

# 建筑物风化与地貌学研究<sup>\*</sup>

朱立平

(中国科学院地理研究所, 北京 100101)

**提 要** 岩石风化是地貌学研究的重要内容, 但对其机制的研究也可应用于建筑物风化及其抗蚀性的领域。本文从岩石风化研究的角度出发, 参考了大量建筑物风化研究的有关文献, 认为建筑物风化研究的思想和实践对地貌学的风化理论研究有重要的借鉴意义。同时认为, 在环境污染日益严重的今天, 岩石风化研究不应该仅仅局限于地貌学理论与地貌演化领域, 也应涉及建筑物风化研究的应用领域。

**关键词** 岩石风化 建筑物 地貌学研究

## 1 引言

地貌学研究通常可以从其研究对象与其它领域的相关性中得到收益, 但是在风化研究领域并未能得到较多的类似进展<sup>[14]</sup>。虽然建筑工作者 (包括建筑工程师、建筑保护工作者) 长期从事建筑材料的风化与耐用性的研究, 但是他们的研究思想、方法和与此相联系的实验工作并未被地貌学家所十分关注。因而, 从地貌学的角度出发, 参考一些建筑材料风化研究的方法及文献资料是必要的, 而且就注重这些资料的地貌学家的工作看, 他们都取得了非常重大的研究进展<sup>[10, 26]</sup>。

大多数文献资料都涉及到建筑材料的机械破坏, 因而这也就是本文的主题。可以发现, 建筑工作者特别注意寒冻和盐类风化的破坏作用, 其原因可以从历史上和现实中两方面来考虑。

一个世纪前人们开始调查建筑岩石的剥落时, 科学家们就认识到是一系列的风化作用导致了岩石结构的破坏, 但那时寒冻作用被普遍认为是最具破坏性的。因而, 解决问题的方法是选择抗冻的岩石类型。当时一个特别吸引人的方法是“盐结晶”或“强化”实验的方法。最早的模式是由 Brard 提出的, 他使用硫酸钠在岩石孔隙中结晶以取代冰的形成, 而且这也成为其它追随者的基本研究方法。虽然便利的冰箱的出现使加速冻融过程成为可能, 但耐用性研究的先驱者们的实验强有力的说明盐分结晶检测是耐用性评价的补充方法, 在某些情况下甚至是首选方法<sup>[44]</sup>。这些检测方法的应用很快从建筑岩石耐用性领域发展到水泥与混凝土抗风化性的试验<sup>[21]</sup>以及粘土质建筑材料 (砖、瓦) 的研究上, 最近几十年, 这也被用于发生剥落的建筑岩石的保护领域<sup>[2, 43]</sup>。

也有相当多的研究就是针对盐类结晶所造成的破坏, 其理由有两个: 首先, 有证据表明, 它可能是城市工业区污染环境中岩石剥落的最初原因<sup>[40]</sup>。最受影响的岩石类型是灰岩和钙质砂岩, 主要原因是以酸雨形式降下的硫酸与碳酸钙发生反应形成硫酸钙盐或者石膏。

<sup>\*</sup> 承蒙英国贝尔法斯特皇后大学地理系 W. B. Whalley 教授提供大量资料, 谨致谢意。

石膏一旦形成后, 它通常迅速地在岩石表面或表层下维持一个抗蚀性层面, 而且被认为是通过不同的盐类风化机制引起岩石剥落。尽管科学家们早就认识到这个问题<sup>[44]</sup>, 但是只有在最近 20 年由于对历史建筑物保护的关注才促使了此项研究的发展。其次, 近年来, 由于发展中国家的环境问题主要是盐渍化问题的后果, 当地的建筑活动也受到盐类风化的影响。在这种情况下, 建筑材料的盐类风化被确认为是一种严重的工程灾害, 它要求得到实际上也正得到足够的重视<sup>[10]</sup>。

建筑研究的文献中具有大量的强化实验应用的范例、污染对岩石破坏的调查以及盐渍化对发展中国家建筑的影响研究, 这些毫无疑问地将不断提供有关寒冻和盐类风化的破坏作用以及控制风化速率的因子和其控制方式的丰富信息。其它机械风化过程(例如水分引起的鱼鳞皮和温度变化导致的裂隙)虽然被视为次要性的过程, 但也得到建筑工作者的调查和考虑。

