

敦煌莫高窟底层洞窟岩体内水汽与盐分 空间分布及其关系研究

郭青林^{1, 2, 3}, 王旭东^{1, 2, 3}, 薛平^{2, 3}, 张国彬^{2, 3}, 樊再轩^{2, 3}, 侯文芳^{2, 3}, 张正模^{2, 3}

(1. 兰州大学 西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 古代壁画保护国家文物局重点科研基地, 甘肃 敦煌 736200;
3. 敦煌研究院, 甘肃 敦煌 736200)

摘要: 著名的世界文化遗产——敦煌莫高窟开凿于第四纪砂砾岩组成的崖壁上, 受自然环境及人为因素影响, 洞窟内壁画产生起甲、空鼓和酥碱等多种病害, 尤其以底层洞窟最为严重。以病害最具代表性的底层洞窟之一莫高窟第 98 窟为例, 通过在 98 窟西壁下部无壁画部位钻孔取样测定可溶盐, 并在钻孔内布设高精度温湿度监测探头, 西壁下部由南向北电阻率测定等研究, 得出如下结论: 98 窟西壁表面到岩体内的可溶性盐主要以硫酸盐和氯盐为主, 主要富集在表面至 35 cm 深的岩体内; 岩体内的温湿度和盐分有很好的关联性, 盐分随着岩体内水汽含量的上升而下降; 在岩体深 125 cm 有凝结水产生; 在高湿度和崖体源源不断的盐分来源的作用下, 导致背靠崖体的西壁壁画内的含盐量要高于其他各壁, 对洞窟环境的变化也更为敏感, 病害也要远远严重于其他各壁等, 这些结论可为壁画病害产生机制研究和防治提供科学依据。

关键词: 工程地质; 敦煌莫高窟; 岩体; 水汽; 盐分; 空间分布

中图分类号: P 642

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2009)增 2 - 3769 - 07

RESEARCH ON SPATIAL DISTRIBUTION AND RELATIONS OF SALINITY AND MOISTURE CONTENT INSIDE ROCK MASS OF LOW-LAYER CAVES IN DUNHUANG MOGAO GROTTOES

GUO Qinglin^{1, 2, 3}, WANG Xudong^{1, 2, 3}, XUE Ping^{2, 3}, ZHANG Guobin^{2, 3}, FAN Zaixuan^{2, 3},
HOU Wenfang^{2, 3}, ZHANG Zhengmo^{2, 3}

(1. Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China, Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China; 2. The Key Scientific Research Base for Ancient Wall Paintings Conservation of State Administration of Cultural Heritage, Dunhuang, Gansu 736200, China; 3. Dunhuang Academy China, Dunhuang, Gansu 736200, China)

Abstract: Dunhuang Mogao Grottoes, the very famous world culture heritage, was chiseled in the cliff face of alluvial grit etching by the Daquan River in the Quaternary Period. Undergone natural and human factors, caves of Mogao Grottoes have many diseases and deteriorations including flaking, detachment and disruption; especially the caves of low-layer are most serious. Cave 98, one of the most valuable and representative diseases of low-layer caves in the Five Dynasties(AD914—AD935), is selected as an example. Like all other caves in Mogao Grottoes, it has been affected by the natural environment. From the hole drilled at the lower portion of the western wall without painting, samples obtained for salinity analysis. The temperature and humidity are measured inside the hole. The analysis of electrical resistivity data from south to north of the lower portion of the western wall

收稿日期: 2008 - 11 - 07; **修回日期:** 2009 - 02 - 02

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAK30B02); 2006 年西部灾害与环境力学教育部重点实验室开放基金资助项目(200705)

作者简介: 郭青林(1976 -), 男, 1999 年毕业于兰州大学地质学专业, 现为博士研究生、馆员, 主要从事古遗址保护方面的研究工作。E-mail: gqinglin@yahoo.com.cn

indicates that the soluble salt contents of the rock mass are mainly vitriolic and chloride, mainly concentrated between the surface and the depth of 35 cm. Water condensation occurs in the rock mass at depth of 125 cm. Inside the rock mass, there is close correlation between relative humidity and salinity. When moisture content rises, salinity drops. Due to the high humidity and abundant supply of salt, the salinity of the western wall, which is backed by the main cliff structure, is higher than the other walls, and it is more sensitive to changes in the environment. These achievements have provided a scientific basis for conservation wall paintings.

