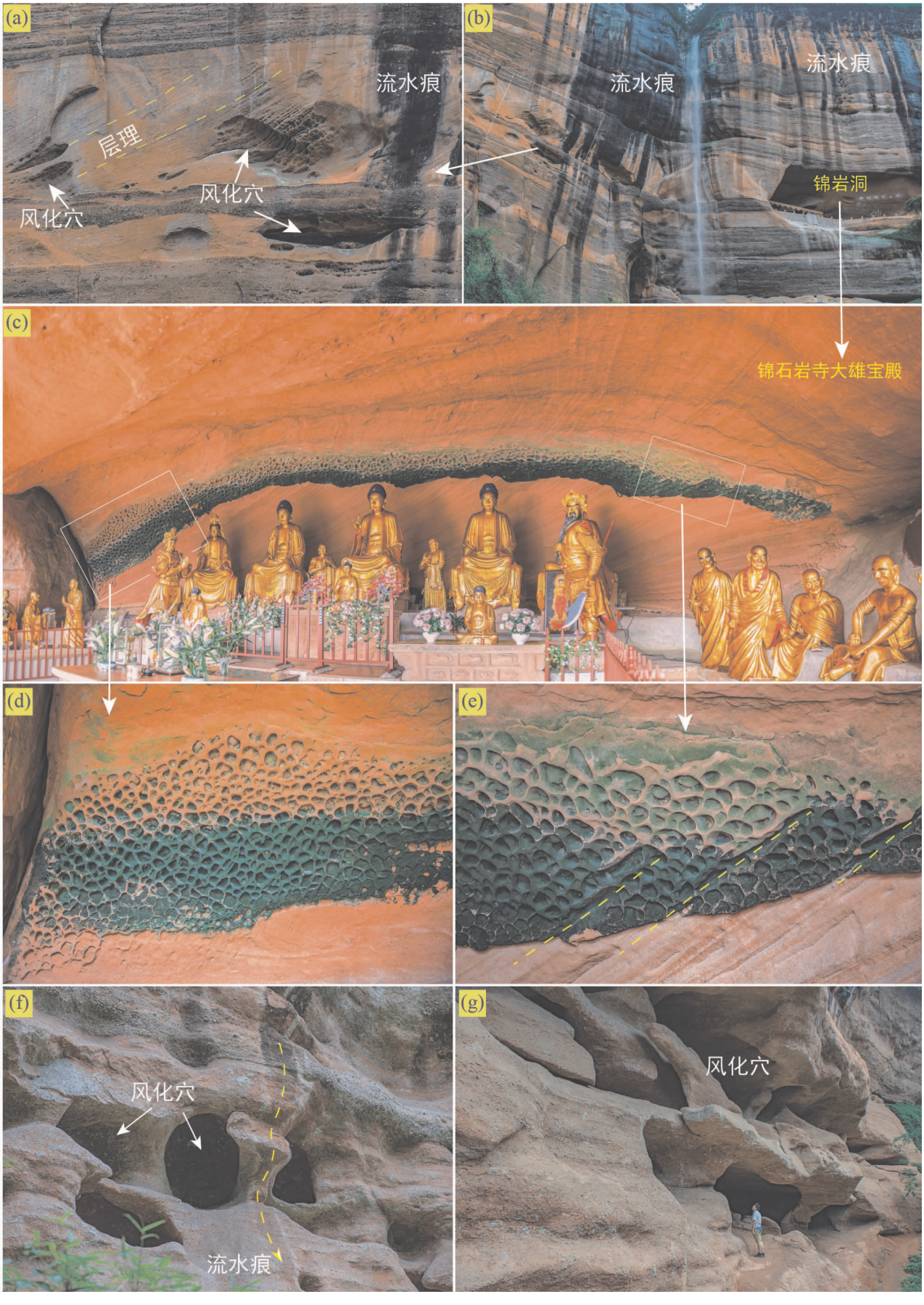

(a)
流水痕
层理
风化穴
风化穴
(b)
流水痕
流水痕
锦岩洞
(c)
锦石岩寺大雄宝殿
(d)
(e)
(f)
风化穴
流水痕
(g)
风化穴

图 5 广东丹霞世界地质公园各种形态的风化穴

Fig. 4 Different tafoni found in the Danxia Global Geopark

(a)、(b)—锦石岩大崖壁,由砂岩与砾岩互层而成,相对高差约 200 m,"赤壁丹崖"的命名地,盐风化穴选择性分布,主要发育在厚层砂岩中;(c)—长老峰锦岩洞大型风化穴,洞体沿崖壁走向长 22 m,向外向内深达 20 m,洞口处高 8 m,洞内高度近 5 m,为锦石岩寺的大雄宝殿;洞的内壁上分布着长条状的蜂窝状洞穴。(d)、(e)—洞穴顶部的小型蜂窝石构造,蜂窝洞穴外壁的绿色是微生物生长的痕迹;(f)、(g)—大型的盐风化穴及雨水流淌痕迹,流水经过处不利于风化穴的形成。

(a), (b): Tafoni selectively developed on the sandstone beds in the Jinshiyan Cliff; (c): Huge tafoni (22 m in length, 22 m in depth and 8 m in height) called Jinyan Cave in Zhanglao Peak; (d), (e): Honeycomb weathering structures on the ceiling of the huge tafoni, partly covered with green algae; (f), (g): Large tafoni and water flow traces in between

厚层砂岩是盐风化作用发育最佳层位。图 5(a、b)是丹霞组砂岩中正在发展中的风化穴,这些风化穴明显选择层段分布:首先选择在发育大型前积纹层的巨厚层砂岩中分布(如:锦岩洞,图 5b),而在这巨厚层砂岩内部也是选择前积纹层中孔隙度及渗透性适当的细层发育(图 5a)。这与前述山西黎城黄崖洞新元古界砂岩中的风化穴成因相似,那些渗透性不好的薄层泥质粉砂岩或粉砂质泥岩无法提供盐分进入并结晶的空间,因此不受盐风化的影响,也就相对突出了(图 5a、b)。