本文讨论的文献内容将集中在实地调查和室内模拟实验研究方面, 对于建筑工作者来说, 这不过是一个方面的补充, 并不能涵盖其各个方面。但是对于希望在此方面做工作的地貌学家来讲, 本文试图阐述一下所研究的对象范围。可以相信, 将建筑工作者的思想方法引入地貌学家的研究中, 将会使其研究得到重大进展。

## 2 实地调查

本文将对建筑物风化的实地调查从以下三个方面来阐述:

### 2.1 暴露试验

有以下几个原因吸引建筑工作者通过暴露试验来检测风化的效果。首先, 这可以提供评价材料结构在自然条件下遭到破坏的可靠方法, 从而为材料的选择提供合理依据; 其次, 这也可以评估不同风化环境的作用; 最后, 从模拟材料自然风化表现的实验室试验的合理性程度来看, 这也提供了有效的检验。

尽管早在一个多世纪前就有人做过一些简单的暴露实验, 但第一次有过较完整记录的实验是本世纪初 Owens 所做的<sup>[36]</sup>, 他的方法是将小的灰岩立方体暴露在伦敦市内及其周围的城市及乡村的大气中。研究的结果证明了污染的城市环境具有相对破坏作用。然而, 暴露实验也表明风化条件的比较是可以仔细区分的, 随着对材料选择的考虑和对岩石保护的评估的发展, 暴露实验的应用得到进一步阐述。由于实验室结果和材料的实地表现缺乏连续性的相关关系。目前, 暴露实验的主要意义也就在于比较并确定这种联系。最初的比较是在局部地区对水泥进行研究<sup>[24]</sup>, 但是这很快发展到更广阔的范围, 从涉及到其它的材料到扩大到一个国家的范围甚至建立了全球试验网。现在人们普遍相信暴露实验是可信的加速风化试验的关键步骤, 它可评价加速的因子, 而这些因子通常反映了模拟室外暴露条件下的实验室实验中特定材料性质发生变化后的风化率的比较<sup>[3]</sup>。Kennedy and Mather 曾做过这类评估工作<sup>[24]</sup>, 他们根据自然条件下和实验条件下风化的水泥样品的 Young 的动力学模数计算了样品物质损失的严格比例。由于实验室强化检测的内在严格性仍然不能令人满意<sup>[11]</sup>, 暴露实验仍将是建筑研究的一个非常重要的方面。

由于早期的实验主要依据原始的破坏方法和检测手段, 当时的调查不得不需要数年的时间。虽然以后的研究有时也持续同样的时间, 但对破坏程度更敏感的仪器的使用使得对

风化结果的早期探测成为可能。因而, Kennedy and Mather 用 Young 的动力学模数来测定比率的变化<sup>[24]</sup>。而在最近几年, 扫描电镜被证实是特别有效的工具。很明显, 如果用相当敏感的方法来揭示风化引起的材料性质的变化, 在不同环境条件下取得不同材料风化效果的暴露实验将不需要较长的时间。

一般来讲, 暴露实验提供了材料对自然风化条件响应的信息。为了更好地了解这种响应过程, 不仅要评价风化的效果也要区分在暴露期内造成这些结果的气候条件的特性。从这点出发必须收集气候数据资料, 进行环境指标监测。

## 2.2 环境监测

在最近二十年, 地貌专家开始注重微气候的复杂性及其对岩石风化模式的控制作用<sup>[48]</sup>。而建筑工作者早就对微气候变化的敏感性有较多的认识, 他们的研究涉及到微气候与一般的风化条件、材料的几何结构与其特性的相关关系。在这方面 Ashton and Sereda 和 Martin and Price 对这些文献都有独特的介绍和评述<sup>[4, 33]</sup>。这里值得指出的是, 其它一些研究者描述了材料实地所处的或者是在特别构建的暴露区内所处的微气候条件。一部分人试图在建筑物的可见风化类型强度和某些因素间(例如湿地模式和阴影效果)建立一般性的相关关系<sup>[7]</sup>。另一部分人研究了一些特别的气候参数, 如温度、相对湿度等, 阐述了这些因子的变化与岩石表面的方向、岩石的类型、岩石表面的颜色及岩石在构造中的位置的相互关系。