Key words: engineering geology; Dunhuang Mogao Grottoes; rock mass; moisture; salinity; spatial distribution

1 引言

著名的世界文化遗产敦煌莫高窟,最早开凿时间为公元 366 年,目前保存有洞窟 750 个,其中有壁画的洞窟 492 个,壁画 45 000 m²,彩塑 2 415 身,唐宋木结构的窟檐 5 座,莲花柱石和铺地花砖数千块,是中国也是世界上现存规模最为宏大、保存最为完好的佛教艺术宝库。

莫高窟开凿于鸣沙山东麓第四纪砂砾岩崖壁上,根据河西走廊第四纪地质研究和敦煌盆地已有的调查研究成果,结合莫高窟现场调查和样品分析测试资料,可将莫高窟崖体及其下伏地层划分为下更新统玉门组(Q₁)、中更新统酒泉组(Q₂)、上更新统戈壁组(Q₃)。洞窟分布在中更新统酒泉砾岩中。由于莫高窟的洞窟均分布在由酒泉砾岩组成的直立崖体上,因此,有人称酒泉砾岩为“洞窟地层”^[1]。

总体而言,莫高窟壁画的保存状况为中层最好,上层次之,下层最差,为研究导致莫高窟下层洞窟病害严重的原因,本文选择莫高窟病害最为严重 98 窟展开监测研究。

98 窟位于莫高窟南区中段底层,在莫高窟标志性建筑九层楼南侧,该窟开凿于五代曹议金任节度使时期(AD914~AD935)。具体位置见图 1。第 98 窟由前室(殿堂)、甬道、主室 3 个部分组成,前室已塌毁,该窟属莫高窟大型洞窟,洞窟主室占地面积 186 m²,现存壁画 685 m²,内容非常丰富,是该时期最有价值和代表性的洞窟。

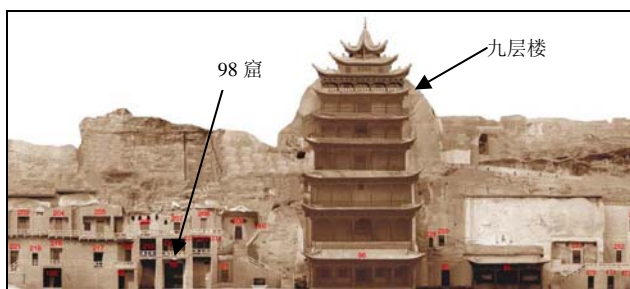


图 1 莫高窟 98 窟位置图

Fig.1 Location of cave 98

受自然环境和人为等因素的影响,第 98 窟的壁画和其他底层洞窟一样,产生了起甲、空鼓和酥碱等病害。1975 年李云鹤先生采用聚醋酸乙烯和聚乙烯醇^[2]对西、南、北壁部分起甲壁画进行了加固处理,并对空鼓病害严重的壁画进行了锚固,抢救了部分濒危壁画。但该窟的壁画病害并没有得到有效的遏制,短短的 10 a 时间,起甲、酥碱、空鼓等病害又有发生,并且程度加重,病害面积有明显扩大的趋势,壁画面临脱落的危险。

据徐淑青^[2]的研究,98 窟壁画的主要病害有地仗酥碱(其中包括疱疹状脱落和点状脱落)、起甲(包括龟裂起甲、泡状起甲、片状起甲)、裂缝、空鼓、霉变等。起甲和酥碱主要分布于洞窟主室西壁及南北壁的西侧下部,约占起甲总面积的 79%,占酥碱总面积的 84%。主室西南角和西北角起甲、酥碱脱落非常严重。壁画空鼓病害最为广泛,在主室各个壁面以及甬道的大部分区域都有不同程度的存在,约占整窟壁画面积 47%,特别是西壁大部分地仗已离开崖体约 2 cm,北侧有一处地仗离开崖体 5~6 cm,并且脱落一块,很危险。细小裂缝布满整窟。图 2, 3 分别给出了莫高窟 98 窟壁画空鼓和酥碱起甲情况。据张明泉等^[3~7]的研究,莫高窟的壁画酥碱等病害主要是由于水盐运移导致盐分在地仗中富集而产生的。控制和减缓盐害的发生主要有两个途径,一是减少壁画地仗中的盐分含量,即采取脱盐等措施;二是控制壁画的保存环境,主要是控制导致盐分运移的水汽,减缓盐分的运移和富集,达到控制和减缓病害发生的目的。有关脱盐方面的研究,苏伯民等^[8~10]已经做了大量的研究和探索;莫高窟大环境和窟内小环境方面也有较多的研究^[11~14],但有关莫高窟岩体内的水汽运移方面的研究基本没有开展。

本文采用易溶盐测定、高密度电阻率法测定、温湿度测定等方法对 98 窟病害最为严重的西壁岩体内盐分和水汽含量展开调查研究,以了解莫高窟洞窟内表层岩体水汽和盐分含量及分布状况,为解释洞窟病害产生机制和防治提供依据。



