

# 温度、湿度的变化对云冈石窟保存的影响

闫宏彬<sup>1</sup>,黄继忠<sup>1</sup>,赵新春<sup>1</sup>,郝临山<sup>2</sup>,李海<sup>\*3</sup>

(1.云冈石窟研究院,山西大同 037007; 2.山西大同大学工学院,山西大同 037003;

3.山西大同大学物理与电子科学学院,山西大同 037009)

**摘 要:** 分析了云冈石窟 1962 年 2 窟泉水温度和当时气温的监测数据及 2003 年全年气象站和窟内 6 个监测点的温度、湿度数据;总结了窟区和各种类型洞窟内温度、湿度的变化情况及岩石内部温度的变化情况;计算了窟外和各种类型洞窟内可能发生冻融的条件和时间;揭示了不同季节的水分在岩石和大气间运移情况;讨论了温度、湿度对云冈石窟的影响机理.认为修建窟檐对石雕的保存有利,但也存在湿度增大的问题.因此,建议在温度、湿度变化较大的洞窟,应修建窟檐,同时要考虑适当的排湿措施;没有窟檐的洞窟,在湿度过大的地方,也应采取必要的排湿措施.

**关键词:** 窟檐 砂岩 温度 湿度 冻融 凝结 蒸发

中图分类号:K854.3

文献标识码: A

文章编号:1674-0874(2007)03-0025-05

云冈石窟始建于 5 世纪中叶,现有洞窟 45 个,造像 51000 余尊,与敦煌莫高窟、龙门石窟、大足石刻并称中国四大石窟.为了科学有效地保护云冈石窟这一珍贵文化遗产,云冈石窟研究院开展了一系列科学保护工作,国内外有关专家也作了卓有成效的研究,但所有的工作均未涉及温度、湿度的变化对云冈石窟石雕的影响.本文在实际测试的基础上,对此进行了初步研究,并对监测和治理提出了建议.

## 1 云冈石窟温度、湿度的变化分析

温度、湿度对于石雕的影响主要在表面和表层某一深度范围之内,因此,必须考察外部环境、岩体表面、岩体表层、岩体内部的温度和湿度变化规律,才能评价温度、湿度对于石雕的影响.

### 1.1 第 2 窟泉水温度的测试和结果

1962 年,对第 2 窟流出泉水的温度进行了测试.用普通水银温度计,每天 14:00 测一个数据,为了更直观地反映出泉水温度与大气温度的关系,每天 14:00 将当时的气温也测一个数据,且绘在同一图内,见图 1.从图中可以看出,泉水温度随外界气温的变化出现幅度很小的变化.经计算得出:泉水温度的年平

均值 8.76 、最大值 11.5 、最小值 6 、波动幅度 5.5 ;气温的年平均值是 9.21 、最大值达到 27.2 、最小值为 -7.5 、波动幅度达到 34.7 .由于观测时间在中午,所以气温最小值一定远远低于 -7.5 ,波动也必定更剧烈;泉水温度年度波动很小,据此可以认为它每天的变化更小,近似于恒温.

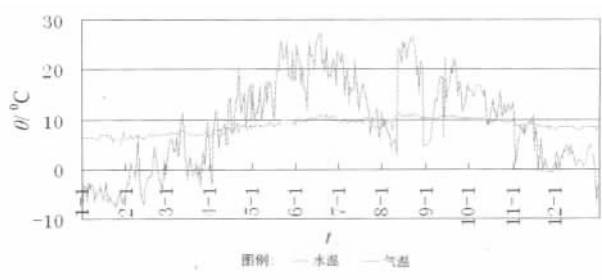


图 1 1962 年第二窟泉水温度与大气温度比较

### 1.2 监测点温度的测试和结果

2003 年,我们选取 6 个监测点,分别是云冈石窟气象站、第 5 窟前室、第 5 窟诵经道、第 6 窟诵经道、第 7 窟内、第 12 窟内和第 16 窟内,进行了温度测试.所用仪器为中国长春气象仪器厂生产的 DWJ1 温度计,该仪器为日记型,自记钟精度:24h $\pm$ 5min,温度测

收稿日期: 2007-10-10

基金项目:国家文物局资助项目 200115; 山西省自然科学基金项目 20051030; 山西省青年科技基金项目 20021048

作者简介: 闫宏彬(1971-),男,山西大同人,文博馆员,研究方向:石质文物保护、修复,\* 李海,教授,通讯作者.

