

云冈石窟顶部土层水盐分布特征研究

刘成¹, 孙文静^{1,2}, 黄继忠², 任建光³

(1. 上海大学土木工程系, 上海 200444; 2. 上海大学文化遗产保护基础科学研究院, 上海 200444;
3. 云冈石窟研究院, 山西大同 037007)

摘要: 可溶盐是石质文物风化的重要原因, 其聚集、运移与水密不可分。石窟顶部土层中的盐是云冈石质文物内部盐分的重要来源, 因而研究石窟顶部土层中的水盐分布特征对未来减小可溶盐在石质文物内部的聚集具有十分重要的意义。本研究对云冈石窟顶部不同位置、不同深度土层的饱和渗透系数、含水率、孔隙比、可溶盐含量进行了系统的分析测试, 并结合取土位置的坡度和植被覆盖率, 研究了云冈石窟顶部土层中水盐分布特征。结果表明: 植被覆盖率越高, 土体含水量越高; 坡度越大, 土体含水率越低; 土体孔隙比与饱和渗透系数呈线性关系。植被覆盖率、坡度及土体的渗透性能是影响石窟顶部土层水盐分布的主要原因。

关键词: 含水率; 可溶盐; 饱和渗透系数; 植被覆盖率; 坡度

中图分类号: K879.2 文献标识码: A

DOI:10.16334/j.cnki.cn31-1652/k.2020.03.010

0 引言

据统计, 作为世界文化遗产之一的云冈石窟在历史上有大小佛像约十万尊, 现存存五万一千余尊。盐分对石窟的破坏是造成这种状况的主要原因, 学者们对此做了相关的调查和研究。

张赞勋等^[1]发现造成石刻风化的可溶盐主要为硫酸盐和碳酸盐。李黎等^[2]用浙江龙游石窟石材进行反复浸泡-干燥循环试验, 证明了 SO_4^{2-} 和 Cl^- 能够加速砂岩风化。LEHMANN^[3]于1971年提出了盐分的积累会对石质文物造成破坏。田秋林等^[4]提出盐分的积累与土中水分的迁移密切相关: 盐分在水的作用下, 由覆盖土层迁移至石质文物内部。郭芳^[5]的研究表明, 云冈石窟岩体内部的硫酸盐是通过雨水进入岩土体内部的, 进而导致岩体的破坏。JIANG等^[6]的研究表明, 石窟中的盐源于土壤覆盖层, 在水的作用下, 盐分经过砂岩风化带, 最终在石窟中富集。黄继忠^[7]的研究表明, 石雕表层可形成结晶水的盐类在干燥环境下失去结晶水, 在梯度作用下, 表层盐分不断增加, 当石雕表面的空隙和微裂隙中盐分积累至一定量时, 盐分在低温或高

湿时又吸水膨胀产生压力, 加速了矿物颗粒间连结的破坏和裂隙的扩张, 从而促使石雕表层的剥落。王金华^[8]以及张兵峰^[9]研究了重庆大足石刻的可溶盐破坏机理: 风化作用生成的石膏、芒硝等可溶性盐聚集在岩石孔隙中, 潮湿时吸水结晶膨胀, 失水时收缩。膨胀收缩反复作用, 破坏效应积累, 导致岩石结构遭到破坏。

由此可见, 石质文物的破坏离不开水和盐的共同作用, 为防治石窟文物表面的盐害, 非常有必要研究石窟顶部土层的水盐分布特征, 从而更有针对性地开展石窟顶部的防渗工作。

在水盐分布特征方面, 杨善龙等^[10]研究了榆林窟崖体砾岩中水盐分布特征, 许健等^[11]阐释了水盐分布规律及黄土边坡盐蚀剥落病害的机理, 李小倩等^[12]研究了潜水埋深对土体水盐分布的影响。但是目前, 将土体渗透性、植被覆盖率以及地势等因素与土体水盐分布特征研究相结合还较少。因此, 本研究针对上述因素开展了对云冈石窟顶部土层水盐分布特征的研究, 为云冈石窟顶部土层增强防渗提供重要的数据支撑和理论依据。

收稿日期: 2019-06-05; 修回日期: 2019-12-12

基金项目: 国家重点研发计划资助(2019YFC1520500), 国家自然科学基金资助(41572284, 41977214), 山西省重点研发计划项目(201803D31014)

作者简介: 刘成(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事文物盐害方面的研究, E-mail: 1395231000@qq.com