图 2 莫高窟 98 窟壁画空鼓

Fig.2 Detachment deterioration in cave 98

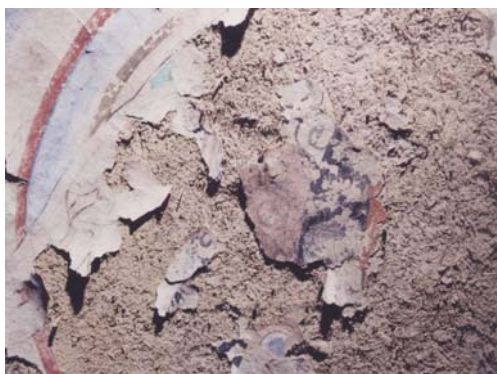


图 3 莫高窟 98 窟壁画酥碱起甲

Fig.3 Flaking deterioration in cave 98

2 98 窟岩体内盐分与水汽含量调查研究方法

鉴于壁画病害西壁最为严重, 此次调查主要围绕 98 窟西壁展开, 利用常规可溶盐测定、温湿度环境监测、高密度电阻率法等研究岩体内水汽和盐分的分布。

2.1 盐分调查方法

利用 TYQEJ100D 潜孔钻机, 在 98 窟西壁南侧下部, 距地面 90 cm, 距南壁 138 cm 壁画已经脱落处进行钻孔取样。由于更加关心盐分在岩体表面的分布状况, 所以从表面至 50 cm 深处取样间隔控制在 2~5 cm; 50~100 cm 取样间隔为 10 cm。按照《中国国家易溶盐测定标准》(GB/T50123 - 1999), 对岩体表面及钻孔不同深度样品进行可溶盐含量测定, 主要测定指标为总盐含量、pH 值, 阴、阳离子种类及含量等指标, 取样位置见图 4。

2.2 岩体钻孔内温湿度调查方法

从 20 世纪 80 年代, 敦煌研究院就开始了洞窟内外温湿度环境的监测工作, 并于美国盖蒂保护所合作, 共同开展了敦煌莫高窟 85 窟保护项目, 对洞窟岩体 10 cm 深处的温湿度进行过长期监测, 根据所得结果, 认为莫高窟岩体内比较干燥, 但对岩体

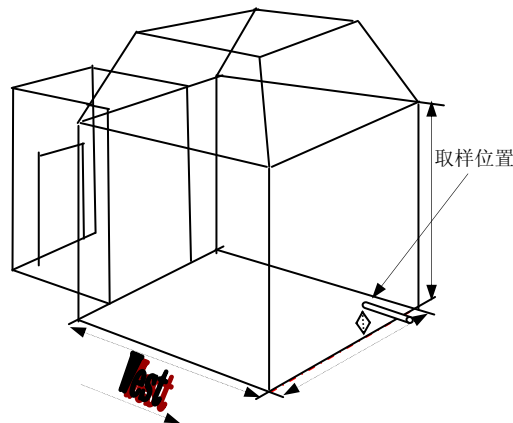


图 4 98 窟西壁岩体内取样位置示意图

Fig.4 Samples location at western wall of cave 98

内更深处的水汽状况并未进行过更多的研究。本次监测利用 98 窟西壁南侧下部已钻好的孔, 在孔内不同深度布置温湿度探头, 监测岩体内 125, 95, 62, 30, 10 cm 深处和孔外的温湿度变化, 监测探头和数据读取设备均为芬兰 VAISALA 公司生产, 在探头安装之前采用饱和盐溶液对所有探头进行标定, 确保探头监测数据的准确性。

2.3 电阻率法调查岩体内水汽分布

电阻率法在工程勘察和水汽等研究中已经有较多成功应用的实例^[15~24], 其适用于探测裂缝、洞穴、土质不均及同一岩土体中含水、含盐量等不同引起的异常。电阻率大小与地质体的差异和含水量的多少有密切的关系, 当含水量大时, 岩体的导电性增强, 电阻率下降; 当含水量小时, 岩体的导电性降低, 电阻率上升。在第 98 窟进行高密度电阻率测定时, 布线方法采用 Winner 法, 在西壁距地面 50 cm 处由南向北垂直于西壁布设剖面线, 电极间隔 25 cm (因为在西壁 50 cm 以下的壁画全部脱落, 使布置电极成为可能)。测定设备为 McOHM - 21(MODEL - 2166)型高密度电阻率仪(见图 5)。测定时, 将较厚的由锡丝编制的网状电极和导线连在仪器上, 按照