(2)盐风化作用首先在砂岩陡崖的基底部位发育,那里不仅有陡崖侧壁被雨水打湿的水分向下渗透,水分的另一个可能更主要的来源是陡崖底部附近地面降水通过毛细带向上扩散,含盐溶液渗透到陡崖基部开始蒸发,导致盐类在表面及浅层结晶,盐晶将碎屑岩表面的颗粒撑掉,于是粉化的碎屑就堆积在附近,大雨时这些堆积的碎屑(图 5g)就会被冲走。日久天长,陡崖根部的盐风化穴就向内部延伸并向上扩展,对陡崖构成掏蚀作用(Undercutting),于是形成大型洞穴(图 5b、c)。随着陡崖基部坍塌的碎石被降水冲走以及下切作用,陡崖随着地壳运动继续上升,原来形成的洞穴就随着陡崖一起离开基部而上升,到达上部更高的位置后,盐风化的速率就减低了。

(3)与其他地方的盐风化作用一样,降水或流水直接冲刷的地方盐风化作用减弱,即使孔隙度适中且渗透性好的层段一旦经常有流水经过,盐类被水带走而无法在此结晶,于是盐风化作用就减弱,因此就相对突出而构成盐风化穴的隔档(图 5b、5f),而没有水流冲刷的地方就容易发育大型风化穴(图 5b、c、f、g)。

(4)由于季节和天气变化,风化穴内频繁受到潮湿气体侵袭和干燥小气候的蒸发作用,在洞穴顶板内侧边缘即可形成小型盐风化穴—蜂窝石构造(图 5c、d、e)。在顶板上方含盐渗水和携带盐分的潮湿气体的侵袭下,洞穴的顶板内侧表皮砂岩孔隙吸附了含盐溶液,不均匀干燥导致密集的干燥中心形成,于是一个个过饱和的表面附近有盐类结晶而撑破表面砂岩颗粒,形成蜂窝石构造雏形。一旦形成蜂窝石雏形,进一步受潮的水汽如果过多就会在突出的棱脊处向下滴,而相对凹进的部分因先失水而干燥导致盐类继续结晶,于是蜂窝石的深度就增加了。在特别潮湿的雨季(如:黄梅天)洞穴顶板常常布满水汽甚至连续的水膜,为藻类及微生物提供了适宜的小环境,于是在蜂窝状微型风化穴内部甚至整个表面生长了绿色的藻类,远远望去好像镶着一幅挂毯(图 5c、d、e),此时盐类就很少结晶而蜂窝状风化就会暂时停止,盐风化作用要等待下一个更强的干燥期才能继续进行。