通信作者: 孙文静(1981—), 女, 博士, 研究员, 主要从事非饱和土力学、环境岩土方面的研究, E-mail: wjsun@shu.edu.cn

1 取样情况

1.1 取样位置和取样方法

云冈石窟顶部土体为第四纪覆盖层,其中:第 3 窟顶土体属中更新统,主要成分为亚黏土,厚度约 1~3 m;第 5 窟和第 18 窟顶土体属上更新统,主要成分为轻亚黏土,厚度约 0.5~1.5 m;第 42 窟顶土体属全更新统,主要成分为亚黏土,厚度约 0.4~1 m^[13]。第 3 窟、第 5 窟、第 18 窟和第 42 窟包含了所有类型第四纪覆盖层。此外,第 18 窟属

昙曜五窟之一,是云冈的第一期石窟;第 5 窟为云冈第二期石窟;第 3 窟为云冈石窟空间最大的洞窟,其洞窟开凿于北魏,但雕像为唐代所雕凿,位于昙曜五窟以东;第 42 窟为云冈第三期石窟,位于昙曜五窟以西^[14]。所有取土位置均靠近土壤含水率监测装置,故取第 3 窟、第 5 窟、第 18 窟和第 42 窟顶作为取样部位,取土位置分布如图 1 所示,具体位置和取土深度详见表 1。本次试验采用人工取土方式进行取样,取土类别分为环刀样和碎散土。



图 1 取土位置标识

Fig. 1 Map of soil sampling locations

表 1 取土位置与取土深度

Table 1 Soil sampling locations and depths

取样位置	具体位置	经度(东经)	纬度(北纬)	高程/m	取土深度/cm	
					环刀样	散土样
第 3 窟顶	第 3 窟监测点 西北 23 m 处	113°7'40"	40°6'38"	1 170.7	10	1、10
第 5 窟顶	第 5 窟监测点 东 1.5 m 处	113°7'34"	40°6'41"	1 160.8	10	1、10
第 18 窟顶	第 18 窟监测点 东南 6 m 处	113°7'24"	40°6'39"	1 152.9	10	1、10、20
第 42 窟顶	第 42 窟监测点 东北 2 m 处	113°7'15"	40°6'37"	1 171.9	5、18	1、6、10、18、24

1.2 取样位置地势分析

利用百度地图绘制取样位置周边等高线图,并计算得到取样点坡度值,如图 2 所示。图中橙色标记点为取样位置,取样位置坡度值在图左上角,粗实线表示山谷,虚线表示山脊,箭头方向为地势降低方向。从图 2 中可以看出,所有取样位置的坡度都在

15°以内,相对比较小,各取样位置处坡度从小到大排序依次为第 3 窟、第 5 窟、第 42 窟和第 18 窟。蒙宽宏等^[15]提出随着坡度增大,土壤稳渗率下降,达到稳渗所需时间逐渐增长。因此,坡度越大,雨水的入渗量越小,土体内部含水率降低,随水下渗到土体内部的盐分间接减少。