图 5 高密度电阻率仪

Fig.5 Electrical resistivity meter

等间距把四个电极布设在剖面线上，并在电极周围加少许水以使电极更好的与岩体接触，增加电极的导电性。将电极通过测线连接在高密度电阻率仪上便可开始测定，该法为首次在莫高窟岩体水汽监测中使用。图 6 为洞窟内高密度电阻率探测现场。



图 6 洞窟内高密度电阻率探测现场

Fig.6 Electrical resistivity measurement in progress

3 结果与分析

3.1 可溶盐结果分析

98 窟钻孔内可溶盐测定结果见表 1 和图 7, 8。

由表 1 可知，98 窟岩体内的可溶盐主要以硫酸盐和氯盐为主，两者的含量比较接近，含有少量的 HCO_3^- 和 NO_3^- ，两者的含量均比较低。从易溶盐总量来看，在表面到 100 cm 内的总含盐量呈降低趋势，洞窟西壁岩体表面至 60 cm 处含盐量高于岩体整体含盐量(对莫高窟深 150 m 钻孔内样品含盐量测定，其平均含盐量为 1 000 mg/kg 左右)。图 7 表明，98 窟西壁的盐分主要富集在表面到 35 cm 处，从表面到 35 cm 深处的含盐量平均为 3928 mg/kg，是岩体内含盐量的富集区；从 35~100 cm 处的平均含盐量为 1474 mg/kg，含盐量约为前者的 1/3，可见 98 窟下部岩体内的盐分主要富集在表面至 35 cm 深处。

从图 8 可以看出，从表面到 30 cm 处氯盐的含量高于硫酸盐含量，而在 30~80 cm 处的硫酸盐含量又高于氯盐含量，在 80~100 cm 深处氯盐含量和硫酸盐含量比较接近。

3.2 温湿度调查结果分析

图 9 为岩体内温度随深度变化曲线。从曲线比较来看，洞窟内空气温度变化最大，越往岩体深处

表 1 98 窟西壁岩体内易溶盐含量测定表

Table 1 Salinity in the rock structure of the western wall of cave 98

样品编号	采样深度/cm	pH 值	阴离子含量/(mg · kg ⁻¹)					阳离子含量/(mg · kg ⁻¹)				易溶盐总量/(mg · kg ⁻¹)
			NO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺ +Na ⁺	NH ₄ ⁺	
C98-1-1	0.0~2.0	8.36	19.1	9	156	869	1 188	148	26	1 034	0.6	3 458
C98-1-2	2.0~5.0	8.34	18.6	13	163	1 113	1 608	82	27	1 502	0.5	4 489
C98-1-3	5.0~10.0	9.10	17.3	15	197	942	1 697	57	20	1 534	0.4	4 412
C98-1-4	10.0~15.0	9.16	15.2	22	167	688	1 644	70	11	1 375	0.4	3 975
C98-1-5	15.0~22.5	8.98	7.2	16	164	665	1 521	60	16	1 281	0.6	3 759
C98-1-6	22.5~25.0	8.74	6.1	9	176	935	1 226	64	12	1 220	0.8	3 588
C98-1-7	25.0~30.0	8.37	4.8	7	171	1 267	1 294	82	6	1 410	1.0	4 178
C98-1-8	30.0~35.0	8.04	3.9	-	152	1 320	875	96	15	1 118	1.0	3 568
C98-1-9	35.0~40.0	8.49	2.4	9	156	914	516	86	10	720	1.0	2 367
C98-1-10	40.0~45.0	8.34	2.5	7	138	673	477	82	11	574	10.0	1 976
C98-1-11	45.0~50.0	8.37	2.6	9	145	660	447	80	11	555	0.1	1 864
C98-1-12	50.0~60.0	8.54	2.4	13	141	528	433	64	10	505	0.8	1 644
C98-1-13	60.0~70.0	8.34	2.2	7	175	369	347	47	20	382	0.9	1 283
C98-1-14	70.0~80.0	8.51	0.3	13	161	263	310	44	11	325	0.7	1 069
C98-1-15	80.0~90.0	9.07	0.3	18	104	207	260	42	10	253	1.2	853
C98-1-16	90.0~100.0	9.45	0.4	24	193	110	220	40	5	231	0.9	742