一些研究人员阐述了在材料正处的温度和湿度条件下利用预置样品获取信息的优势。通过将砖、灰浆制品和砂岩样品暴露于加拿大的两个试验场所, Ritchie and Davison 监测到 2 年多的温度和湿度变化数据, 结果表明它们的变化与地理位置、材料类型、暴露方向以及时间长度有关<sup>[42]</sup>。Carrier 等利用同样原理, 获得了混凝土桥梁和人行道内的湿度梯度数据<sup>[8]</sup>, 但是在不同时间尺度下, 就表面方向、倾斜度和表层颜色这些要素来讲, 无论是单个的还是组合在一起, 他们的研究都取得了十分好的温度记录。

## 2.3 风化效果评估

虽然这个方面在实地研究中被单独提出来, 但本节所讨论的文献大多把实地观测的风化效果与风化材料的实验室分析结合起来考虑。

科学家曾做过大量工作以研究评估寒冻作用、水分的鱼鳞剥落与收缩作用、粘土矿物的影响对岩石结构的破坏程度以及与盐分有关的岩石的破坏现象。然而, 其中只有在干热地区和污染的城市工业环境中对建筑物的盐类风化及其效果才有更为详细的讨论。

Goudie 指出, 虽然有大量的实验证据表明盐类风化的效果, 但却只有极少数是在实地条件下有关其风化速率的地貌学研究成果<sup>[19]</sup>, 所幸的是这种情况正在改变<sup>[51]</sup>, 然而参考一下建筑研究方面的文献仍然是有意义的。

在干热的地区, 许多研究者考虑了重要的考古地点的岩石结构的破坏, 他们清楚地认识到而且也阐明了建筑物本身就可以提供风化效果的丰富信息。工程研究者们在这方面做了更进一步地而且是很有应用意义的研究, Cooke 等曾对有关文献作出过详细的综述<sup>[10]</sup>。虽然 Cooke 等人认为要大量依靠工程学上的文献作为研究基础, 但是他们通过对实地盐类风化灾害的空间变化图的研究——一种属于地貌学的方法, 也将前人的地貌学工作向前推进了一步, 这说明地貌学家和建筑工作者间的相互影响不是单方面的。

污染对岩石破坏的研究一直是特别重要的, 从污染的后果来考虑, 岩石的物理和化学

性质变化一直是研究的重点。Schaffer 的研究对于城市和乡村中(特别是在英国)的建筑物岩石的风化做出了很有价值的贡献<sup>[44]</sup>。他对风化表现作了大量地描述并且分析了岩石的剥落及其原因与控制方法。在英国,还有其它一些人对城市岩石风化作出过研究<sup>[45]</sup>。同样地,对岩石建筑、碑刻的风化研究在其它欧洲城市也在进行,这些城市有雅典<sup>[46]</sup>、科隆<sup>[13]</sup>、米兰<sup>[2]</sup>、巴黎<sup>[37]</sup>、斯特拉斯堡<sup>[23]</sup>和威尼斯<sup>[16]</sup>。岩石建筑风化的研究在美国<sup>[30]</sup>和印度<sup>[18]</sup>也同样地得到开展。值得提出的是,在拉奥齐勒(1972)、博洛尼亚(1975)、雅典(1976)、巴黎(1978)和博洛尼亚(1981)分别召开的5次国际学术会议上,研究者们展示交流并讨论了大量岩石建筑风化的实例。

上述提到的大部分文献都讨论了盐分特别是石膏对岩石的破坏作用,以及这种作用发生在岩石表层的过程。同其它文献一样,这些文献也详细阐述了目前正在大量使用的评价风化所引起的岩石物理化学变化的方法。虽然,超声波检测也偶而作为实地研究的方法<sup>[34]</sup>,但是这种手段只是在实验室内比较风化和未风化岩石时才比较可信。岩石的一些物理特性(特别是与其孔隙有关的)有时是通过这种方法来检测的,例如孔隙率、通透性和孔隙大小的分布等<sup>[5]</sup>。然而,技术的发展对于分析成为最好的帮助,在这其中有薄片分析、扫描电镜观察、X光衍射和微管分析以及穆斯鲍尔光谱和X光电子光谱分析。