量范围:-35~+45,精度:±1,记录介质:记录纸.为便于计算,我们在原始的记录纸上每隔15 min取一个点作为原始记录,在此基础上,计算了日平均温度、日温差、月平均温度、季度平均温度和季平均温差、年度平均温度和年平均温差,并绘制出相应的数据曲线图,部分图见图2~5.

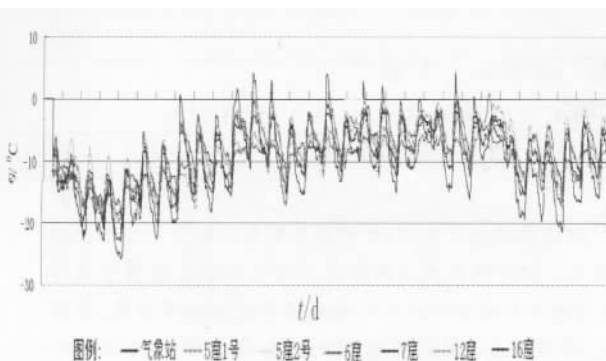


图2 2003年1月份各监测点温度曲线图

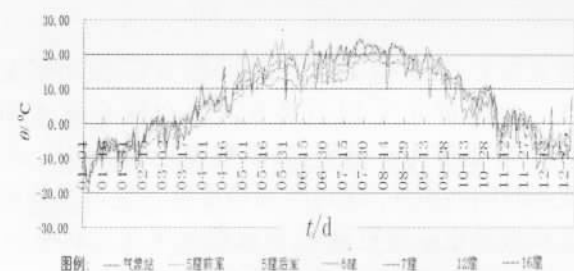


图3 2003年6月份各监测点温度曲线图

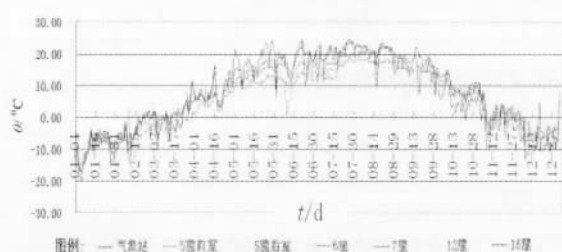


图4 2003年日平均温度曲线图

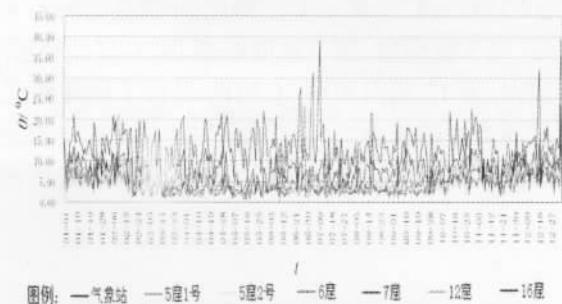


图5 2003年日温度差曲线图

以上曲线图和所测数据表明:

1) 窟内温度与窟外温度变化都具有明显的周期性.峰值一般都出现在午后1~3点左右,谷值出现在凌晨4~7点左右;寒冷季节窟内温度在夜间会高于窟外,白天低于窟外(图2),炎热季节窟内温度整体低于窟外.

2) 各测点有相同的变动趋势.依据峰值判断各窟内测点与气象站温度的关联程度依次为:16窟、12窟、7窟、5窟前室、6窟、5窟诵经道(图2,3).

3) 日平均温度显示气象站波动最为剧烈,16窟和12窟变动情况与气象站接近,其他洞窟波动较为平缓.寒冷季节窟内外日平均温度较为接近,夏季窟外平均温度高于窟内温度(图4).

4) 月平均温度差别不大,趋势相同,5窟诵经道平均温度最低,1,2,3,10,11,12月,窟外月平均温度低于大多数洞窟(图5).