(5)大型洞穴顶板的鳞片状脱落是洞穴向上扩展的主要方式。蜂窝状风化穴的水分主要来自洞穴内的潮气,因此影响深度有限(一般几厘米),当反复的干湿交替后,部分蜂窝石构造就成片脱落,于是在新露出的平面顶板上再次发育小型蜂窝状风化穴。如此往复导致洞穴向顶部扩大(图 5c、d、e)。

当然,盐风化作用不断受到雨水冲刷等因素和植被繁殖(如:图 5a、b、f 崖壁上的有机质层)的影响,但这类风化穴的形成主要是盐风化作用造成的。

## 3　结论

盐风化是一种在陆地上普遍存在的物理风化,也是差异风化的重要形式之一。干湿交替的局部气候和来自空中的盐分是造成盐风化的基本条件,而岩石发育可渗孔隙或微裂隙是必要的物性条件。容易受到盐风化影响的岩石包括:碎屑岩类(砂岩或砾岩)和花岗岩类(包括粗粒花岗岩、片麻岩、混合岩等)。盐风化的过程是:含盐溶液在靠近岩石露头表层的孔隙或微裂隙中因蒸发过饱和而导致盐类结晶,结晶力将盐晶周围的岩石碎屑颗粒撑开而脱落,因而逐渐形成风化穴。雨水冲刷的岩石表面没

有多余的盐分结晶因而盐风化相对就弱,故形成分隔盐风化穴的隔档。破坏力最大的盐类是硫酸钠,其次是碳酸钠和氯化钠等。

盐风化作用在中国大陆和岛屿上普遍存在,但在不同气候带的表现形式有所差异。其中:在东部沿海和台湾岛等海岸带的碎屑岩表面容易形成蜂窝石构造,而在花岗岩类巨大岩块的不被海水打湿的侧面则可形成大型风化穴;在西北干旱气候带和华北半干旱气候带,大型砂岩露头的向阳坡或陡崖的向阳面容易形成大型盐风化穴,而在花岗岩、片麻岩或混合岩露头的南坡或不受雨水淋湿的凹进面也可形成巨大的盐风化穴;在南方湿热气候带的砂岩陡崖或不受雨水直接淋湿的岩块侧面也可形成盐风化穴,当盐风化穴选择某些层段扩大而形成大型洞穴时,其内部若受到潮湿水汽的反复侵袭可以在适当部位形成小型蜂窝石构造,小型蜂窝石构造的周期性发育和脱落是湿热气候带大型风化穴向上扩大的方式之一。湿热气候带的风化穴常常受到雨水流淌等因素的改造。

盐风化作用在地学界一直被忽视,其所形成的地貌景观更是被广泛地误读为风蚀或水蚀的结果。然而,尽管水在盐风化作用中是重要的介质,风也能促进盐风化作用的进行,但盐风化穴的形成却与水蚀和风蚀作用无关,必须严格区分开来。我们呼吁地学界的同仁们通过最新的研究将盐风化的概念更新到《普通地质学》、《地貌学》等相关教材中,通过新的科普作品对过去错误的解释予以更正。

**致谢**:山西省临县曲峪镇开阳村的郭千峰先生提供了景点位置等信息并在补拍照片时提供了帮助;野外考察过程中获得中国石油大学、赤峰学院部分师生和中国地质科学院同仁的陪同,赤峰真寂之寺景区、广东丹霞山地质公园等提供了考察之便。笔者等在此深表谢意。

## 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)

曹伯勋. 1995. 地貌学及第四纪地质学. 北京:中国地质大学出版社: 1 ~ 288.

吕洪波. 2014a. 红岩怪石—酒泉青稞地, 科学画报,(1):38 ~ 39.

吕洪波. 2014b. 甘肃酒泉青稞地—鲜为人知的红层盐风化地貌[OL]. [2017-06-10] http://blog. sciencenet. cn/blog - 39040 - 781198. html

吕洪波. 2016. 地球科学概论(英语第二版). 东营: 中国石油大学出版社: 1 ~ 506.

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,15(2):182 ~ 187.

舒良树. 2010. 普通地质学(第三版). 北京:地质出版社: 1 ~ 292.

谭艳,朱诚,吴立,孙伟,王晓翠,贾天骄,彭华,侯荣丰. 2015. 广东丹霞山砂岩蜂窝状洞穴及白斑成因. 山地学报,33(3):279 ~ 287.