### 3 实验研究

建筑工程师最初致力于实验室研究是因为它能迅速地评估建筑材料的相对耐用性。然而,研究范围和方法很快超出了最初的设想,研究者们需要考虑如何获得检测结果的环境条件,在一定的风化条件下,材料为什么会有不同的反应以及不同的风化过程是如何引起岩石的破坏。因此,研究的注意力转向实验室条件下的温度和湿度控制,在确定风化表现与风化机制时材料性质的作用等。本节将从这些方面来考虑。

#### 3.1 实验室检测条件

在实验室强化实验中,温度和水分条件对材料的风化表现有着十分重要的影响。由于实验通常要获得不同于自然条件下观测到的风化效果,这就要求必须确定这些条件对自然条件的夸大或改变的过程。另外,在最近,不同的实验室根据他们自身的研究目的和思想也设计了不同的试验程序。因而得到的结果通常是相互矛盾的。这就有必要评价不同的实验条件所产生的不同结果的过程。标准化实验的发展使实验方法得到了统一,但是对实地—实验研究的比较使得人们仍需要研究温度水分在风化中的作用。另外之所以要考虑水分的影响也是与“水质”相关的,除了在相对高温下对不同的盐溶液风化效果的研究外,寒冻环境中道路的融水方式也促使了在寒冻条件下对溶液破坏作用的研究。

常见的例子是样品被放置在水中而从各个方面进行冻融的过程(也有单一方向的寒冻方式)。虽然人们一致认为严格的实验是与样品的寒冻率与吸水度有关,但是注意力常常集中在过度的寒冻率上。因而,Withey认为,为符合自然条件下的过程,寒冻率不应超过 $3.8 / \text{小时}$ <sup>[53]</sup>。在一篇常被引用的文献中,Powers认为非自然的寒冻率(在一些实验室中超过了 $3.8 / \text{小时}$ )的效果是加大了样品的负载而非加强了自然过程,同时又指出,一个样品在自然寒冻率下可能未受到寒冻破坏,但在较高的实验室寒冻率下,可能发现它对寒冻作用的抵抗是非常脆弱的。显而易见,实验室条件可以很容易地制造出自然暴露条件下

不能达到的风化效果。Powers 的观点, 后来也被其它的实验所证实<sup>[28, 42]</sup>。

为了研究水分在寒冻作用中的角色, 科学家们一直致力于确定水分的多少, 更确切地说是材料的水饱和度在寒冻条件下对样品的控制作用<sup>[15]</sup>。因而, Litvan 简单地认为材料的寒冻破坏程度是与其水分状况直接成比例的, 冻融实验样品的水分既反映了所利用的水分也反映了实验中材料的物理特性。虽然样品在实验开始时通常是完全不饱和的, 但也没有多少实验来监测实验中的水分实际变化情况。Fagerlund 提出了一个很值得注意的问题, 认为在一定吸湿时间内, 融解的过程是非常重要的, 因而在达到较高的水饱和度及最终的破坏过程中需要一定的时间<sup>[15]</sup>。

寒冻系统中盐分的介入要求在实验中要考虑另一具破坏性的控制因素, 例如, 溶液类型和浓度。Verbeck and Klieger 用氯化钙和氯化钠来研究了溶液浓度的影响, 发现浓度为 2~4% 的溶液是最具破坏性的。以后的研究者们大都支持这个观点<sup>[28]</sup>, 但是 Zaman 等提出一个例外, 认为 4% 的氯化钠溶液固然能使样品出现最大的剥落和鱼鳞卷, 但 10% 浓度或饱和的溶液却能导致强烈的物质损失。对盐分的研究中, 还有其它人研究了盐分对样品吸水能力的影响<sup>[31]</sup>。

与冻融实验相比, 在模拟自然条件的过程中, 盐分结晶的研究并未得到相应的重视, 这里明显的原因是人们最初并未认识到它与材料的抗冻性评估有关。因此, 只有一小部分研究者考虑了某些风化结果时这类实验条件的作用。盐的结晶通常是由加热在某种盐液里浸泡过的样品来获得的。最常用的盐类为硫酸镁和硫酸钠, 但是 Dibb 等认为对于某些环境来讲, 应当考虑使用其相应类型的盐 (如在海岸环境中评价材料耐久性时就应用氯化钠)。