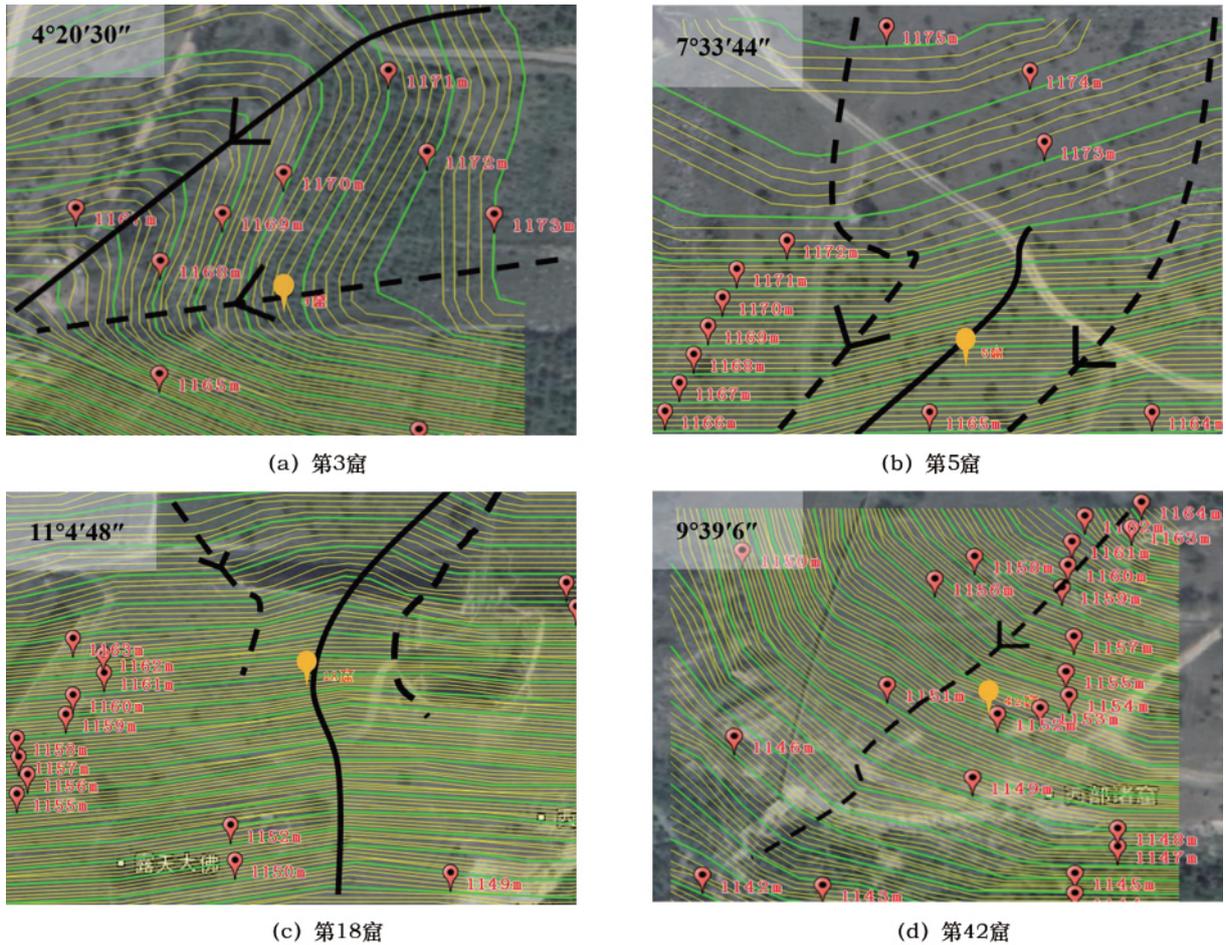


图 2 等高线图及取样点坡度

Fig. 2 Contour plots and slopes of sampling points

1.3 取样位置植被覆盖率

图 3 为取样位置处的植被覆盖率,图左上角注有取样位置和植被覆盖率。对图片进行二值化处理,通过计算即可确定植被覆盖率,相关公式为:

$$VGC(\%) = (\text{平均灰度值}/255) \times 100 \quad (1)$$

式中,VGC (visual grading characteristics) 为视觉分级特征。

图 3 中第 3 窟和第 42 窟顶部植物为野牛草,第 5 窟顶部植物为狗牙根,第 18 窟顶部植物为艾。虽然取样部位植物种类不同,但根据吴宏伟^[16]的研究,植物的蒸腾作用是造成土体含水率变化的主要因素。而本次取样时间为 2018 年 7 月下旬,夏季多雨,取样前该地已多次降雨,植物吸收水分充足,且空气相对湿度,植物蒸腾作用很小,故可忽略植物蒸腾对土体水分变化的影响。由图 3 可知,第 18 窟植被覆盖率最大,第 42 窟植被覆盖率最小,第 5 窟与第 3 窟植被覆盖率介于两者中间。植被会使地表径流雨水流速减小,增加下渗到土体内部

的雨水。若下渗的雨水中含有盐分,会间接增加土中盐分含量。



图 3 取样位置处的植被覆盖率

Fig. 3 Vegetation coverage ratios of sampling points

2 试验概况

2.1 试验用土

将取自云冈石窟顶部土层的试验土样风干后过

2 mm 筛, 采用《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999) 的比重瓶法、液塑限联合测定法以及击实试验测定土样的基本指标(表 2)。

表 2 土的基本物理指标
Table 2 Basic physical indexes of soil

颗粒密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	液限/%	塑性/%	最优含水 率/%	最大干密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)
2.67	21.57	17.42	16.37	1.73