5) 各测点日温差从大到小排列为:气象站、16窟、12窟、7窟、5窟前室、6窟、5窟诵经道.这表明气象站温度波动最为剧烈,16窟和12窟波动情况与气象站接近,其他洞窟波动较小,特别是封闭条件较好、洞窟容积大的5窟和6窟温度较为稳定(图3).

### 1.3 监测点相对湿度测试

2003年,我们在同样的6个监测点,进行了相对湿度测试.

所用仪器:中国长春气象仪器厂DHJ1型湿度计,该仪器可自动记录一天内的湿度变化,测量范围30%-100%RH,精度:6%,记钟精度:24h±5min,记录介质:记录纸.

用同样的方法,计算了日平均相对湿度、日相对湿度差、月平均相对湿度、季度平均相对湿度及相对湿度差、年度平均相对湿度及相对湿度差,并绘制出相应的数据曲线图,部分曲线图见图6~9.

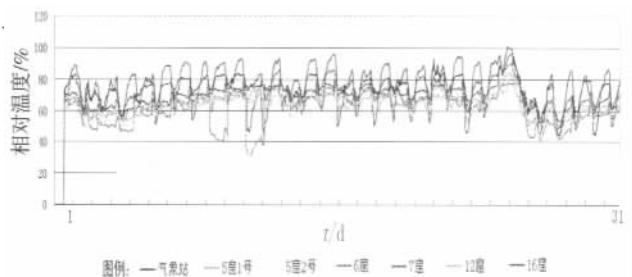


图6 2003年1月份各监测点相对湿度曲线图

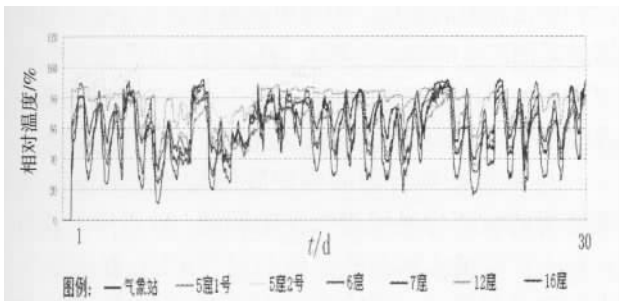


图 7 2003 年 6 月份各监测点相对湿度曲线图

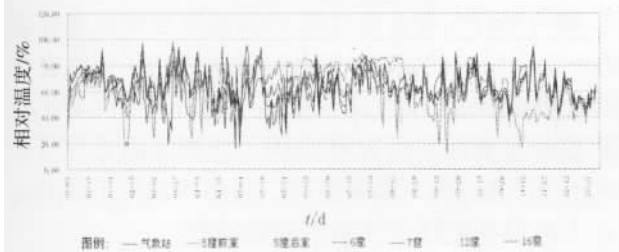


图 8 2003 年日平均相对湿度曲线图

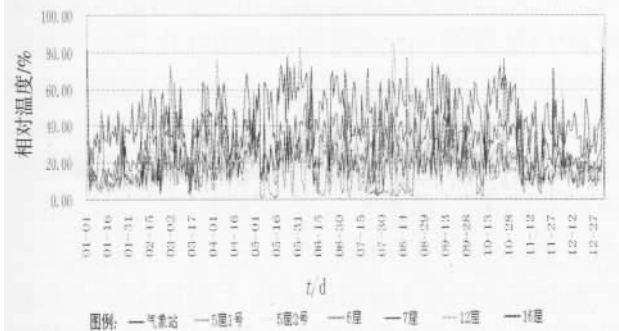


图 9 2003 年日平均相对湿度差曲线图

图 6~9 和相关数据表明:

1) 实时数据显示,各测点相对湿度有明显的相关性,相关序列同温度相关序列,5,6,7 窟的相对湿度变化较为平缓.1 月份温度较低时,窟内相对湿度小于窟外,6 月温度较高时,窟外相对湿度小于窟内(图 6,图 7).

2) 日平均相对湿度曲线在 1-5 月中旬及 9 月中旬 -12 月胶结在一起,其他时间则趋于开放.这表明在寒冷的季节中各测点相对湿度相近,在温度较高的季节,封闭性较好的洞窟平均相对湿度明显高于开放性较好的 12,16 窟和气象站(图 8).