显而易见, 盐分结晶实验的主要气候控制因素是温度。Minty 发现海水浸泡的粒玄岩在加热 48.9 ~ 65.6 时的破坏只是在 105 ~ 110 的 1/39<sup>[35]</sup>。Marschner 也发现这种现象, 指出硫酸钠浸泡样品的破坏形式是不同的, 在加热到 60 时有限的破坏只发生在表层, 达到 105 时深部的裂隙才随之发生<sup>[32]</sup>。Price 认为加热条件不同可能会导致硫酸钠在不同的岩石内结晶的程度发生变化<sup>[41]</sup>, 同时他列举了一些数据表明一些易忽视的因素对岩石的破坏同样也是非常重要的, 例如样品受热前所浸泡的溶液的温度, 在 3 ~ 35 范围内, 低温时的破坏性最大, 这可能反映了由于盐类水合所引起的破坏是非常重要的<sup>[47]</sup>。

### 3.2 材料性质与风化

为了在实地与实验条件下解释材料的风化现象并间接地对材料耐用性作出评估, 就需要研究材料性质与其风化强度的相互关系。另外, 在坚固化实验中样品性质的变化也可以提供样品风化的破坏程度。由于寒冻风化和盐类风化基本上涉及了材料的物理破坏 (虽然伴随盐溶液也发生一定的化学变化), 因而材料的物理性质受到较多的重视, 而对化学性质的研究通常涉及到与粘土矿物的关系。

研究者在材料耐用性研究中作过各种有关的强度测试, 但成功的范例却有限。然而, 在考虑试验样品的弱化过程<sup>[55]</sup>和岩石不同风化级别的特征时, 强度测定则是非常有意义的。目前, 具破坏作用的强度测定方法已经被非破坏性的超声波检测所取代, 它可以提供材料在风化过程中微裂隙的逐渐发展过程的信息<sup>[17]</sup>。

Dibb 等提出了裂隙机制的基本假定并且阐述了裂隙脆性的概念与岩石耐用性的潜在关系<sup>[11]</sup>。他们的初步研究表明, 由于这个值反映了所有岩石性质的相互作用关系, 因而裂隙的脆性应当成为岩石耐用性的一个指标。岩石的孔隙特征被认为是在耐用性研究中最具

意义的。早期的研究者们还考虑了冻融过程与盐类结晶破坏的相互关系,并提出了诸如吸湿能力与整体孔隙率等参数<sup>[1]</sup>,但是,在随后的研究中发现,孔隙大小和连续性较孔隙率更为重要<sup>[27]</sup>。在以后的寒冻风化研究中,研究者们致力于确定关键孔隙的大小,但遗憾的是并未取得一致的意见。虽然研究者们早就认识到孔隙结构与盐分结晶破坏的关系非常重要,但对这种关系的研究目前还是非常薄弱的。

材料的耐用性并不是由某一种或一组特性来确定的,因而,虽然孔隙特征受到较多注意,其它因素例如岩相与热特性也得到相应的重视。在材料耐用性的评价研究中,一些研究者认识到考虑多种特性的必要,他们采用了统计方法(例如多元回归)来建立材料特性与其耐用性间的相关关系<sup>[22]</sup>。

粘土矿物的破坏作用早就有大量的记录,这些记录在当代地貌学文献中有很多记载<sup>[52]</sup>,但是盐类风化中粘土矿物重要的作用只是在10年多前才得到足够重视。到目前为止所做的研究大多与粘土矿物膨胀所引起岩石结构的破坏有关。

## 4 风化机制

相对于盐类风化而言,建筑研究人员更关注寒冻所引起的材料破坏的机制。但对盐类风化来说,Hansen 考虑了多孔材料中盐晶生长所带来的压力的变化<sup>[20]</sup>。在前人的2篇综述中,Powers 和 Litvan 概括讨论了研究者们的工作<sup>[28,39]</sup>。Powers 研究了设想的混凝土的风化机制,提出了他个人认为的水力压力假设及其放大作用,并把它与其它假设做了比较<sup>[12]</sup>。Larson and Cady 经过独立研究,赞同 Powers 等人的观点<sup>[25]</sup>,但 Chatterji and Christensen 通过对灰岩小块体冷冻所引起的破坏过程的研究考虑了水力压力的假想,他们大胆地认为所观测到的破坏效果的原因是流体静力而非水力压力的作用<sup>[9]</sup>。Litvan 的研究涉及到多种多孔的材料,包括硅质玻璃、水泥块体和砖等,他的结论与从热动力学考虑的毛细管浸入的理论基本相同<sup>[6]</sup>。Litvan 模式的基础是吸附在固体表面的水并未冻结,因而未冻水和固体材料间的蒸汽气压使得水分进入较大的孔隙,并在此冻结。当温度以某种速率下降时,水分的散失过程并不能消除水分各相间的能量差异,因而促使水分在孔隙中形成玻璃状的冰晶,这种差异减小而岩石发生机械破坏。这个过程发生的条件是材料有较低的通透性、较高的孔隙率与饱和度和快速的冷却率。