2.2 孔隙比、饱和渗透系数测定试验

将云冈石窟顶部采集的原状土环刀样称重, 记录其质量 m , 然后去除环刀, 环刀体积 V 为 60 cm^3 , 称取环刀质量 m_0 , 将其环刀样放入柔性壁渗透仪进行固定水头压的饱和渗透试验, 试验采用气压控制水头压, 试验仪器见图 4。环刀样孔隙比的计算公式为:

$$e = 1 - \frac{m - m_0}{\rho V} \quad (2)$$

式中 e 为孔隙比; ρ 为土样颗粒密度。



图 4 柔性壁渗透仪

Fig. 4 Flexible-wall permeameter

2.3 盐分测定试验

土体含水率采用烘干法测定, 土体可溶盐含量通过离子色谱法(IC)测定。试验所用仪器为 ICS-1100 离子色谱仪, 测量精度可达 0.01 mg/L 。

含盐量测定试验操作步骤^[17]如下: 1) 采用精度为 0.0001 g 电子天平称量 5 g 粒径小于 2 mm 的烘干土样, 将其置于干燥的 200 mL 锥形瓶中, 并注入 50 mL 去离子水; 2) 将盛有土样和去离子水的锥形瓶放在振荡器上振荡 12 h ; 3) 用注射器将锥形瓶上部上清液抽出, 插上滤膜孔径为 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 的

过滤头, 将溶液挤压入离心管中, 过滤渗出液需要 20 mL ; 4) 将过滤液倒入色谱仪器配套容器中, 放入仪器进行检测。

3 结果及分析

3.1 孔隙比与饱和渗透系数

表 3 为测得的环刀样孔隙比和饱和渗透系数, 图 5 为根据表 3 数据绘制的孔隙比 e 与饱和渗透系数 k 的关系图。由图 5 可知, 不论取样在哪个部位哪个深度, 土样的孔隙比与渗透系数在双对数坐标系中基本呈线性关系。因原状土样中含有石块或土样中有较大孔隙, 导致部分数据偏离线性关系。不同土样 10 cm 处的渗透系数由低到高排序为第 5 窟、第 3 窟、第 18 窟、第 42 窟。第 42 窟 10 cm 处土样渗透数据, 按插值法计算。董佩等^[18]测定云冈石窟顶部第四纪覆盖层土体渗透系数集中在 10^{-4} cm/s 左右, 与本试验结果基本吻合。

表 3 土样孔隙比和饱和渗透系数

Table 3 Void ratio and saturated permeability of soil samples

取样位置	取土深度/cm	孔隙比 e	饱和渗透系数 $k/(cm \cdot s^{-1})$
第 3 窟顶	10	0.91	6.70×10^{-5}
第 5 窟顶	10	0.57	4.91×10^{-5}
第 18 窟顶	10	0.76	9.78×10^{-5}
第 42 窟顶	5	0.92	1.60×10^{-4}
	18	0.74	1.84×10^{-4}

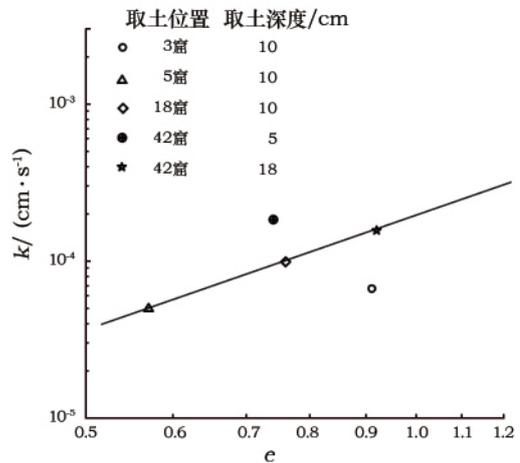


图 5 土样 $\lg e - \lg k$ 关系

Fig. 5 $\lg e - \lg k$ relationship of soil samples

3.2 含水率变化规律

表 4 为云冈石窟顶部不同位置不同深度处土样含水率的测试结果, 其中黑体内容为云冈土壤含水

率监测装置所测得数据。图 6 为含水率与深度关系图。对含水率测试结果进行分析,得到不同位置同一深度以及同一位置不同深度土样的含水率变化规律。据此分析土样含水率差异的原因。

表 4 含水率测试结果

Table 4 Test results of water content

取样位置	取土深度/cm	含水率/%
第 3 窟顶	1	13.72
	10	11.91
	20	10.37
第 5 窟顶	1	9.99
	10	9.78
	20	8.92
第 18 窟顶	1	16.95
	10	12.86
	20	10.56
第 42 窟顶	1	1.37
	10	8.73
	18	5.93
	24	2.59

