



## 基于核磁共振与波速测试的风化砂岩吸水性特征研究

牛然, 蒋小伟, 闫永帅, 欧阳恺皋, 孙献春, 闫宏彬, 万力

**Characteristics of water absorption capacity of weathered sandstone based on nuclear magnetic resonance and wave velocity testing**

NIU Ran, JIANG Xiaowei, YAN Yongshuai, OUYANG Kaigao, SUN Xianchun, YAN Hongbin, and WAN Li

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202403055>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于核磁共振与氮吸附技术的黄土含盐量对结合水膜厚度的影响研究

An experimental study of the influence of loess salinity on combined water film thickness based on NMR and nitrogen adsorption technique

何攀, 许强, 刘佳良, 蒲川豪, 陈达, 赵宽耀 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 142-149

#### 锦屏大理岩单轴压缩过程中的微结构演化

A study of mineral compositions and micro-structure characteristics for the Jinping marble

封陈晨, 李傲, 王志亮, 王浩然 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 90-96

#### 岩土体吸水膨胀应力系数的试验研究

Experimental research on water absorption expansion stress coefficient of rock and soil mass

郭永春, 许福周, 许嘉伦, 屈智辉 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 86-92

#### 不同沉积环境下马兰黄土孔隙分布与土水特征的模式分析

Mode analysis of pore distribution and soil -water characteristic curve of Malan loess under different depositional environments

李同录, 张辉, 李萍, 康海伟, 葛书磊 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 107-114

#### 隐伏岩溶区地下空间探测技术方法研究——以武汉市为例

Techniques for detecting underground space in hidden karst region: Taking Wuhan as an example

何军, 刘磊, 黎清华, 刘道涵, 陈标典, 张傲, 赵永波 水文地质工程地质. 2020, 47(6): 47-56

#### 双聚材料改良黄土持水性及生态效应研究

A study of water retention and ecological effects of loess improved by double polymers

朱利君, 裴向军, 张晓超, 任童, 杨晴雯 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 158-166



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: [10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202403055](https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202403055)

牛然, 蒋小伟, 闫永帅, 等. 基于核磁共振与波速测试的风化砂岩吸水性特征研究 [J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(2): 63-71.  
NIU Ran, JIANG Xiaowei, YAN Yongshuai, et al. Characteristics of water absorption capacity of weathered sandstone based on nuclear magnetic resonance and wave velocity testing[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(2): 63-71.

## 基于核磁共振与波速测试的风化砂岩吸水性特征研究

牛然<sup>1</sup>, 蒋小伟<sup>1</sup>, 闫永帅<sup>2</sup>, 欧阳恺皋<sup>1</sup>, 孙献春<sup>3</sup>, 闫宏彬<sup>4</sup>, 万力<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学(北京)地下水循环与环境演化教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 黄河水利职业技术学院水利工程学院, 河南 开封 475004; 3. 北京城建轨道交通建设工程有限公司, 北京 100088; 4. 云冈研究院, 山西 大同 037034)

**摘要:** 水是岩石风化破坏的关键因素, 高吸水性岩石一般更易受到风化破坏, 但一直缺少原位评估岩石吸水能力的方法。为探究岩石吸水能力的控制因素, 以云冈石窟不同风化程度砂岩为研究对象, 采用核磁共振技术测得岩石样品的孔隙度和孔径分布, 建立砂岩自由吸水率与密度、孔隙度、孔径的关系。结果表明: 砂岩自由吸水率与密度呈线性关系, 但两者的斜率与风化程度有关; 砂岩自由吸水率与孔隙度、小孔( $0.1 \sim 1.0 \mu\text{m}$ )占比均呈正相关性, 其中孔隙度是控制砂岩自由吸水率的主要原因, 孔隙结构是控制砂岩自由吸水率的次要原因; 由于波速受孔隙度和孔隙结构控制, 自由吸水率与波速有良好的线性关系, 因此提出可以通过原位测试波速估算岩体表层自由吸水率。本研究加深了对风化砂岩吸水性控制机理的认识, 并提出了一种可以原位获得石质文物自由吸水率的方法, 对石质文物保护具有重要的指导意义。

**关键词:** 孔隙度; 吸水性; 声波速度; 孔径分布; 核磁共振

中图分类号: P641.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2025)02-0063-09

## Characteristics of water absorption capacity of weathered sandstone based on nuclear magnetic resonance and wave velocity testing

NIU Ran<sup>1</sup>, JIANG Xiaowei<sup>1</sup>, YAN Yongshuai<sup>2</sup>, OUYANG Kaigao<sup>1</sup>, SUN Xianchun<sup>3</sup>, YAN Hongbin<sup>4</sup>, WAN Li<sup>1</sup>

(1. MOE Key Laboratory of Groundwater Circulation and Environmental Evolution, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. School of Hydraulic Engineering, Yellow River Conservancy Technical Institute, Kaifeng, Henan 475004, China; 3. Beijing Urban Construction Rail Transit Construction Engineering Co. Ltd., Beijing 100088, China; 4. Yungang Research Institute, Datong, Shanxi 037034, China)

**Abstract:** Water is a key factor in the weathering and erosion of rocks, and highly porous rocks are generally more susceptible to weathering. However, there has been a lack of in-situ methods for assessing the water absorption capacity of rocks. To investigate the controlling factors of rock water absorption capacity, sandstone with different

收稿日期: 2024-03-18; 修訂日期: 2024-06-07

投稿网址: [www.swdzgcdz.com](http://www.swdzgcdz.com)

基金项目: 山西省科技重大专项计划项目(202201150501024)

第一作者: 牛然(1999—), 女, 博士研究生, 主要从事非饱和岩石水力学方面研究工作。E-mail: [3005230019@email.cugb.edu.cn](mailto:3005230019@email.cugb.edu.cn)