3) 日相对湿度差表现出明显的规律,与温差序列相同,各测点从小到大顺序依次为:5 窟诵经道、6 窟、5 窟前室、7 窟、12 窟、16 窟,说明开放性较好的洞窟相对湿度变化较大,而封闭性较好的洞窟相对湿度比较稳定(图 9).

#### 1.4 各监测点满足冻融条件的次数

13934749666 冻融现象是指石质表面温度反复跨越 0~4 时,石质表面水或表层孔隙水反复冻结 - 融化产生的压力导致石雕的危害,由于我们没有岩石表面的温度的数据,所以只好用空气的温度近似地计算出各测点可能发生冻融的次数,统计如下:气象站 112d,第 5 窟前室 44d,第 5 窟诵经道 39d,第 6 窟 29d,第 7 窟 51d,第 12 窟 54d,第 16 窟 67d.可见,封闭性较好的第 5、第 6 窟出现冻融的可能性明显低于其他洞窟和窟外.

## 2 讨论和结论

### 2.1 关于岩体内部温度

由于泉水是从岩体中流淌出来的,并且与洞窟地面高度大致相当,同时有证据表明它与大气降水的补给有关,补给区域是泉水北部的广大山体,即石窟开凿范围内的山体<sup>[1,2]</sup>,并且云冈地区不是地热活动频繁的地区,所以我们断定,泉水的温度就代表石窟附近岩体内部的平均温度,即云冈砂岩的平均温度在 9 以内,波动范围在 6 以内,夏季不会超过 12,冬季不会低于 6.

### 2.2 关于石雕表面温度

由于岩石的比热比空气大得多,导热率也比空气大很多,并且石窟依山开凿,是一个庞大的热力学系统,所以有窟檐的大型洞窟,由于空气流动性能不好,其石雕表面的温度一定在更接近于岩体内部的温度范围内窄幅波动,即冬季石雕表面温度要高于窟内温度,夏季石雕表面的温度低于窟内温度,并且只有这样才能维持整个系统的动态平衡.

### 2.3 关于环境温度、湿度变化

洞窟内,特别是有窟檐洞窟内温湿度变化较小,寒冷季节平均温度高于窟外平均温度,炎热季节平均温度低于窟外.在所观测年度内,窟内湿度均比窟外高.

### 2.4 关于冻融

洞窟内满足冻融条件的天数少于窟外,有窟檐的洞窟又明显少于其它洞窟.

### 2.5 关于温度、湿度差异导致的水分运移



有关研究表明:当包气带内温度场发生变化时,气态水在温度梯度作用下,向最低温度界面运移,蒸发或是凝结取决于最低温度界面的性质.在不发生聚集的开放性界面上出现蒸散,消耗包气带内水分.在聚集性封闭界面上则出现凝结,使包气带内水分增加<sup>[3]</sup>.云冈石窟冬季岩体温度高于空气温度,因此冬季水分的主要运移方向是从岩体内部到空气中,即蒸发;夏季岩体温度总体低于空气温度,因此夏季水分的主要运移方向是从空气中到石雕内部.特别在洞窟内空气相对湿度达到 70%以上,温度达到 20 以上,在石雕表面或表层某一深度会产生凝结水.

3 温度、湿度变化对云冈石窟保存影响

3.1 温度、湿度变化的影响

1) 温度骤变引起岩石表层热胀冷缩,产生应力,导致石质劣化.如果温度升高,矿物体积增大,密度减小,就会对周边微环境产生压力.根据晶体结构的不同,不同矿物温度变化时产生的周边压力也不同.如:石英的膨胀是长石的 4 倍,是闪石的 2 倍,石英加热到 40 ,产生 55.24MPa 的压力;在 570 膨胀 3.76%,产生 101.35-253.38MPa 的压力.即使是同样的矿物,在不同的晶轴方向的热膨胀系数也不同,表 1 是砂岩中常见的三种矿物在不同晶轴方向上的热膨胀系数.