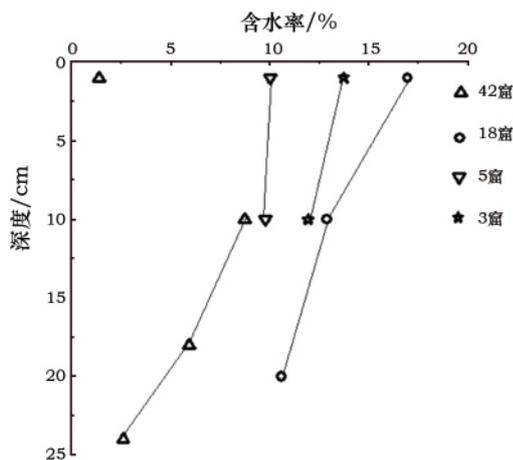


图 6 含水率和深度关系图

Fig. 6 Relationship between water content and depth

3.2.1 不同位置同一深度土样的含水率 由图 6 可见,相同深度处,如 10 cm 处,土样含水率从低到高为第 42 窟、第 5 窟、第 3 窟、第 18 窟。不同取土位置顶部土体的植被覆盖率不同。由 1.3 节可知,土样取土部位植被覆盖率从低到高为第 42 窟、第 5 窟、第 3 窟、第 18 窟。结合植被覆盖率和不同部位相同深度的土样含水率变化规律可知,植被覆盖率与土样含水率之间的相关性较大,植被覆盖率越大,土样含水率越大。

从图 6 中还可得知,在 1 cm、10 cm 和 20 cm 深度处,第 3 窟顶部土层含水率均大于第 5 窟。结合 1.2 节地势分析结果和 1.3 节取土位置处植被覆盖率结果可知,两者取土位置植被覆盖率基本相同,但第 3 窟顶部土层取土位置坡度小于第 5 窟的,引起雨水下渗量高于后者,从而不同深度的含水率均大于后者。因此,除植被覆盖率外,坡度也会对土体含水率产生一定影响,当植被覆盖率相近时,坡度越大,土体内部含水率越低。第 42 窟顶部土层取样位置植被覆盖率最小,坡度亦较大,因此,第 42 窟顶土层不同深度土样的含水率均为最小。

3.2.2 同一位置不同深度土样的含水率 由图 6 可知,除第 42 窟顶 1 cm 和 10 cm 土样外,同一部位不同深度的土样含水率随着取土深度的增大,土样含水率逐渐减小。出现该现象的主要原因在于云冈石窟地处半干旱区域,土体含水率低,降雨量小。降雨后,表层土体会吸收大部分雨水,下层土体吸收水分逐渐减小,植被生长需吸收水分,也会将土中水分吸引到土体上层。而第 42 窟顶 1 cm 至 10 cm 土样含水率异常的原因为:第 42 窟顶土样植被覆盖率最小,地表水分受蒸发作用影响大,会在较短时间内减少,较深部土样受蒸发作用影响小。其余取土部位植被覆盖率都比较高,土样受蒸发作用的影响较小。因此,土体含水率分布规律较统一,即随深度的增大而减小。

3.3 土样盐分含量结果及分析

土体水分是土体盐分运移的载体,土体孔隙比会影响水分的下渗速率,同样也会影响盐分的浓度和迁移速率,孔隙比与土体的渗透特性相关。因此,需结合各取样点土样的含水率、孔隙比和饱和渗透系数的变化规律分析窟顶土层盐分分布规律。

表 5 为土样中可溶盐离子浓度测试结果。可以看出,随着取土深度的增加,第 18 窟和第 42 窟顶土层中盐分含量基本都在增大,分别在最大取土深度 20 cm 和 24 cm 处酸根离子浓度达到最大,主要因为大同地区煤炭业发达,空气污染严重,酸性降雨频率高^[19]。所测酸根离子中,硝酸根离子所占比例较大,其原因可归为雷雨天气中雷电释放的巨大电能会将空气中氮元素氧化成硝酸,随雨水进入土壤^[20]。