通讯作者: 蒋小伟(1982—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水循环领域的教学与科研工作。E-mail: [jxw@cugb.edu.cn](mailto:jxw@cugb.edu.cn)

degrees of weathering collected from the Yungang Grottoes were selected as the study material. Nuclear magnetic resonance (NMR) technology was employed to test the porosity and pore size distribution of rock samples, and to establish the relationship between the free water absorption rate of sandstone and its density, porosity, and pore size. The results indicate that there is a linear relationship between the free water absorption rate and the density of sandstone, with the slope of the relationship being influenced by the degree of weathering. Additionally, the free water absorption rate of the sandstone is positively correlated with porosity and the proportion of small pores (0.1—1.0  $\mu\text{m}$ ), with porosity being the primary controlling factor and pore structure being the secondary controlling factor. This study deepens our understanding of the mechanisms controlling the water absorption of weathered sandstone. Furthermore, since wave velocity is also influenced by porosity and pore structure, a good linear relationship was observed between the free water absorption rate and wave velocity. Therefore, it is suggested that the free water absorption rate of rock mass can be estimated by in-situ testing of wave velocity.

**Keywords:** porosity; water absorption; acoustic wave velocity; pore size distribution; nuclear magnetic resonance

岩石风化是指表层岩石在物理、化学和生物等因素作用下发生物理崩解和化学分解的过程<sup>[1-2]</sup>，在地球生态系统和地貌演化中发挥着不可忽视的作用<sup>[3-4]</sup>，尤其对石质文物而言是一大危害<sup>[5-8]</sup>。对于完全干燥的岩石，即使温度发生大范围波动也不会产生物理和化学风化<sup>[9-11]</sup>。由于岩石通常具有吸水能力，雨水淋湿<sup>[12-13]</sup>、水汽凝结<sup>[14-16]</sup>和毛细上升<sup>[17-18]</sup>等作用都会增大岩石含水率。例如前人<sup>[19]</sup>指出石窟洞内的大气湿度会直接控制浅层砂岩的含水率。干湿交替条件下，岩石中的水分会引发物理、化学和生物风化<sup>[9, 20-24]</sup>。量化岩石的吸水能力及其控制因素有助于为石质文物风化防治提供决策依据。

如何利用无损的原位测试方法表征岩石吸水能力是岩石风化、工程地质等领域亟需解决的技术问题。岩石自由吸水率是表征岩石吸水能力的最常用指标，也是衡量岩石强度的重要指标之一<sup>[25]</sup>，是指长时间浸泡条件下吸收的水分体积与岩石总体积的比值<sup>[26]</sup>，属于有损检测方法。Ozcelik 等<sup>[25]</sup>建立了多种岩石自由吸水率与密度的负相关性，但由于密度无法无损获得，无法用于无损估算岩石自由吸水率。岩石的声波速度可以通过无损的原位测试方法获得，与岩石的孔隙结构、温度、节理、裂隙等密切相关<sup>[27-28]</sup>。在岩性相同的情况下声波速度受孔隙结构控制<sup>[26]</sup>，且与孔隙度<sup>[29]</sup>呈负相关性、与密度<sup>[30]</sup>和抗压强度<sup>[28]</sup>呈正相关性。黄继忠等<sup>[31]</sup>研究指出云冈石窟砂岩孔隙度作为控制水分进入岩石的关键因素，与渗透率和水汽扩散系数有密切的正相关性。由于岩石自由吸水率也受孔隙度<sup>[32]</sup>和孔隙结构<sup>[33-34]</sup>的控制，声波速度的无损检测优点及其与孔隙度、孔隙结构的相关性，为利

用声波速度间接获得岩石自由吸水率提供了可能。Park 等<sup>[35]</sup>提出砂岩在冻融循环的作用下声波速度与自由吸水率呈负相关性，然而目前尚未探究在自然受风化破坏的情况下，二者之间的关系。

本文以云冈石窟所在山体为研究区，采集水平方向不同风化程度的砂岩开展自由吸水率和密度测试，采用核磁共振(nuclear magnetic resonance, NMR)技术测定岩样的孔隙度和孔隙结构。在分析自由吸水率、波速控制机理的基础上，建立波速与自由吸水率的定量关系，提出了一种利用波速估算岩体表层自由吸水率的方法。

## 1 研究区概况

云冈石窟位于山西省大同市，气候类型为大陆季风性半干旱气候，冬季寒冷干燥，夏季炎热多雨。云冈石窟拥有洞窟 252 个，大小石雕造像有 5.1 万余尊，具有极高的艺术文化价值，被列为世界文化遗产<sup>[36]</sup>。然而在自然和人为因素影响下，云冈石窟多数洞窟内佛像、壁面遭受了严重的风化破坏(图 1)。

云冈石窟山体以中粗粒长石砂岩为主，存在少量颗粒较细的粉砂岩和页岩<sup>[37]</sup>。砂岩的多孔结构有利于吸收和储存水分，雨季的降水入渗和水汽在砂岩表面或内部凝结是造成云冈石窟风化破坏的重要原因<sup>[19, 38]</sup>，但目前尚无云冈石窟砂岩孔隙结构和吸水性的定量研究。

## 2 材料与测试方法

### 2.1 砂岩风化样品的采集和制备

本次测试岩样取自云冈石窟 3 窟加固工程的 6 个



图1 云冈石窟窟内佛像风化破坏现象

Fig. 1 Deterioration of buddha statues in a cave of the Yungang Grottoes

水平孔。将采集的岩样加工为直径为 2.5 cm, 高为 5 cm 的规则圆柱状岩芯, 共获得 60 个样品。图 2 为部分处理好后的岩芯。测定所有岩芯密度、自由吸水率后, 选取 22 个岩芯进行核磁共振测试。