徐叔鹰. 1993. 干旱区盐风化过程的初步研究. 干旱区地理,16(2): 14 ~ 20.

Angeli M, Hébert R, Menéndez B, David C, Bigas J P. 2010. Influence of temperature and salt concentration on the salt weathering of a sedimentary stone with sodium sulfate. Engineering Geology, 115: 193 ~ 199.

Aref M A M, El-Khority E, Hamdan M A. 2002. The role of salt weathering in the origin of the Qattara Depression, Western Desert, Egypt. Geomorphology, 45: 181 ~ 195.

Benavente D, Garcia-del-Cura M A, Bernabeu A, Ordonez S. 2001. Quantification of salt weathering in porous stones using an experimental continuous partial immersion method. Engineering Geology, 59: 313 ~ 325.

Benavente D, Martinez-Martinez J, Cueto N, García-del-Cura M A. 2007. Salt weathering in dual-porosity building dolostones. Engineering Geology, 94: 215 ~ 226.

Cao Boxun. 1995#. Geomorphology and Quaternary Geology. Beijing: China University of Geosciences Press: 1 ~ 288.

Cardell C, Rivas T, Mosquera M J, Birginie J M, Moropoulou A, Prieto B, Silva B, Van Grieken R. 2003. Patterns of damage in igneous and sedimentary rocks under conditions simulating sea-salt weathering. Earth Surface Processes and Landforms, 28: 1 ~ 14.

Chabas A, Jeannette D, Lefevre R A. 2000. Crystallization and dissolution of airborne sea-salts on weathered marble in a coastal environment at Delos (Cyclades-Greece). Atmospheric Environment, 34: 219 ~ 224.

Coeur C L. 2014. Scenic granitic landscapes of Corsica. In: Fort M, Andre M-F. (eds). Landscapes and landforms of France. Heidelberg: Springer Dordrecht: 241 ~ 249.

Cooke R U, Smalley I J. 1968. Salt weathering in Deserts. Nature, 220: 1226 ~ 1227. doi:10.1038/2201226a0

Cooke R U. 1979. Laboratory simulation of salt weathering processes in arid environments. Earth Surface Processes and Landforms, 4 (4): 347 ~ 359.

Cooke R U. 1981. Salt weathering in deserts. Proceedings of the Geologists' Association, 92 (1): 1 ~ 16.

Doehne E. 2002. Salt weathering: a selective review. Geological Society, London, Special Publications, 205: 51 ~ 64.

French H M, Guglielmin M. 1999. Observations on the Ice-Marginal, Periglacial Geomorphology of Terra Nova Bay, Northern Victoria Land, Antarctica. Permafrost and Periglacial Processes, 10: 331 ~ 347.

Gary M, McAfee R Jr, Wolf C L. 1973. Glossary of Geology. Washington: American Geological Institute, 1 ~ 805.

Goudie A S, Wright E, Viles H A. 2002. The roles of salt (sodium nitrate) and fog in weathering: a laboratory simulation of conditions in northern Atacama Desert, Chile. Catena, 48: 255 ~ 266.

Goudie A S. 1999. Experimental salt weathering of limestones in relation to rock properties. Earth Surface Processes and Landforms, 24: 715 ~ 724.

Goudie A S. 2004. Encyclopedia of Geomorphology (Volume 1). New York: Routledge: 1 ~ 1155.

Goudie H A, and Parker V A G. 1997. Monitoring of rapid salt weathering in the central Namib Desert using limestone blocks. Journal of Arid Environments, 37 (4): 581 ~598.

Harvey A. 2012. Introducing geomorphology, a guide to landforms and processes. Edinburgh: Dunedin Academic Press : 1 ~124.

Jagoutz E. 2006. Salt-induced rock fragmentation on Mars: the role of salt in the weathering of Martian rocks. Advances in Space Research, 38: 696 ~700.

Jiang Guanghui, Guo Fang, Polk J S. 2015. Salt transport and weathering processes in a sandstone cultural relic, North China. Carbonates Evaporites, 30: 69 ~76.

Kuchitsu N, Ishizaki T, Nishiura T. 1999. Salt weathering of the brick monuments in Ayutthaya, Thailand. Engineering Geology, 55: 91 ~99.