图 7 为可溶盐离子浓度与深度关系图,可以看出,随着取土深度的增加,第 18 窟和第 42 窟顶土样盐分含量基本都在增大。再结合图 5 可知,第 18 窟

和第 42 窟顶土样渗透系数大于其他窟顶土样渗透系数。由此可推测, 土样渗透系数越大, 对应的孔隙

比越大, 含盐的水分较容易下渗, 使得下层土体盐分含量越大。

表 5 土样中可溶盐离子浓度

Table 5 Concentration of soluble salt ions in soil samples

取土位置	取土深度/cm	离子浓度/(mg · L ⁻¹)			
		NO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	合计
第 18 窟	1	1.37	4.50	2.82	8.68
	10	0.38	3.15	4.60	8.12
	20	196.93	25.04	12.09	234.05
第 42 窟	5	3.74	4.19	2.46	10.39
	18	5.16	64.81	3.84	73.81
	24	195.19	24.84	11.96	231.99
第 5 窟	1	35.75	15.04	3.00	53.79
	10	5.65	2.56	2.15	10.36
第 3 窟	1	13.57	2.42	5.01	21.00
	10	10.28	8.23	3.17	21.67

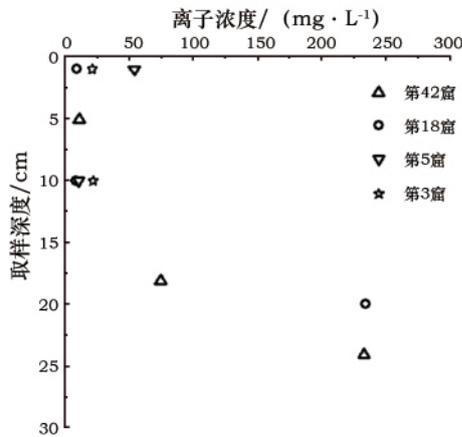


图 7 离子浓度与深度关系图

Fig. 7 Relationship between ion concentration and depth

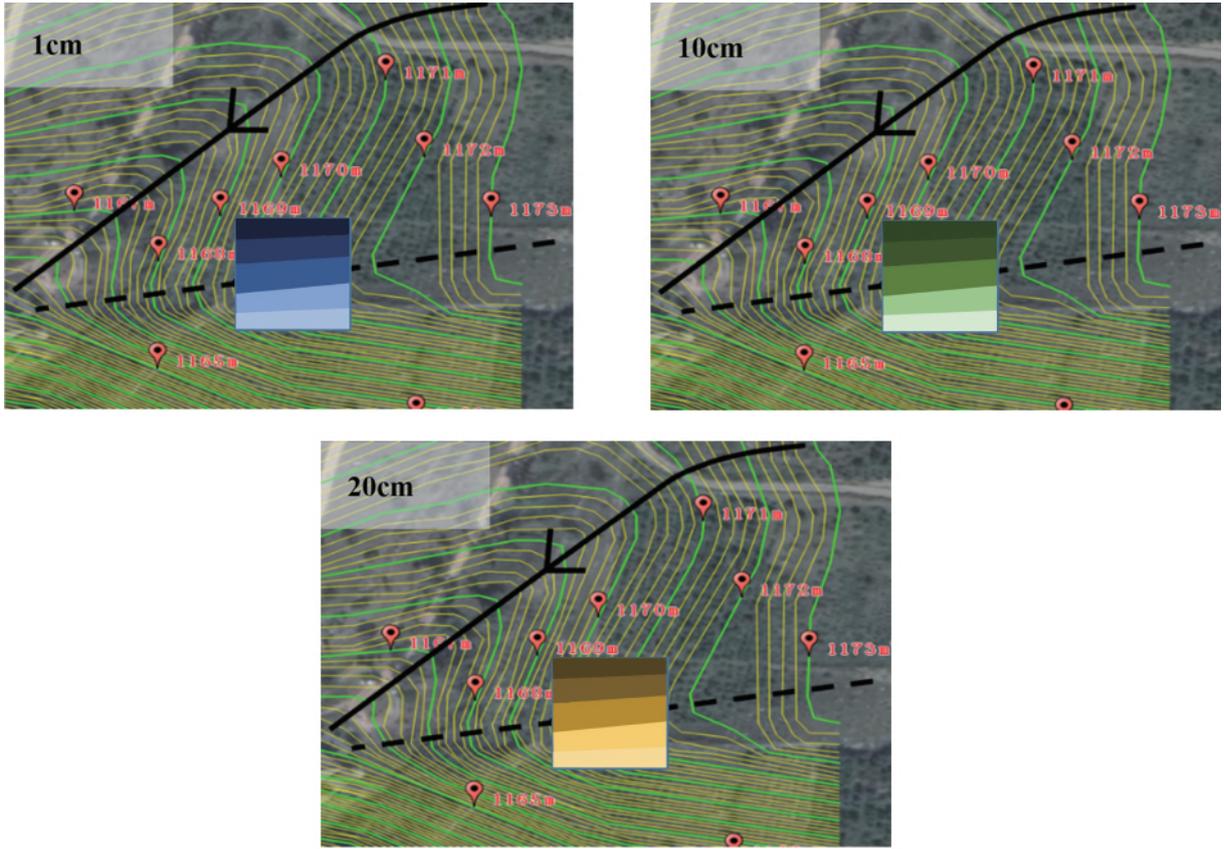
由图 7 还可以观察到, 第 18 窟顶部土层 20 cm 深处土样盐分浓度大于第 42 窟顶 18 cm 深处的盐分浓度。而由图 5 可知, 10 cm 深处渗透系数却是前者小于后者。再结合图 6 可知, 第 18 窟顶土体含水率大于第 42 窟顶土体含水率大, 由此也会使得土体中盐分含量增大。