## 5 结语

在风化理论的研究中,地貌学家在早期作出过大量的工作,取得了相当多的成果。但是,随着工业文明与城市化的发展,建筑材料的选择和珍贵建筑物的保护促使建筑领域的研究者对风化现象及其机制作出了较为深入的研究。尽管建筑工作者与地貌学家对此项研究的出发点不同,但其对象和目标是相互一致的,即都是为了解决岩石或材料的风化机制及风化速率的问题,所不同的是,建筑工作者更关心怎样从物质的风化机制中发现原因,找出防止风化的办法,而地貌学家的注意力则集中于岩石风化的速率及其产生的地貌过程。然而,不管各个学科的研究者们侧重什么,最终都要解决相同的问题,两者相互借鉴将会更有利于风化理论及其应用的进展。

## 参 考 文 献

- 1 Adams, A. and Pratt, H. A. 1945. A comparison of absorption and soundness tests on Maine sands. *Proceedings of the American Society for Testing and Materials* 45, 771 ~ 776.
- 2 Alessandrini, G., Peruzzi, R., and Giambelli, G. 1976. Tests on the effectiveness of a treatment to conserve Milan Cathedral. *Lithoclastia* 2, 17 ~ 31.
- 3 American Society for Testing and Materials. 1982. Standard practice for developing accelerated tests to aid prediction of the service life of building components and materials (Designation. E 632 ~ 681).
- 4 Ashton, H.E. and Sereda, P.J. 1982. Environment, microenvironment and durability of building materials. *Durability of Building Materials* 1, 49 ~ 65.
- 5 Baronio, G. and Cancelli, A. 1981. Behaviour of clastic rocks in polluted atmosphere. *Proceedings of the International Symposium on Weak Rock*, Tokyo, 173 ~ 178.
- 6 Blachere, J.R. and Young, J.E. 1974. Failure of capillary theory of frost damage as applied to ceramics. *Journal of the American Ceramic Society* 57, 212 ~ 216.
- 7 Camuffo, D., Del Monte, M., Sabbioni, C. and Vittori, O. 1982. Wetting, deterioration and visual features of stone surfaces in an urban area. *Atmospheric Environment* 16, 2253 ~ 2259.
- 8 Carrier, R.E., Pu, D.C. and Cady, P.D. 1975. Moisture distribution in concrete bridge decks and pavements. *Durability of Concrete*, American Concrete Institute Special Publication 47, 169 ~ 190.
- 9 Chatterji, S. and Christensen, P. 1979. A mechanism of breakdown of limestone nodules in a freeze-thaw environment. *Cement and Concrete Research* 9, 741 ~ 746.
- 10 Cooke, R.U., Brunnsden, D., Doornkamp, J. C. and Jones, D.K. C. 1982. *Urban geomorphology in drylands*. Oxford. Oxford University Press.
- 11 Dibb, T.E., Hughes, D.W. and Poole, A.B. 1983. The identification of critical factors affecting rock durability in marine environments. *Quarterly Journal of Engineering Geology* 16, 149 ~ 161.
- 12 Dunn, J.R. and Hudc, P.P. 1966. Clay, water and rock soundness. *Ohio Journal of Science* 66, 153 ~ 168.
- 13 Efes, Y. 1974. The corrosion of natural stone at the Cathedral of Cologne. *La Tribune du Cebedau* 27, 495 ~ 507.
- 14 Evans, I.S. 1970. Salt crystallization and rock weathering: a review. *Revue de Géomorphologie Dynamique* 19, 153 ~ 157.
- 15 Fagerlund, G. 1974. Critical moisture contents at freezing of porous materials. *Proceedings of the 2nd CIB/RILEM Symposium on Moisture Problems in Buildings*, Rotterdam, Vol. 2, 1 ~ 17.
- 16 Fassina, V. 1978. A survey on air pollution and deterioration of stonework in Venice. *Atmospheric Environment* 12, 2205 ~ 2211.
- 17 Filonidov, A.M. 1982. Use of ultrasound for checking the frost resistance of concrete. *Hydrotechnical Construction* 16, 239 ~ 245.
- 18 Gauri, K.L. and Holdren, G.C. 1981. Pollutant effects on stone monuments. *Environmental Science and Technology* 15, 386 ~ 390.
- 19 Goudie, A.S. 1977. Sodium sulphate weathering and the disintegration of Mohenjo-Daro, Pakistan. *Earth Surface Processes* 2, 75 ~ 86.
- 20 Hansen, W. C. 1963. Crystal growth as a source of expansion in portland-cement concrete. *Proceedings of the American Society for Testing and materials* 63, 932 ~ 945.
- 21 Hanson, L.O. 1933. Weathering tests on concrete. *Proceedings of the Highway Research Board* 13, 303 ~ 326.
- 22 Hudc, P.P. 1982. Statistical analysis of shale durability factors. *Transportation Research Record* 873, 28 ~ 35.
- 23 Jeannette, D. 1981. Modifications superficielles de grénoéuvre dans des monuments alsaciens. *Science Géologique Bulletin* 34, 37 ~ 46.
- 24 Kennedy, T.B. and Mather, K. 1953. Correlation between laboratory accelerated freezing and thawing and weathering at Treat Island, Maine. *Journal of the American Concrete Institute* 25, 141 ~ 172.