图2 处理后的部分砂岩样品

Fig. 2 Some of the processed sandstone samples

## 2.2 密度和自由吸水率测试

本次研究采用精度为 0.001 g 的天平测量岩石样品质量( $m_t$ ), 采用精度为 0.05 mm 的游标卡尺测量圆柱体岩样高度( $h$ )和直径( $d$ )。计算岩石密度( $\rho$ ):

$$\rho = \frac{1}{4 \pi d^2 h} \quad (1)$$

岩石自由吸水率是表征岩石在正常大气压下吸水能力的指标, 可以用质量含水率或体积含水率表示。依据《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266—2013)<sup>[39]</sup>, 质量吸水率( $\omega_B$ ), 定义为岩石浸水 48 h 吸水后的质量( $m_0$ ), 与烘干后岩石的质量( $m_s$ )之比减 1:

$$\omega_B = \frac{m_0 - m_s}{m_s} = \frac{m_0}{m_s} - 1 \quad (2)$$

为直观对比砂岩自由吸水率和孔隙度之间的关系, 将质量吸水率转化为体积吸水率( $\omega_v$ ):

$$\omega_v = \omega_B \times \rho_d \quad (3)$$

式中:  $\rho_d$ ——砂岩干密度/(g·cm<sup>-3</sup>)。

## 2.3 核磁共振测试

自 1946 年哈佛大学 Purcell 和斯坦福大学 Bloch 发现核磁共振现象以来, NMR 技术因其具有快速准确表征岩石孔隙度和微观孔隙结构的能力在水文地质、岩土力学和油气储层等领域广泛应用<sup>[40–43]</sup>。NMR 技术的基本原理是: 岩石孔隙水中氢原子核在外加磁场的作用下会发生共振, 在共振过程中由于碰撞能量不断消减, 通过测量核磁共振信号强弱及能量达到稳定所用的时间即弛豫时间可以间接表征岩石内部的孔径分布情况<sup>[44]</sup>。通常共振信号量与孔隙内部赋存的水量成正比, 氢核的弛豫时间( $T_2$ )与孔隙半径呈正比<sup>[45]</sup>。当所测岩石内部孔隙被水充满时, 测得的共振信号量与孔隙体积成正比, 所以低场核磁共振测试可以反映岩石内部的孔径分布情况。此外通过测试获得的  $T_2$  谱图还可以反映岩石内部孔径分布特征: 例如峰值的位置对应孔径的尺寸, 峰的面积对应一定范围内的孔隙体积, 峰的形状对应各类孔隙的连通性。光滑的峰通常表示孔隙具有良好的连通性, 不规则或分散的峰可能表示孔隙之间缺乏有效的连接<sup>[46]</sup>。

本次测试在中国地质大学(北京)煤储层物性分析实验室完成, 仪器型号为苏州纽迈公司生产的 MacroMR 低场核磁共振仪。参数设定如下: 主磁场为 0.047 T, 氢核共振频率为 2 MHz, 磁体控制温度为 35 °C, 射频功率 300 W, 扫描次数(NS)为 32 次, 回波间隔(TE)为 0.3 ms, 等待时间(TW)为 3 000 ms, 回波个数(NECH)为 8 000 个。

测试的具体过程为: (1)将岩芯放置烘箱进行烘干, 温度设置为 105 °C, 时间设置为 48 h; (2)烘干后将岩芯放入高压容器, 对容器进行抽真空处理, 再以 30 MPa 高压向容器中注入蒸馏水; (3)饱和完成后, 擦干岩芯表面的水分进行低场核磁共振的测量。

## 2.4 声波速度测试

岩石声波速度实验采用 ZBL-U520 非金属超声检测仪, 厂家为北京智博联科技有限公司。其基本原理是在一定的压力和温度条件下测试声波穿过岩样的时间, 通过岩样长度除以穿透时间获得岩样的波速:

$$v_p = \frac{L}{t_p} \quad (4)$$

式中:  $v_p$ ——岩体的纵波波速/(km·s<sup>-1</sup>);

$L$ ——岩样长度/mm;

$t_p$ ——纵波穿过岩体经历的时间/μs。

### 3 结果

根据 60 个样品的自由吸水率和密度测试结果,发现岩石样品自由吸水率的均值为 8.37%,最大值和最小值分别为 11.04% 和 4.71%。密度的均值为  $2.42 \text{ g/cm}^3$ ,变化范围为  $2.28 \sim 2.56 \text{ g/cm}^3$ 。依据风化岩分带指标定量范围值法(TR 分带法)<sup>[47]</sup>确定强风化砂岩与弱风化砂岩的密度临界值为  $2.43 \text{ g/cm}^3$ 。通过统计发现 36 个样品的密度小于  $2.43 \text{ g/cm}^3$ , 属于强风化砂岩, 自由吸水率均值为 9.59%; 24 个样品的密度大于  $2.43 \text{ g/cm}^3$ ,

属于弱风化砂岩自由吸水率均值为 7.26%, 明显小于强风化砂岩。

表 1 为 22 个岩石样品自由吸水率、波速、密度、孔隙度的测试结果以及微孔( $<0.1 \mu\text{m}$ )、小孔( $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$ )、中孔( $1 \sim 10 \mu\text{m}$ )和大孔( $>10 \mu\text{m}$ )的占比情况。孔隙度分布范围为 7.69% ~ 13.62%, 均值为 10.80%。所有样品的自由吸水率均小于孔隙度。波速平均值为  $3.12 \text{ km/s}$ , 最大值和最小值分别为  $2.50, 3.68 \text{ km/s}$ , 波速最小值样品与自由吸水率最大值样品存在对应关系。

表 1 岩石样品的物理参数及各类孔隙占比

Table 1 Physical parameters and proportions of different types of pores of the rock samples