由表 5 可以看出, 第 5 窟顶部 1 cm 处土样离子浓度大于 10 cm 处的, 第 3 窟顶 1 cm 和 10 cm 处土样盐分含量基本相同, 与第 42 窟 1 cm 至 10 cm 处土样离子浓度分布特点不同。结合图 5 和图 6 进行分析, 第 3 窟和 5 窟取样点渗透系数较第 42 窟的小, 含水率较第 42 窟的大。说明具有较小孔隙比的土体, 对应的渗透系数较小, 阻止了盐分的下渗。渗透性是影响土体盐分含量的主要因素。

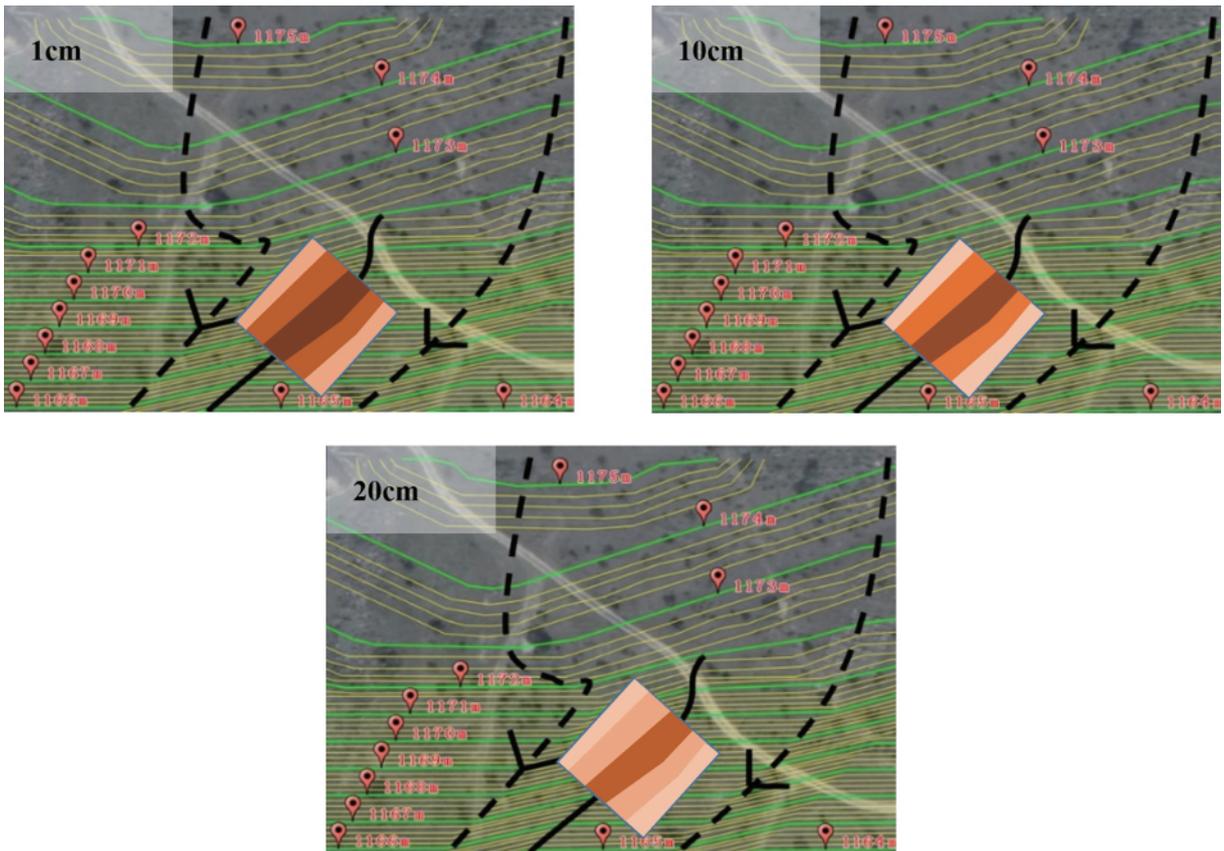
3.4 土体水分和盐分含量分布图

根据取样点土样含水率及含盐量规律做各层土在一定范围内(10 m × 10 m)的含水率分布图(图 8)和含盐量分布图(图 9)。