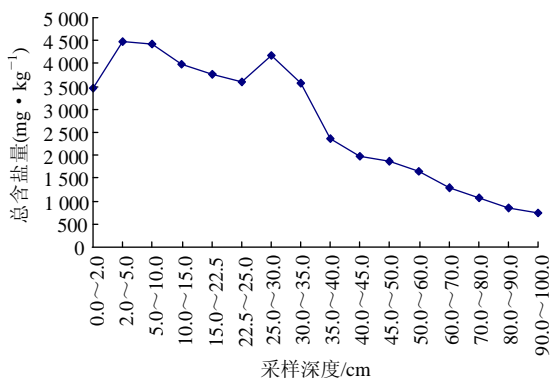


图 7 岩体内总含盐量随深度变化曲线

Fig.7 Relationship between salinity and depth

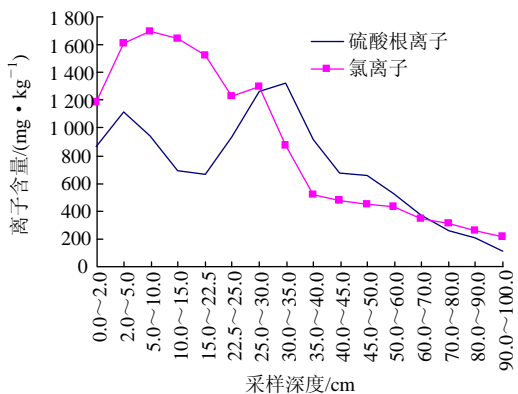


图 8 岩体内氯离子和硫酸根离子含量随深度变化曲线

Fig.8 Relationship between vitriolic salinity and chloride ion contents, and depth

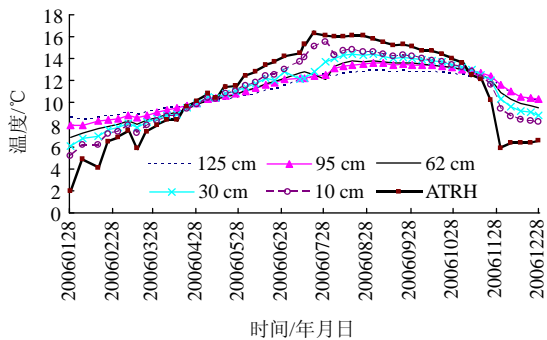


图 9 岩体内温度随深度变化曲线

Fig.9 Changes of temperature with depth

温度越稳定。岩体内的温度也随空气的温度发生变化, 1 a 内冬季时候温度最低, 夏季温度最高, 变化趋势和洞窟内空气温度变化一致。图 10 为岩体内相对湿度随深度变化曲线。从图中可以看出, 依然是洞窟内空气中的相对湿度波动幅度最大, 岩体内的相对湿度随深度逐渐增加。当进入岩体内深度超过 60 cm 时, 岩体内的相对湿度达到一些可溶盐溶解的湿度。在 95 cm 处达到 90% 以上, 在深 125 cm 处超过 100%, 说明已经有凝结水产生。

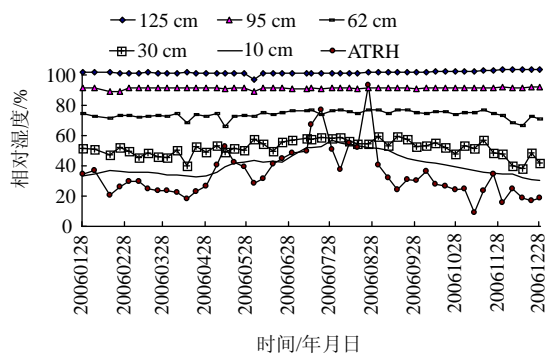


图 10 岩体内相对湿度随深度变化曲线

Fig.10 Changes of relative humidity with depth

结合图 7~10 分析可以看出, 温湿度的测定结果与盐分的测定结果有很好的关联性, 从表面到 40 cm 处的相对湿度较低, 盐分含量较高, 而在 60 cm 深处已经达到能够使氯盐溶解的相对湿度, 可见越往岩体深处, 水汽含量越高, 而随着岩体内相对湿度的增加, 其含盐量逐步降低, 正是因为岩体内部较高的湿度, 导致了盐分随着水汽向表面运移。从图 8 可以看出, 在表面到 30 cm 深处富集有更多的氯盐, 而随着深度的增加, 硫酸盐的含量开始高于氯盐, 这也正好符合这两种盐溶解的相对湿度, 但相对湿度达到 75% 时, 氯化钠开始溶解, 当相对湿度达到 96% 时, 硫酸钠开始溶解。说明在较低的湿度环境下, 氯盐更容易在表面至 30 cm 深度富集, 而在湿度更高的情况下, 硫酸钠溶解运移, 所以硫酸盐的富集在岩体 30~40 cm, 两类盐在岩体的分布状况主要是由岩体的水汽含量所决定的。

当窟内的小环境受到外界影响, 导致相对湿度增加并达到一定程度时, 岩体表面到 30 cm 内富集的大量盐分将会向岩体与壁画地仗之间或壁画地仗与颜料层之间较为薄弱的结合面运移, 造成盐分在壁画地仗和岩体之间的接触面富集, 从而破坏地仗与岩体之间的粘结力, 导致壁画空鼓; 盐分一旦进入地仗内, 相对湿度变化时, 易溶盐就会反复溶解、结晶, 导致地仗酥碱或颜料层起甲等病害。