Kwaad F J P M. 1970. Experiments on the granular disintegration of granite by salt action. In: University of Amsterdam Fysiche Geographie en Bodernkunding Lab, Publication 16, From field to laboratory: 67 ~80. 【Feb. 11, 2017】: http://www. kwaad. net/Salt - weathering. html.

Labus M, Bochen J. 2012. Sandstone degradation: an experimental study of accelerated weathering. Environmental Earth Sciences, 67: 2027 ~2042.

Lindstrom N, Heitmann N, Linnow K, Steiger M. 2015. Crystallization behavior of $NaNO_3$—$Na_2SO_4$ salt mixtures in sandstone and comparison to single salt behavior. Applied Geochemistry, 63: 116 ~132.

López-Arce P, Varas-Muriel M J, Fernández-Revuelta B, Alvarez de Buergo M. 2010. Artificial weathering of Spanish granites subjected to salt crystallization tests: surface roughness quantification. Catena, 83: 170 ~185.

Lü Hongbo. 2014a#. Redrock hoodoos in Qingkedi, Jiuquan, Gansu Province. Scientific Pictorial, (1): 38 ~39.

Lü Hongbo. 2014b #. Qingkedi in Jiuquan——a newly found salt weathering landform. In: Hongbo Lu's blog. 【2017-06-10】 http://blog. sciencenet. cn/blog - 39040 - 781198. html

Lü Hongbo. 2016. An Outline of Earth Sciences (Second Edition). Dongying: China Uinversity of Petroleum Press, 1 ~506.

Mustoe G E. 1982. The origin of honeycomb weathering. The Geological Society of America Bulletin, 93 (2): 108 ~115.

Paradise T R. 2013. Tafoni and Other Rock Basins. In: Shroder J F. ed. Treatise on Geomorphology, 4: 111 ~ 126. San Diego: Academic Press.

Qu Jianjun, Zhang Mingquan, Zhang Weimin, Wang Yuanping, Dai Fengjun, Zhang Huyuan, and Zeng Zhengzhong. 1995&. Apreliminary study on weathering process of salt in rock body at Mogao Grottes, Dunhuang. Scientia Geogrphica Sinica, 15 (2): 182 ~187.

Robinson D A, Jerwood L C. 1987. Frost and salt weathering of chalk shore platforms near Brighton, Sussex, U. K. Transactions of the Institute of British Geographers, 12 (2): 217 ~226.

Rodriguez-Navarro C, Doehne E, Sebastian E. 1999. Origins of honeycomb weathering: the role of salts and wind. Geological Society of America Bulletin, 111 (8): 1250 ~1255.

Rodriguez-Navarro C, Doehne E. 1999. Salt weathering: influence of evaporation rate, supersaturation and crystallization pattern. Earth Surface Processes and Landforms, 24 (3): 191 ~209.

Rutter N, Edwards R S. 1967. Deposition of air-borne marine salt at different sites over the college farm, Aberystwyth (Wales), in relation to wind and weather. Agricultural Meteorology, 5: 235 ~254.

Shu Liangshu. 2010#. Physical Geology. Beijing: Geological Press: 1 ~292.

Skinner B J, Porter S C. 1989. The dynamic Earth—an introduction to physical geology. New York: John Wiley& Sons: 1 ~541.

Smith B J, McGreevy J P. 1988. Contour scaling of a sandstone by salt weathering under simulated hot desert conditions. Earth Surface Processes and Landforms, 13 (8): 697 ~705.

Tan Yan, Zhu Cheng, Wu Li, Sun Wei, Wang Xiaocui, Jia Tianjiao, Peng Hua, Hou Rongfeng. 2015&. Geomophogenisis on sandstone honeycombs and white spot in the Mt. Danxiashan, Guangdong Province, South China. Mountain Research, 33 (3): 279 ~287.

Viles H A, Goudie A S. 2007. Rapid salt weathering in the coastal Namib desert: implications for landscape development. Geomorphology, 85: 49 ~62.

Wang Zhenting, An Zhishan. 2016. A simple theoretical approach to the thermal expansion mechanism of salt weathering. Catena, 147: 695 ~698.

Warke P A, Smith B J. 2000. Salt distribution in clay-rich weathered sandstone. Earth Surface Processes and Landforms, 25 (12): 1333 ~1342.