- 25 Larson, T. D. and Cady, P. D. 1969. Identification of frost susceptible particles in concrete aggregate. National Co-operative Highway Research Program Report 66.
- 26 Lautridou, J. P. and Ozouf, J. C. 1982. Experimental frost shattering. 15 years of research at the Centre de Géomorphologie du CNRS. Progress in Physical Geography 6, 215 ~ 32.
- 27 Lewis, D. W. and Dolch, W. L. 1955. Porosity and absorption. American Society for Testing and Materials, Special Technical Publication 169, 303 ~ 313.
- 28 Litvan, G. G. 1978. Adsorption systems at temperatures below the freezing point of the adsorptive. Advances in Colloid and Interface Science 9, 253 ~ 302.
- 29 Litvan, G. G., MacInnis, C. and Grattan-Bellew, P. E. 1980. Cooperative test program for precast paving elements. American Society for Testing and Materials, Special Technical Publication 691, 560 ~ 573.
- 30 Livingstone, R. 1981. The air pollution contribution to stone deterioration. investigating the weathering of the Bowling Green Custom House, NY City. Technology and Conservation 12, 36 ~ 39.
- 31 MacInnis, C. and Nathawad, Y. R. 1980. The effects of de-icing agent on the adsorption and permeability of various concretes. American Society for Testing and Materials, Special Technical Publication 691, 485 ~ 496.
- 32 Marschner, H. 1978. Application of salt crystallisation test to impregnated stones. UNESCO/RILEM International Symposium on the Deterioration and Protection of Stone Monuments, Paris. Paper 3.4.
- 33 Martin, K. G. and Price, R. E. 1982. Quantitative considerations of moisture as a climatic factor in weathering. Durability of Building Materials 1, 127 ~ 140.
- 34 Medgyesi, I., Bleuer, M. and Kraisell, G. 1981. Field examination of load bearing stone structures and the determination of their stability. Proceedings of the International Symposium, The Conservation of Stone II, Bologna, 299 ~ 313.
- 35 Minty, E. J. 1965. Preliminary report on an investigation into the influence of several factors on the sodium sulphate soundness test for aggregate. Australian Road Research 2, 49 ~ 52.
- 36 Owens, J. S. 1912. Experiments on the weathering of Portland Stone. The Surveyor and Municipal and County Engineer 20 September, 380 ~ 382.
- 37 Paquet, J. 1964. Contribution à l'étude de la maladie de la pierre. Nouvelle hypothèse sur les causes des transferts et des concentrations de sulfate produisant les effets exfoliants. Les Monuments Historiques 2, 73 ~ 88.
- 38 Powers, T. C. 1955. Basic considerations pertaining to freezing and thawing tests. Proceedings of the American Society for Testing and Materials 55, 1132 ~ 1155.
- 39 Powers, T. C. 1975. Freezing effects in concrete. In Durability of Concrete, American Concrete Institute Special Technical Publication 47, 1 ~ 11.
- 40 Price, C. A. 1975. The decay and preservation of natural building stone. Chemistry in Britain 11, 350 ~ 353.
- 41 Price, C. A. 1978. The use of the sodium sulphate crystallisation test for determining the weathering resistance of untreated stone. UNESCO/RILEM International Symposium on the Deterioration and Protection of Stone Monuments, Paris, Paper 3.6.
- 42 Ritchie, T. and Davison, J. I. 1968. Moisture content and freeze-thaw cycles of masonry materials. Journal of Materials 3, 658 ~ 671.
- 43 Rossi-Manaresi, R. 1981. Effectiveness of conservation treatments for the sandstone of monuments in Bologna. Proceedings of the International symposium. The Conservation of Stone II, Bologna, 665 ~ 688.
- 44 Schaffer, R. J. 1932. The weathering of natural building stones. London. HMSO.
- 45 Sharp, A. D., Trudgill, S. T., Cooke, R. U., Price, C. A., Crabtree, R. W., Pickles, A. M. and Smith, D. I. 1982. Weathering of the balustrade on St Paul's Cathedral, London. Earth Surface Processes and Landforms 7, 387 ~ 389.
- 46 Skoulidakis, T. and Papkonstantinou-Ziotus, P. 1981. Mechanism of sulphation by atmospheric SO<sub>2</sub> of the limestones and marbles of the ancient monuments and statues. I. Observations in situ (Acropolis) and laboratory measurements. British Corrosion Journal 16, 63 ~ 69.