从以上分析也可以得出, 导致壁画酥碱、起甲的盐分主要来自岩体。盐分在岩体表面至 35 cm 深度以内的富集, 主要是 60 cm 之后的岩体具有较高的湿度造成的。莫高窟洞窟的西壁背靠崖体, 岩体内的湿度由浅至深逐渐升高, 在高湿度的作用下致使盐分向浅部运移, 导致西壁的含盐量高于其他各壁, 这也正是莫高窟底层洞窟西壁壁画病害要相对其他各壁严重的主要原因。由于西壁较高的含盐量和水汽含量, 所以在壁画修复中最好选择透水透气

性较好的材料，一旦所用材料透水透气性较差的话，必然打破岩体内外的水气平衡，导致岩体内的水汽向外迁移，激活富集的盐分，导致壁画病害的再次发生。

3.3 电阻率调查结果分析

图 11 为 98 窟西壁底部南北向电阻率测定结果，测定剖面平行于岩层，即为在同一层内测定。可以认为，所剖面所在位置的岩性是一致的，避免了由于岩性变化对测定结果带来的干扰，即所测出岩体电阻率的变化是由于岩体内不同水汽含量导致的。从图 11 可以看出，电阻率明显呈层状分布，即从岩层表面到深 40 cm 左右处有较高的电阻率值，这一范围内的水汽含量相对较低；而随着深度的增加，岩体内的电阻率呈现明显下降的趋势，说明随着深度的下降，岩体内的水汽含量不断增加，而在 150~300 cm 深处的电阻率低于 $100 \Omega \cdot m$ ，这一测定结果和湿度探头监测结果完全吻合。利用在 125 cm 深处洞窟岩体内温湿度已产生凝结水的测定结果，说明在 150~300 cm 深处有相同电阻率的这一范围内均可能有凝结水产生。通过在整个西壁下部剖面较为均匀的电阻率值的分布，说明岩体内的水汽变化并不是局部的，而是整个西壁的水汽均随深度的增加而上升。

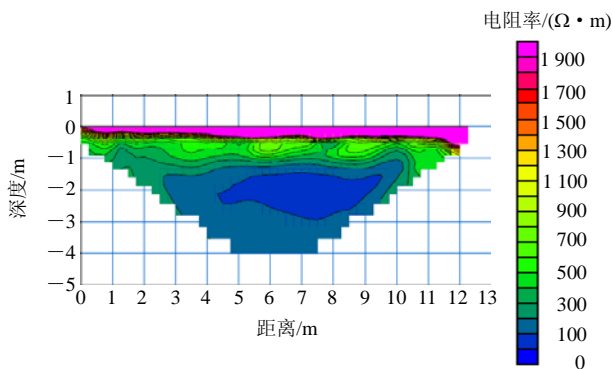


图 11 98 窟西壁底部南北向电阻率测定结果

Fig.11 Electrical resistivity profile of the rock structure at the lower portion of the western wall of cave 98 from south to north

由于莫高窟开凿于冲洪积形成的泥质和钙泥质弱胶结的砂砾岩，其胶结物抗风化能力弱，在自然环境作用和洞窟人工开挖卸荷后极易风化。在岩石的形成地质年代中，一直处于相对干燥、蒸发强烈的环境，这种环境也将导致在岩石的胶结物中含有一些盐分，砂砾岩体胶结物的风化为水汽的运移和盐分的富集提供了通道，而水汽携带盐分的运移也导致了岩体进一步的风化，因此从岩体表面至 30

cm 处为岩体风化最为严重的部位，通过此次测定也说明莫高窟下部洞窟内砂砾岩体并不是以前想象的非常干燥，在岩体内部也存在一定的水汽含量，而这些水汽和洞窟内环境变化所带来的水汽共同作用，引起了盐分在壁画及岩体表面富集，从而导致了壁画的破坏。

4 结论与建议

(1) 98 窟西壁表面到岩体内的可溶盐主要以硫酸盐和氯盐为主，盐分主要富集在表面到 35 cm 深的岩体内，平均达到 3928 mg/kg 。

(2) 当岩体内深度超过 60 cm 时，相对湿度达到了氯化钠溶解的湿度。在 95 cm 深处可达到 90% 以上，而在深 125 cm 处超过了 100%，说明已经有凝结水产生。