表 1 三种矿物晶体不同晶轴方向热膨胀系数<sup>[9]</sup>

矿物	晶系	热膨胀系数 $\times 10^{-6}$	
		垂直 C 轴方向	平行 C 轴方向
方解石	三方	-6	25
石英	三方	14	9
钠长石	三斜	4	13

从宏观尺度来说,岩石的热膨胀系数要小于其所含矿物的热膨胀系数,这是岩石中的晶体排列无序,各晶体在不同方向的膨胀和收缩互相抵消一部分所致.笔者尚未做过这方面的研究,但国外有这方面的实验的结果:如果以一个长 5m 的砂岩石条计算(开放环境),从 0 加热到 50 ,其线型膨胀可达 (3.1-3.4)%.由此可见,稳定石雕所处的温度环境,对石雕的保存也有至关重要的意义.

云冈石窟洞窟内,特别是有窟檐的洞窟内的温度变化较小,并且较为平缓,所以这种线型膨胀造成的损害不会很大;窟外,特别是受日光直接照射的岩石表面,温度变化要大得多(这种变化主要来源于降

雨和昼夜温差的变化),因而由于温度骤变导致线型膨胀差异而产生的应力会更大,从而受到更严重的损害;对于小型且没有窟檐的洞窟,由于石雕表面温度受外界温度的变化影响较大,所以也容易产生上述损害.

2) 温度影响云冈砂岩中胶结物的水解速度.水解作用的时间也是值得关注的问题.砂岩中的长石和粘土矿物的水解过程是吸热过程,因此,温度越高,水解速度越快.由于窟外温度比窟内高很多,因此,在同样的水解时间内,窟外岩石胶结物的水解速度也一定大于窟内岩石.但是云冈属于温带半干旱地区,其气候特点是:全年降雨量少,降雨集中,全年平均湿度较低,因此在多数情况下,窟外岩石处于干燥的状态.窟内却存在着湿度过高,岩体温度夏季温度普遍低于窟内温度的情况,因此凝结水作用于石雕表面的时间要比窟外大气降水作用于岩石的时间要长得多.实际观测结果也表明,窟内一些潮湿的地方风化也相当严重(如 5 窟诵经道),而那些常年干燥的地方,石雕保存很好(如多数洞窟的南壁).

3) 温度、湿度变化,引起石质表面凝结、蒸发现象反复发生,导致石质内的易溶盐在岩体内部的运移、溶解、结晶.盐在砂岩的微空隙中结晶会产生很大的压力,即结晶压力,结晶压力与盐的饱和度和温度有关(见表 2),因此温度和湿度的变化,都会改变岩石空隙中可溶盐的结晶压力,造成岩石内部应力的变化,而导致岩石结构的破坏.在一定条件下,有些盐还可以重结晶,生成新的水合物,占据更大的体积,产生额外的压力,即水合压力,例如石膏( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )和泻盐( $\text{CaSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ )都是云冈石窟常见的盐类,它们的水合压力见表 3.温度的变化,干湿的交替,会使得这些盐类不断在溶解 结晶 重结晶 脱水这样的过程中循环,由此产生的压力变化对石雕的影响是显而易见的.这种现象主要发生在空气温度明显高于岩石表面温度的洞窟内,如第 5 窟.

表 2 一些常见盐在不同结晶温度和饱和度下的结晶压力 /MPa<sup>[9]</sup>

盐	结晶压力 $C/C_s=2$		结晶压力 $C/C_s=10$	
	0	50	0	50
$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	13.51	14.39	40.24	47.63
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	10.73	12.69	35.47	42.06
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	93.07	33.85	95.07	112.50
NaCl	56.15	66.28	197.13	221.96
$\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	11.96	14.90	400.33	47.53
$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	7.30	8.41	23.72	28.07
$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	7.91	9.32	26.25	31.22
$\text{Na}_2\text{SO}_4$	29.59	34.96	98.31	11.66

3.2 冻融现象的影响

云冈砂岩中的裂隙(特别是微裂隙)、孔隙中有液态水存在时,砂岩表面温度反复跨越 0~-4℃,发生冻融现象,所产生的应力造成石质劣化.水结成冰,体积增加 9%,并且在 0~-4℃ 之间是热缩冷胀的,产生的压力可达数百个大气压,特别是在表面的细小的缝隙内特别有效.云冈石窟开凿于侏罗纪云冈组杂砂岩透镜体之上,岩性为中粗粒长石砂岩夹有泥岩、砂质泥岩,孔隙度 3.79%-16.74%,为多孔性岩石<sup>[4]</sup>,因此特别容易受到冻融的影响.从我们的统计结果看,有窟檐的大型洞窟,发生冻融的概率远小于没有窟檐的小型洞窟和直接暴露在外面的岩石.