岩芯编号	自由吸水率/%	波速/(km·s <sup>-1</sup> )	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	孔隙度/%	微孔占比/%	小孔占比/%	中孔占比/%	大孔占比/%
1	9.44	3.38	2.33	12.28	0.21	25.46	54.47	19.86
2	8.17	3.57	2.39	10.59	5.53	23.91	53.92	16.65
3	9.10	3.47	2.37	10.50	0.00	21.59	55.62	22.79
4	8.86	3.38	2.38	10.41	0.25	12.13	59.96	27.65
6	8.67	2.91	2.44	10.20	1.40	32.96	45.37	20.27
10	8.74	3.14	2.42	10.65	0.00	17.33	56.35	26.32
16	9.13	3.09	2.40	10.72	0.00	20.40	53.26	26.35
21	8.83	3.22	2.44	10.64	1.33	21.91	50.31	26.45
111a	9.51	3.13	2.36	10.94	2.87	26.31	57.41	13.40
111b	9.49	2.90	2.33	11.34	6.17	28.11	52.48	13.24
112a	10.67	2.75	2.32	13.06	1.75	35.40	44.09	18.76
112b	10.10	2.74	2.43	12.81	2.64	42.76	41.59	13.01
136a	9.42	2.98	2.37	9.78	0.00	21.00	61.13	17.87
136b	9.36	2.90	2.40	9.84	3.96	25.27	59.33	11.45
136c	9.01	3.13	2.36	9.26	0.00	19.81	59.46	20.73
137a	8.90	3.29	2.41	9.16	0.00	29.94	52.98	17.08
137b	9.02	3.68	2.41	12.40	7.13	38.00	43.01	11.87
137d	9.06	3.47	2.37	10.51	5.57	35.05	51.10	8.28
39a	9.88	2.75	2.29	13.62	4.31	28.42	49.45	17.82
39b	10.77	2.50	2.30	12.60	4.85	33.55	48.65	12.94
40a	8.66	3.29	2.45	7.69	0.00	31.94	57.80	10.26
40b	8.84	3.03	2.41	8.68	7.08	34.46	48.80	9.66

岩石样品中微孔体积占比范围变化较小, 为 0 ~ 7.13%; 中孔变化范围较大, 为 41.59% ~ 61.13%; 小孔变化范围为 12.13% ~ 35.40%; 大孔变化范围为 8.28% ~ 27.65%。

### 4 讨论

#### 4.1 自由吸水率与密度的关系

通过绘制自由吸水率和密度的关系图(图 3)可以发现自由吸水率与密度整体呈负相关, 与 Ozcelik 等<sup>[25]</sup>的结论一致。依据风化岩 TR 分带法<sup>[47]</sup>, 强风化砂岩与弱风化砂岩的密度临界值为  $2.43 \text{ g/cm}^3$ 。对于密度大于  $2.43 \text{ g/cm}^3$  的弱风化岩石样品, 自由吸水率与密度

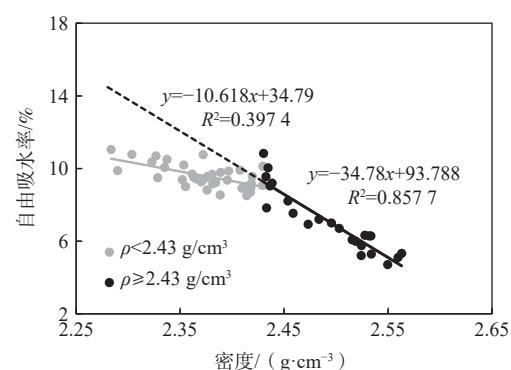


图 3 不同风化程度砂岩的自由吸水率随密度变化规律

Fig. 3 Variation of free water absorption rate with density of sandstone with different degrees of weathering

之间存在很好的相关性,相关系数( $R^2$ )高达0.8577,两者的斜率为-34.78;对于密度小于2.43 g/cm<sup>3</sup>的强风化岩石样品,自由吸水率与密度之间也存在相关性,但 $R^2$ 仅为0.3974,且两者的斜率仅为-10.62。

这是因为强风化砂岩由于受到风化作用内部存在较多的风化裂隙和大孔,大孔的比表面积小,没有足够的毛细吸力持水,所以相比于弱风化砂岩,强风化砂岩自由吸水率虽然较大,但小于预期的自由吸水率。如果利用弱风化岩石的自由吸水率随密度变化规律预测强风化岩石的自由吸水率,显然会高估其自由吸水率。可见,对于风化程度存在明显差异的砂岩,无法用单一函数刻画自由吸水率与密度的关系。

#### 4.2 孔隙度和孔隙结构对自由吸水率的控制作用

为探究砂岩自由吸水率和波速的控制因素,选择部分岩石样品利用NMR技术测得孔隙度和孔径分布。分析表明,砂岩自由吸水率和孔隙度之间存在较好的线性正相关关系(图4a),表明孔隙度对自由吸水率有重要控制作用。

通过回归分析发现孔隙结构对自由吸水率也有

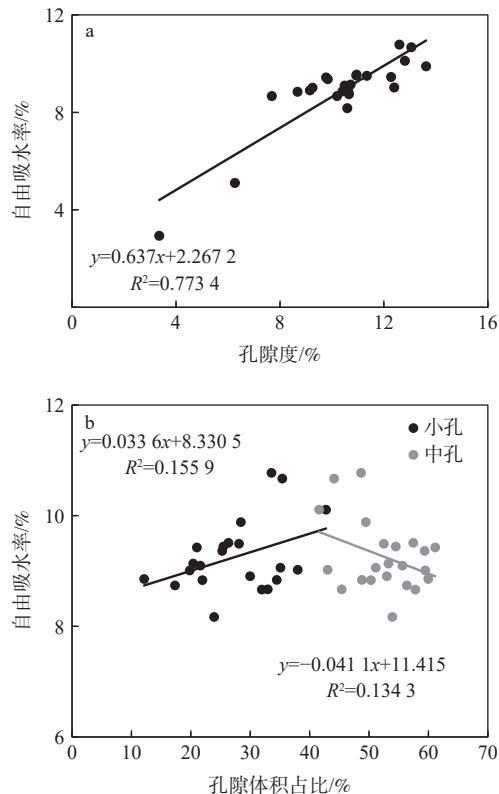


图4 砂岩自由吸水率随孔隙度(a)及小、中孔占比(b)的变化规律

Fig. 4 Variation of free water absorption rate of sandstone with porosity (a), and proportion of small pores and medium-sized pores (b)