(3) 岩体内的温湿度和盐分含量相关性好，相对湿度随着深度而增加，而盐分含量呈降低的趋势，即盐分随着水汽不断向外运移而导致岩体内部含量的下降。

(4) 由于整个西壁和岩体相连，其含盐量明显高于其他各壁，对洞窟环境的变化也更为敏感，这是莫高窟底层洞窟西壁壁画病害要远远严重于其他各壁的主要原因。

(5) 通过电阻率测定说明西壁的水汽随着深度的增加呈层状分布，在 150~300 cm 深处有凝结水产生。

(6) 由于洞窟内紧贴崖体的西壁具有较高的含盐量和水汽含量，所以在壁画修复中一定要选择透水透气性较好的材料，使水汽能够自由出入，一旦所用材料透水透气性较差，必然打破岩体内的水汽平衡，导致岩体浅层的水汽向外迁移，激活富集的盐分，使壁画病害的再次发生。

(7) 尽可能地使洞窟保持在一个相对稳定、干燥的环境，应该在下雨、下雪等高湿度环境下关闭窟门，防止湿气进入洞窟。在保持环境稳定的情况下，可对产生病害的壁画进行修复，但要尽可能少的使用水，以免增加壁画地仗和岩体内的水汽含量。

致谢 本文的温湿度数据由敦煌研究院保护所环境室监测所得，敦煌研究院文物保护技术服务中心的同事在电阻率测定中给予了极大的帮助，作者对他们付出的辛勤劳动深表感谢！

参考文献(References):