47 Sperling, C.H. B. and Cooke, R. U. 1980. Salt weathering in arid environments· experimental investigations of the relative importance of hydration and crystallization processes. I. Theoretical considerations. Bedford College London, 48  
Thorn, C.E. 1979. Bedrock freeze- thaw weathering regime in an alpine environment. Earth Surface Processes 4, 211 ~ 228.

49 Tiano, P., Matteoli, U., Manganelli Del Fa, C., Frediani, P. and Piacenti, F. 1981. Humidity in stones· I. A new procedure for the determination of humidity and temperature in stones· Proceedings of the International Symposium, 'The Conservation of Stone II', Bologna, 465 ~ 473.

50 Verbeck, G.J. and Klieger, P. 1957. Studies of 'salt' scaling of concrete. Highway Research Board Bulletin 150, 1 ~ 13.

51 Whalley, W.B. and McGreevy, J.P. 1983. Weathering, Progress in Physical Geography 7, 559~ 586.

52 White, S.E. 1976. Is frost action really only hydration shattering? Arctic and Alpine Research 8, 1 ~ 6.

53 Withey, M.O. 1946. Considerations involved in the making of freezing and thawing tests on concrete. Proceedings of the American Society for Testing and Materials 46, 1198 ~ 1207.

54 Yamasaki, R. S. and Blaga, A. 1980. Accelerated weathering test for glass- fiber reinforced polyester (GRP) sheets. American Society for Testing and Materials, Special Technical Publication 691, 874 ~ 889.

55 Zaman, M. S., Ridgway, P. and Ritchie, A. G. B. 1982. Prediction of deterioration of concrete due to freezing and thawing and to de- icing chemical use. Journal of the American Concrete Institute 79, 56 ~ 58.

作 者 简 介

朱立平, 男, 1965 年 12 月出生, 副研究员。现在中国科学院地理研究所工作, 在职博士生。主要从事青藏高原环境变迁及岩石风化研究工作。

BUILDING WEATHERING AND  
THE GEOMORPHOLOGY STUDY

Zhu Liping

(*Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101*)

Abstract

Stone weathering is one of the important contents of geomorphology, but the study of its mechanism can be also applied to the weathering of building materials and their resistance to the environmental damage. This paper, based upon some documents related to the weathering of the building materials, suggested that the thought and experiments of the weathering of the building materials are very helpful to the weathering theories of the geomorphology study. With the development of the environmental pollution, the study of the stone weathering not only aim at geomorphology theories, but also serve the applying of the building weathering and its protection.

**Key words** Stone weathering, Building, Geomorphology study