控制作用。线性回归中的t检验是对单个变量系数的显著性检验,  $p$ 值是衡量该系数是否显著不同于0的标准。如果 $p$ 值小于0.05表示该自变量对因变量有显著的控制;如果 $p$ 值大于0.05小于0.10表示该自变量对因变量有一定的影响。通过回归分析建立4种孔径与自由吸水率的线性关系,发现吸水率与微孔、大孔占比之间线性关系的显著性 $p$ 值高达0.60和0.37,表明微孔、大孔对自由吸水率无明显贡献,其原因为岩石自由吸水状态下水分很难进入微孔( $<0.1\text{ }\mu\text{m}$ ),同时大孔( $>10\text{ }\mu\text{m}$ )很难持水。砂岩自由吸水率与小孔占比呈线性正相关,与中孔占比呈线性负相关(图4b),显著性 $p$ 值分别为0.06和0.09。小孔和中孔对自由吸水率的控制机理可以解释为小孔比表面积大,有利于岩石吸水,中孔比表面积小,没有足够的毛细吸力持水,不利于岩石持水。由于自由吸水率—孔隙度线性关系的 $R^2$ 大于自由吸水率—小孔和中孔占比线性关系,本文认为孔隙度是控制砂岩自由吸水率的主要原因,孔隙结构是控制砂岩自由吸水率的次要原因。

自由吸水率随孔隙度线性变化的斜率在一定程度上可以表征具有吸水、持水能力孔隙( $0.1\text{~}10.0\text{ }\mu\text{m}$ )的占比,斜率大表示具有吸水、持水能力的孔隙( $0.1\text{~}10.0\text{ }\mu\text{m}$ )占比大。云岗石窟砂岩的斜率为0.64,略小于小孔和中孔占比平均值80.1%。其他3种岩石自由吸水率随孔隙度变化斜率见表2。大理岩和灰岩的斜率分别为0.44和0.47,与这2种岩石较为致密不利于吸水密切相关。例如,文献[48]提出灰岩微孔占比为34%~88%。安山岩的斜率高达0.83,推测其孔隙有利于持水。Çelik等<sup>[17]</sup>研究认为安山岩的小孔和中孔占比高达88.20%。

表2 不同岩石自由吸水率随孔隙度的变化斜率  
Table 2 Slopes of the variation of free water absorption rate with porosity for different types of rocks

岩石类别	$k$
云岗砂岩	0.64
灰岩	0.47
大理岩	0.44
安山岩	0.83

注:  $k$ 表示自由吸水率随孔隙度的变化斜率;灰岩、大理岩和安山岩 $k$ 值据文献[25];云岗砂岩的 $k$ 值为本次研究结果。

#### 4.3 吸水性与波速的定量关系对原位预测自由吸水率的启示

纵波在穿过裂隙和孔隙时存在一定的反射和折射,微小孔数量过多会增大声波在砂岩内部的传播阻力,导致波速较小,而中孔数量少会减小声波在砂岩

内部的传播阻力,导致波速较大<sup>[49]</sup>。因此,砂岩波速与孔隙度及小孔、中孔占比的对应关系和自由吸水率与孔隙度及小孔、中孔占比的对应关系刚好相反,即砂岩波速和孔隙度之间呈线性负相关(图5a),与小孔占比呈负相关,与中孔占比呈正相关(图5b)。

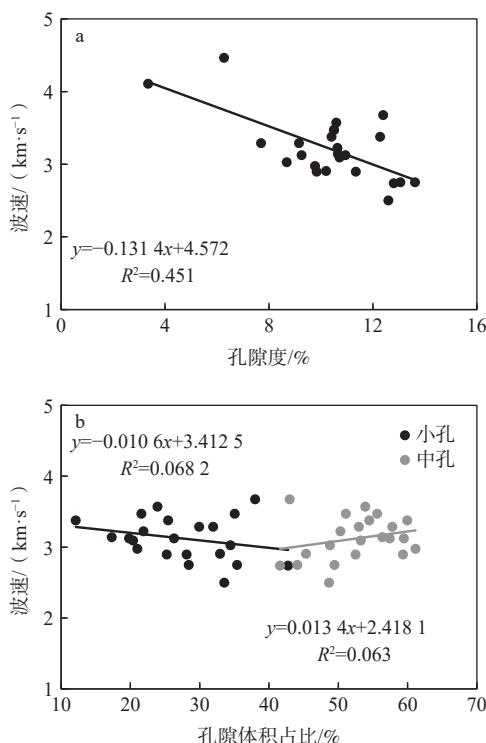


图5 砂岩波速随孔隙度(a)及小孔、中孔占比(b)的变化规律

Fig. 5 Variation of wave velocity of sandstone with porosity (a) and proportion of small pores and medium-sized pores (b)

由于孔隙度、孔隙结构对波速和自由吸水率均有控制作用,统计发现自由吸水率与波速之间存在较好的线性关系(图6), $R^2$ 达到0.7492,显著性p值小于0.01,