- [1] 李宝兴. 论甘肃西部“洞窟地层”的特征与时代[J]. 甘肃地质,

- 1986, (6): 61 - 77.(LI Baoxing. On characteristics and age of the "cave stratum" in west Gansu[J]. Gansu Geology, 1986, (6): 61 - 77.(in Chinese))
- [2] 徐淑青. 莫高窟第 98 窟现状调查报告[J]. 敦煌研究, 2005, (5): 75 - 77.(XU Shuqing. Report of the up-dated condition of cave 98 at Mogao Grottoes[J]. Dunhuang Research, 2005, (5): 75 - 77.(in Chinese))
- [3] 张明泉, 张虎元, 曾正仲, 等. 莫高窟壁画酥碱病害产生机制[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 1995, 30(1): 96 - 101.(ZHANG Mingquan, ZHANG Huyuan, ZENG Zhengzhong, et al. The mechanisms of efflorescent disaster of wall-paintings in Mogao Grottoes[J]. Journal of Lanzhou University(Natural Science), 1995, 30(1): 96 - 101.(in Chinese))
- [4] 张明泉, 张虎元, 曾正中, 等. 莫高窟地仗层物质成分及微结构特征[J]. 敦煌研究, 1995, (3): 27 - 28.(ZHANG Mingquan, ZHANG Huyuan, ZENG Zhengzhong, et al. Material composition and micro-structure characteristics of the plaster at Mogao Grottoes[J]. Dunhuang Research, 1995, (3): 27 - 28.(in Chinese))
- [5] 郭宏, 李最雄, 宋大康, 等. 敦煌莫高窟壁画酥碱病害机制研究之一[J]. 敦煌研究, 1998, (3): 153 - 163.(GUO Hong, LI Zuixiong, SONG Dakang, et al. Research on efflorescence of wall paintings in the Mogao Grottoes of Dunhuang(I)[J]. Dunhuang Research, 1998, (3): 153 - 163.(in Chinese))
- [6] 郭宏, 李最雄, 裘元勋, 等. 敦煌莫高窟壁画酥碱病害机制研究之二[J]. 敦煌研究, 1998, (4): 159 - 161.(GUO Hong, LI Zuixiong, QIU Yuanxun, et al. Research on efflorescence of wall paintings in the Mogao Grottoes of Dunhuang(II)[J]. Dunhuang Research, 1998, (4): 159 - 161.(in Chinese))
- [7] 郭宏, 李最雄, 裘元勋, 等. 敦煌莫高窟壁画酥碱病害机制研究之三[J]. 敦煌研究, 1999, (3): 153 - 175.(GUO Hong, LI Zuixiong, QIU Yuanxun, et al. Research on efflorescence of wall paintings in the Mogao Grottoes of Dunhuang(III)[J]. Dunhuang Research, 1999, (3): 153 - 175.(in Chinese))
- [8] 苏伯民, 陈港泉. 不同含盐量壁画地仗泥层的吸湿和脱湿速度的比较[J]. 敦煌研究, 2005, (5): 62 - 65.(SU Bomin, ChEN Gangquan. Compare on velocity of absorbing water and evaporation of simulated wall-paintings plaster contained salts in different amounts[J]. Dunhuang Research, 2005, (5): 62 - 65.(in Chinese))
- [9] 陈港泉, 苏伯民, 赵林毅, 等. 莫高窟第 85 窟壁画地仗酥碱模拟试验[J]. 敦煌研究, 2005, (4): 62 - 66.(ChEN Gangquan, SU Bomin, ZHAO Linyi, et al. Salting simulative test on wall painting plaster of cave 85 in Mogao Grottoes[J]. Dunhuang Research, 2005, (4): 62 - 66.(in Chinese))
- [10] 谷口陽子, 森井順之, 陈港泉, 等. 敦煌莫高窟 53 窟仏龕周辺における土壁中の可溶性塩類について[J]. 保存科学, 2005, 44(1): 124 - 137.
- [11] 汪万福, 王涛, 沈志宝. 敦煌莫高窟区大气环境成分的监测分析[J]. 高原气象, 2006, 125(1): 164 - 168.(WANG Wanfu, WANG Tao, SHEN Zhibao. Pollution status of harmful components to frescos in Dunhuang Mogao Grottoes[J]. Plateau Meteorology, 2006, 125(1): 164 - 168.(in Chinese))
- [12] 侯文芳, 薛平, 张国彬. 莫高窟第 217 窟微环境监测分析[J]. 敦煌研究, 2007, (5): 93 - 97.(HOU Wenfang, XUE Ping, ZHANG Guobin. Monitoring and analysis of micro-environment into cave 217 at Mogao Grottoes[J]. Dunhuang Research, 2007, (5): 93 - 97.(in Chinese))
- [13] 刘刚, 薛平, 侯文芳. 莫高窟 85 窟微气象环境的监测研究[J]. 敦煌研究, 2000, (1): 36 - 42.(LIU Gang, XUE Ping, HOU Wenfang. Study of the monitoring micro-meteorological environment of cave 85 of Mogao Grottoes[J]. Dunhuang Research, 2000, (1): 36 - 41.(in Chinese))
- [14] 李最雄. 丝绸之路石窟壁画彩塑保护[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 260 - 271.(LI Zuixiong. Conservation painting statue and wall paintings of grottoes on the Silk Road[M]. Beijing: Science Press, 2005: 260 - 271.(in Chinese))
- [15] 周启友. 从高密度电阻率成像法到三维空间上的包气带水文学[J]. 水文地质工程地质, 2003, 30(6): 97 - 102.(ZHOU Qiyu. Three-dimensional vadose zone hydrology based on high-density electrical resistivity tomography[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2003, 30(6): 97 - 102.(in Chinese))
- [16] 高亚成, 冷元宝. 高密度电阻率法的试验研究与应用[J]. 勘察科学技术, 2005, (6): 61 - 64.(GAO Yacheng, LENG Yuanbao. Application of resistivity tomography survey method based on model testing[J]. Investigation Science and Technology, 2005, (6): 61 - 64.(in Chinese))
- [17] 闫永利, 底青云, 高立兵, 等. 高密度电阻率法在考古勘探中的应用[J]. 物探与化探, 1998, (6): 452 - 457.(YAN Yongli, DI Qingyun, GAO Libing, et al. The application of high-density resistivity technique to archaeometry[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1998, (6): 452 - 457.(in Chinese))
- [18] 杨发杰, 巨妙兰, 刘全德. 高密度电阻率探测方法及其应用[J]. 矿产与地质, 2004, (4): 356 - 360.(YANG Fajie, JU Miaolan, LIU Quande. High density resistivity surveying method and its application[J]. Mineral Resources and Geology, 2004, (4): 356 - 360.(in Chinese))
- [19] RAMIREZ A, DAILY W, LABRECQUE D, et al. Monitoring an underground steam injection process using electrical resistivity tomography[J]. Water Resour. Res., 1993, 29(1): 73 - 87.
- [20] ZHOU Q Y, SHIMADA J, SATO A. Three-dimensional soil resistivity inversion using patching method[J]. Journal of the Japan Society of Engineering Geology, 1999, 39(6): 524 - 532.
- [21] ZHOU Q Y, MATSUI H, SHIMADA J, et al. Applications of electrical resistivity tomography in mapping rock dispersivity and monitoring water flow in heterogeneous media[C]// The International Groundwater Symposium. [S.l.]: [s.n.], 2002: 173 - 178.
- [22] IZUMOTANI S, NOGUCHI K. The behavior of velocity and resistivity of rocks due to fracture[J]. Butsuri Tansa, 1998, 51(3): 219 - 228.
- [23] NISHIMAKI H, SEKINE I, SAITO A, et al. Electrical resistivity of rock and its correlation to engineering properties[J]. Butsuri Tansa, 1999, 52(2): 161 - 171.
- [24] DAILY W, RAMIREZ A L. Electrical imaging of engineering hydraulic barriers[J]. Geophysics, 2000, 65(1): 83 - 94.