Wellman H W, Wilson A T. 1965. Salt weathering, a neglected geological erosive agent in coastal and arid environments. Nature, 205 (4976): 1097 ~1098.

Xu Shuying. 1993&. Preliminary study on the salt weathering process in arid area. Arid Land Geography, 16 (2): 14 ~20.

Yaalon D H. 1982. Salt weathering. Beaches and coastal geology. In: Encyclopedia of Earth Science: 708 ~709. ISBN: 978 - 0 - 87933 - 213 - 6 (Print) 978 - 0 - 387 - 30843 - 2 (Online)

Young R, Young A. 1992. Sandstone Landforms (Springer Series in Physical Environment, 11). Berlin: Springer-Verlag: 1 ~163.

Zhu Cheng, Wu Li, Zhu Tongxin, Hou Rongfeng, Hu Zhinong, Tan Yan, Sun Wei, Jia Tianjiao, Peng Hua. 2015. Experimental studies on the Danxia landscape morphogenesis in Mt. Danxiashan, South China. Journal of Geography Sciences, 25 (8): 943 ~966.

# Landform Features of Salt Weathering in Different Climatic Zones in China

LÜ Hongbo[1], SU Dechen[2], ZHANG Yuxu[3], FENG Xuedong[1], LI Chunwang[4]

1) *School of Geosciences, China University of Petroleum , Qingdao, Shandong*, 266580;

2) *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing*, 100037;

3) *Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing*, 100037;

4) *Teachers Training School of Mentougou District, Beijing*, 102300

**Abstract**: Salt weathering is a type of physical weathering existing almost everywhere on the world land, damaging surface of rocks and building stones, forming geomorphological sceneries, such as tafoni or honeycomb structures because of the periodical salt crystal growth. Salt weathering is also one of the major forms of differential weathering. However, salt weathering process has been largely neglected by geologists and geographers and almost all the landscapes formed by salt weathering in China have been misinterpreted as the results of surf wash, running water erosion or eolian erosion etc. After almost a decade of field investigation, the authors of this paper have thoroughly understood the origin and mechanism of salt weathering. In this paper, several salt weathering scenarios have been selected from seacoast areas in Qingdao and Taiwan, arid areas in the northwest, semiarid areas in the north, humid areas in the south, of China. All these examples are discussed here to systematically demonstrate the mechanism of salt weathering and its behaviors in different climatic zones. The favorable conditions for salt weathering are the supply of soluble salts (such as $Na_2SO_4$, and NaCl) and the repeated change in temperature and humidity; and the suitable host rocks to provide the pore spaces and micro-cracks for the saline solution to seep in and for the solid salts to crystallize are sandstones and conglomerates, granites and gneisses etc. Salt weathering commonly results in the formation of honeycomb structures on the surface of sandstone bedrocks and large tafoni on the vertical or near-vertical sides of granite outcrops along the coast area above sea level, the formation of tafoni of different sizes on the sunny sides of sandstone or granite/gneiss outcrops where there is little rainfall attacking in the arid and semiarid inland areas, and the formation of large tafoni/caverns or honeycomb structures on the sandstone cliffs of humid areas in southern China where rainfall frequently impacts the outcrop surfaces. We can conclude that salt weathering plays an important role in making the natural landforms or corroding the building stones. We should pay attention to the universal nature of salt weathering, update salt weathering information in the related geological textbooks or treatise, popularize the geological science to clear up the misunderstanding of salt weathering via all kinds of media.

**Keywords**: salt weathering, sandstone, granite, gneiss, honeycomb structure, tafoni, differential weathering.

**Acknowledgements**: We are grateful to Mr. Guo Qianfeng, a peasant in Linxian County, Shanxi Province for the information of tafoni site on the cliff of Yellow River. A special thank has to be given to Danxiashan Global Geopark in Guangdong and Zhenjizhisi Temple in Chifeng for their convenience. We are also grateful to many of our colleagues who had accompanied us during the field investigation.

**First author**: LÜ Hongbo, male, born in 1957, Professor of geology, engaged in structural geology, tectonics, sedimentology, Quaternary geology etc. Email: luhongbogeo@163.com; hongbolu@upc.edu.cn

Manuscript received on: 2017-03-06; Accepted on: 2017-06-16; Edited by: LIU Zhiqiang

**Doi**: 10.16509/j.georeview.2017.04.006