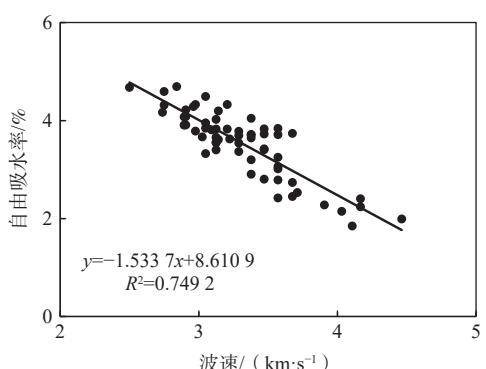


图6 砂岩自由吸水率与波速关系

Fig. 6 Relationship between free water absorption rate and wave velocity of sandstone

且不存在图3自由吸水率—密度关系分段特征。徐松林等<sup>[50]</sup>通过研究指出,对于岩性较为均匀的岩石,波速的尺度效应可以忽略。因此,根据波速与吸水率之间的良好线性关系,可以采用无损方法在野外现场多个不同部位原位测试石窟表层砂岩的波速,从而确定砂岩表层自由吸水率在空间上的相对大小,判断易风化程度。

## 5 结论

(1) 砂岩自由吸水率与密度整体呈线性负相关关系,但强风化砂岩与弱风化砂岩自由吸水率随密度变化的斜率存在较大差异,因此密度不适合用于估算岩石吸水性。

(2) 砂岩自由吸水率受孔隙度和孔径控制,其中砂岩自由吸水率与孔隙度、小孔( $0.1\sim1.0\mu\text{m}$ )占比呈线性正相关性,与中孔( $1\sim10\mu\text{m}$ )占比呈线性负相关性。对比两者的相关系数大小发现孔隙度是控制砂岩自由吸水率的主要原因,孔隙结构是控制砂岩自由吸水率的次要原因。

(3) 砂岩波速与孔隙度、小孔( $0.1\sim1.0\mu\text{m}$ )占比呈负相关。由于砂岩的自由吸水率和波速具有较好的线性负相关关系,可以在野外原位测试波速从而估算岩石表层自由吸水率的空间分布,评估易风化程度。

## 参考文献 (References) :

- [1] CARROLL D. Rock weathering[M]. New York: Plenum Press, 1970.
- [2] SHI Zhenming, JIANG Tao, JIANG Mingjing, et al. DEM investigation of weathered rocks using a novel bond contact model[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2015, 7(3): 327–336.
- [3] CHIZHIKOVA N P, LESSOVAIA S N, GORBUSHINA A A. Biogenic weathering of mineral substrates (review) [M]//Lecture Notes in Earth System Sciences. Cham: Springer International Publishing, 2015: 7–14.
- [4] TIAN Fei, TIAN Mingzhong, LIU Jin. Characteristics, multi-phase evolution and genesis of weathering pits in Qing Mountain, Inner Mongolia, China[J]. *Journal of Earth Science*, 2013, 24(3): 457–470.
- [5] 汪军,徐金明,龚明权,等.基于扫描电镜图像和微观渗流模型的云冈石窟砂岩风化特征分析[J].水文地质工程地质,2021,48(6): 122–130. [WANG Jun, XU Jinming, GONG Mingquan, et al. Investigating weathering features of sandstones in the Yungang Grottoes

- based on SEM images and micro-scale flow model[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(6): 122–130. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 6 ] 安程. 石窟环境监测模拟及整体性分析研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2019. [ AN Cheng. Study on environmental monitoring simulation and holistic analysis of grottoes[M]. Beijing: Science Press, 2019. (in Chinese) ]
- [ 7 ] 侯志鑫, 者瑞, 张中俭. 砂岩质文物风化机理研究——以云冈石窟为例 [J]. 工程勘察, 2020, 48(9): 1–5. [ HOU Zhixin, ZHE Rui, ZHANG Zhongjian. Experimental study on the weathering mechanism of sandstone cultural relics: A case study of Yungang Grottoes[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2020, 48(9): 1–5. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 8 ] 黄继忠, 袁道先, 万力, 等. 水岩作用对云冈石窟石雕风化破坏的化学效应研究 [J]. *敦煌研究*, 2010(6): 59–63. [ HUANG Jizhong, YUAN Daoxian, WAN Li, et al. A study on chemical effect on the water-rock interaction on the weathering of stone sculpture Yungang Grottoes[J]. *Dunhuang Research*, 2010(6): 59–63. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 9 ] HALL K, HALL A. Weathering by wetting and drying: Some experimental results[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1996, 21(4): 365–376.
- [ 10 ] SUMNER P D, LOUBSER M J. Experimental sandstone weathering using different wetting and drying moisture amplitudes[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2008, 33(6): 985–990.
- [ 11 ] TURKINGTON A V, PARADISE T R. Sandstone weathering: A century of research and innovation[J]. *Geomorphology*, 2005, 67(1/2): 229–253.
- [ 12 ] 任建光, 孟田华, 黄继忠, 等. 云冈石窟顶部第四纪土壤覆盖层含水率变化特征及洞窟渗漏水问题探讨 [J]. 文物保护与考古科学, 2023, 35(3): 80–86. [ REN Jianguang, MENG Tianhua, HUANG Jizhong, et al. Discussion on the variation characteristics of water content of Quaternary soil cover on the top of Yungang Grottoes and the problem of water seepage in caves[J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 2023, 35(3): 80–86. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 13 ] 马雪雅, 张理想, 陈银桥, 等. 庆阳北石窟寺濒危岩体变形特征分析 [J]. 地震工程学报, 2023, 45(5): 1145–1155. [ MA Xueya, ZHANG Lixiang, CHEN Yinqiao, et al. Deformation characteristics of dangerous rock masses in the North Grotto Temple, Qingyang City[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2023, 45(5): 1145–1155. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 14 ] LI Hongshou, WANG Wanfu, ZHAN Hongtao, et al. Water in the Mogao Grottoes, China: Where it comes from and how it is driven[J]. *Journal of Arid Land*, 2015, 7(1): 37–45.
- [ 15 ] 马策, 蒋小伟, 闫宏彬, 等. 基于红外热成像技术的石窟壁面凝结水形成规律研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(4): 30–36. [ MA Ce, JIANG Xiaowei, YAN Hongbin, et al. A study of the formation pattern of condensation water in grottoes based on the infrared thermal imaging technology[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(4): 30–36. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 16 ] 朱华, 杨刚亮, 方云, 等. 龙门石窟潜溪寺凝结水病害形成机理及防治对策研究 [J]. *中原文物*, 2008(4): 109–112. [ ZHU Hua, YANG Gangliang, FANG Yun, et al. Study on formation mechanism and prevention measures of condensate disease in Qianxi Temple of Longmen Grottoes[J]. *Cultural Relics of Central China*, 2008(4): 109–112. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 17 ] ÇELIK M Y, KAÇMAZ A U. The investigation of static and dynamic capillary by water absorption in porous building stones under normal and salty water conditions[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(4): 307.
- [ 18 ] WINKLER E M. Stone in architecture[M]. Berlin Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [ 19 ] 欧阳恺皋, 蒋小伟, 马策, 等. 岩体表层凝结水的形成与转化规律: 对岩石风化水分来源的指示意义 [J]. 地学前缘, 2023, 30(2): 506–513. [ OUYANG Kaigao, JIANG Xiaowei, MA Ce, et al. Formation and transformation of condensate water inside rocks: Insight into source of rock moisture affecting weathering[J]. *Earth Science Frontiers*, 2023, 30(2): 506–513. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 20 ] RUEDRICH J, BARTELSEN T, DOHRMANN R, et al. Moisture expansion as a deterioration factor for sandstone used in buildings[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 63(7/8): 1545–1564.
- [ 21 ] DE KOCK T, TURMEL A, FRONTEAU G, et al. Rock fabric heterogeneity and its influence on the petrophysical properties of a building limestone: Lede stone (Belgium) as an example[J]. *Engineering Geology*, 2017, 216: 31–41.
- [ 22 ] SASS O, VILES H. Heritage hydrology: A conceptual