4 建议

- 1) 从科学的角度来看,面对如此大型复杂的温度、湿度系统,任何依据理论做出的推断,均难以准确地符合实际情况. 因此应以监测数据为准,增加对岩体表面、石雕表面、岩体表层、岩体内部的温湿度变化的监测,才可客观地评价云冈石窟的温湿度环境及其对石雕保存的影响.
- 2) 温湿度变化较大的洞窟,要考虑适当的排湿措施,封闭性比较好的洞窟还应考虑适当的恒温措施.
- 3) 修建窟檐,这样可以避免阳光直射导致的洞窟外立壁温度过高、避免雨水对外立壁岩体直接冲刷导致的温度骤变和淋滤、减少水分对外立壁岩石的水解作用时间,同时也可稳定窟内环境.鉴于目前修建窟檐的方案争论较大,可以考虑修建临时性的挡雨棚.

表 3 石膏(CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O)和泻盐(CaSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O)在不同温度和相对温度下的水合压力/MPa<sup>a)</sup>

相对温 度/%	CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O				CaSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O			
	0	20	40	60	0	20	40	60
100	221.96	178.69	136.82	93.85	14.80	11.86	9.73	9.32
90	202.70	159.22	116.96	73.38	13.38	10.44	7.80	6.99
80	184.46	139.05	95.38	51.79	11.66	8.82	5.98	3.95
70	162.16	116.05	71.15	25.74	9.83	6.89	4.05	5.06
60	139.36	89.59	42.77	0	7.70	4.56	1.72	0
50	10.86	58.28	8.92	0	5.07	1.93	0	0

参考文献

[1]尚剑宝,上官学兵. 山西大同云冈石窟防水保护方案探讨[J]. 山西建筑,2003,29(6):75-76.  
[2]马红梅,马国栋,速宝玉.大同云冈石窟文物渗水病害防治方案探讨[J]. 水文地质工程地质,2004 (5):64-67.  
[3]万力,曹文炳,周训,等.包气带中温度变化对水分分布影响的实验研究[J]. 水文地质工程地质, 2004 (3): 25-28.  
[4]马在平,黄继忠,张洪,等. 山西大同云冈地区云冈组砂岩沉积成岩及石窟风化病害研究[J]. 中国石油大学学报,2003, 23(4): 22-26.  
[5]Erhard M Winkler. Weathering and Weathering Rates of Natural Stone[J]. Environmental Geogy, 1987, 9(2): 85- 92.

The Temperature & Humidity Changes in Yungang Grottoes and Their  
Influence to the Caves Conservation

YAN Hong-bin<sup>1</sup>, HUANG Ji-zhong<sup>1</sup>, ZHAO Xin-chun<sup>1</sup>, HAO Lin-shan<sup>2</sup>, LI Hai<sup>3</sup>

(1.Yungang Grottoes Academy,Datong Shanxi, 037007; 2. School of Engineering, Shanxi Datong University, Datong Shanxi, 037003;  
3. School of Physics and Electronics Science,Shanxi Datong University, Datong Shanxi, 037009)

Abstract: In this paper, we have analyzed the data of temperatures of spring in No.2 Cave of the Yungang Grottoes in 1962, temperature & humidity of meteorological station and the place we select in Yungang Grottoes. We have summarized the law of temperature & humidity's changes in Yungang Grottoes, in deferent kind of caves and in rock, counted days of the water freeze & melt in cave and outside; found out the law of water's movement between rock and air in deferent seasons. According to these analyses and the analyses of the affection of temperature & humidity to Yungang Grottoes, we consider that the preserved environment condition with eaves is beneficial to the stone carving. But if we build eaves the humidity will raise, so we need use some measure to lower the humidity. Even if, in those caves without eaves, the humidity maybe is very high, so we should use the measure to lower the humidity in these places too.

Key words: sandstone; eaves of caves; temperature; humidity; freeze & melt; condense; evaporate