- framework for understanding water fluxes and storage in built and rock-hewn heritage[J]. *Heritage Science*, 2022, 10(1): 66.
- [23] 邓华锋, 张恒宾, 李建林, 等. 水-岩作用对砂岩卸荷力学特性及微观结构的影响 [J]. 岩土力学, 2018, 39(7): 2344 – 2352. [ DENG Huafeng, ZHANG Hengbin, LI Jianlin, et al. Effect of water-rock interaction on unloading mechanical properties and microstructure of sandstone [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(7): 2344 – 2352. (in Chinese with English abstract) ]
- [24] 陈钊, 兰恒星, 刘世杰, 等. 干湿循环作用下石窟砂岩的抗拉强度劣化机理及破坏模式 [J]. 地球科学, 2024, 49(2): 612 – 624. [ CHEN Zhao, LAN Hengxing, LIU Shijie, et al. Mechanism and failure mode of tensile strength deterioration of shikuosi sandstone under dry and wet cycling [J]. *Earth Science*, 2024, 49(2): 612 – 624. (in Chinese with English abstract) ]
- [25] OZCELIK Y, OZGUVEN A. Water absorption and drying features of different natural building stones[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 63: 257 – 270.
- [26] ZHANG Yaoyao, CAO Yingbing, LI Zhijun, et al. Mechanical properties and failure mechanism of granite with maximum free water absorption under triaxial compression[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(8): 3930.
- [27] JIANG Liming, SUN Jun, LIU Xiaobo. Pore-space microstructure and clay content effect on the elastic properties of sandstones[J]. *Petroleum Science and Technology*, 2012, 30(8): 830 – 840.
- [28] REZAEI M, DAVOODI P K, NAJMODDINI I. Studying the correlation of rock properties with P-wave velocity index in dry and saturated conditions[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2019, 169: 49 – 57.
- [29] MOHAMED, KASSAB, ANDREAS, et al. Porosity estimation from compressional wave velocity: A study based on egyptian carbonate samples[J]. *Journal of Earth Science*, 2013, 3(5): 314 – 321.
- [30] 孟召平, 刘常青, 贺小黑, 等. 煤系岩石声波速度及其影响因素实验分析 [J]. *采矿与安全工程学报*, 2008, 25(4): 389 – 393. [ MENG Zhaoping, LIU Changqing, HE Xiaohei, et al. Experimental research on acoustic wave velocity of coal measures rocks and its influencing factors [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2008, 25(4): 389 – 393. (in Chinese with English abstract) ]
- [31] 黄继忠, 郑伊, 张悦, 等. 云冈石窟砂岩水汽扩散特性研究 [J]. 西北大学学报(自然科学版), 2021, 51(3): 370 – 378. [ HUANG Jizhong, ZHENG Yi, ZHANG Yue, et al. The water vapor diffusion characteristics of sandstone in Yungang Grottoes [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2021, 51(3): 370 – 378. (in Chinese with English abstract) ]
- [32] ÜNAL M, ALTUNOK E. Determination of water absorption properties of natural building stones and their relation to porosity[J]. *e-journal of new world sciences academy*, 2019, 14(1): 39 – 45.
- [33] LAI Fengpeng, LI Zhiping, ZHANG Tiantian, et al. Characteristics of microscopic pore structure and its influence on spontaneous imbibition of tight gas reservoir in the Ordos Basin, China[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 172: 23 – 31.
- [34] 王萍, 展屏. 基于核磁共振的脆硬性泥页岩水化损伤演化研究 [J]. 岩土力学, 2015, 36(3): 687 – 693. [ WANG Ping, QU Zhan. NMR technology based hydration damage evolution of hard brittle shale [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(3): 687 – 693. (in Chinese with English abstract) ]
- [35] PARK K, LEE B Y, LEE K, et al. Analysis of effects of rock physical properties changes from freeze-thaw weathering in ny-ålesund region: Part 2—correlations and prediction of weathered properties[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(10): 3392.
- [36] 李炳武, 李立芬, 郭静娜. 云冈石窟: 酝酿千秋的北魏佛国 [M]. 西安: 西安出版社, 2020. [ BING Wu, LI Lifen, GUO Jingna. *Yungang Grottoes: The glorious buddhist kingdom of Northern Wei for thousands of years* [M]. Xi'an: Xi'an Publishing House, 2020. (in Chinese) ]
- [37] 严绍军, 陈嘉琦, 窦彦, 等. 云冈石窟砂岩特性与岩石风化试验 [J]. *现代地质*, 2015, 29(2): 442 – 447. [ YAN Shaojun, CHEN Jiaqi, DOU Yan, et al. Characteristics of Yungang Grottoes sandstone and weathering simulation tests [J]. *Geoscience*, 2015, 29(2): 442 – 447. (in Chinese with English abstract) ]
- [38] 方云, 乔梁, 陈星, 等. 云冈石窟砂岩循环冻融试验研究 [J]. 岩土力学, 2014, 35(9): 2433 – 2442. [ FANG Yun, QIAO Liang, CHEN Xing, et al. Experimental study of freezing-thawing cycles on sandstone in Yungang grottoes [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(9): 2433 – 2442. (in Chinese with English abstract) ]
- [39] 中国电力企业联合会. 工程岩体试验方法标准: GB/T 50266—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013. [ China Electricity Council. Standard for test methods of

- engineering rock mass: GB/T 50266—2013[S]. Beijing: China Planning Press, 2013. (in Chinese)
- [40] SHARMA S, CASANOVA F, WACHE W, et al. Analysis of historical porous building materials by the NMR-MOUSE[J]. Magnetic Resonance Imaging, 2003, 21(3/4): 249–255.
- [41] BOWERS M C, EHRLICH R, HOWARD J J, et al. Determination of porosity types from NMR data and their relationship to porosity types derived from thin section[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 1995, 13(1): 1–14.
- [42] 张倩, 董艳辉, 童少青, 等. 核磁共振冷冻测孔法及其在页岩纳米孔隙表征的应用 [J]. 科学通报, 2016, 61(21): 2387–2394. [ZHANG Qian, DONG Yanhui, TONG Shaoqing, et al. Nuclear magnetic resonance cryoporometry as a tool to measure pore size distribution of shale rock[J]. Chinese Science Bulletin, 2016, 61(21): 2387 – 2394. (in Chinese with English abstract) ]
- [43] 周华, 高峰, 周萧, 等. 云冈石窟不同类型砂岩的核磁共振  $T_2$  谱—压汞毛管压力换算 C 值研究 [J]. 地球物理学进展, 2013, 28(5): 2759–2766. [ZHOU Hua, GAO Feng, ZHOU Xiao, et al. The translation Rresearch of different types sandstone of Yungang Grottoes in NMR  $T_2$ -mercury capillary pressure[J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(5): 2759 – 2766. (in Chinese with English abstract) ]
- [44] 姚艳斌, 刘大锰. 基于核磁共振弛豫谱的煤储层岩石物理与流体表征 [J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(6): 14–22. [YAO Yanbin, LIU Dameng. Petrophysics and fluid properties characterizations of coalbed methane reservoir by using NMR relaxation time analysis[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(6): 14 – 22. (in Chinese with English abstract) ]
- [45] 姜德义, 张水林, 陈结, 等. 砂岩循环冻融损伤的低场核磁共振与声发射概率密度研究 [J]. 岩土力学, 2019, 40(2): 436 – 444. [JIANG Deyi, ZHANG Shuilin, CHEN Jie, et al. Low filed NMR and acoustic emission probability density study of freezing and thawing cycles damage for sandstone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(2): 436 – 444. (in Chinese with English abstract) ]
- [46] 刘志军, 杨栋, 邵继喜, 等. 基于低场核磁共振的抚顺油页岩孔隙连通性演化研究 [J]. 波谱学杂志, 2019, 36(3): 309 – 318. [LIU Zhijun, YANG Dong, SHAO Jixi, et al. Evolution of pore connectivity in the Fushun oil shale by low-field nuclear magnetic resonance spectroscopy[J]. Chinese Journal of Magnetic Resonance, 2019, 36(3): 309 – 318. (in Chinese with English abstract) ]
- [47] 廖彦萱. 风化岩分带指标定量研究 [M]. 北京: 地震出版社, 1994. [LIAO Yanxuan. Quantitative study on zoning index of weathered rock[M]. Beijing: Seismological Press, 1994. (in Chinese) ]
- [48] STÜCK H L, PLATZ T, MÜLLER A, et al. Natural stones of the Saale–unstrut Region (Germany): Petrography and weathering phenomena[J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(8): 300.
- [49] LIU Bin, ZHANG Tong, ZHANG Hongwei, et al. Mechanical properties and acoustic emission characteristics of weakly cemented sandstone with different grain sizes[J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 10: 939372.
- [50] 徐松林, 郑文, 刘永贵, 等. 岩体中弹性波传播尺度效应的初步分析 [J]. 岩土工程学报, 2011, 33(9): 1348 – 1356. [XU Songlin, ZHENG Wen, LIU Yonggui, et al. A preliminary analysis of scale effect of elastic wave propagation in rock mass[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(9): 1348 – 1356. (in Chinese with English abstract) ]

编辑: 张若琳