各图左上角注释了土层深度, 不同色系代表不同水分或盐分含量, 所对应的水分和盐分含量分别见图 8c 和 9c。同一色系的深浅程度代表土体水分或盐分含量的高低, 颜色越深, 代表的水分或盐分含量越高, 反之越低。颜色的深浅程度代表的水分或盐分差异均在 0.3 个单位内。

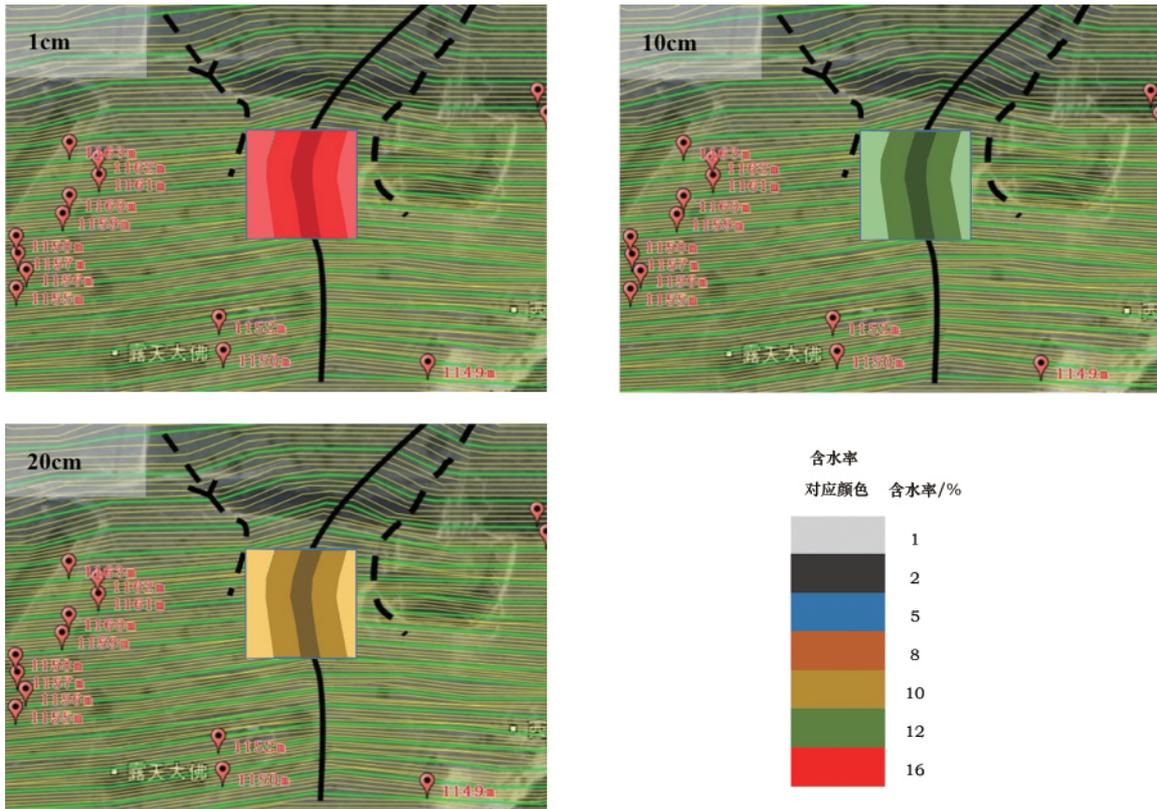
因为在该范围内土体的植被覆盖率和孔隙比相近, 由植被覆盖和孔隙比造成的土层含水率及含盐量变化可忽略不计, 再结合 3.2.1 和 3.3 节分析可知, 土层含水率及含盐量变化主要由地形变化引起。距离山谷越近越容易汇水, 土体含水率越高, 较多的水分会带来大量盐分, 导致土体盐分含量增加。而坡度越大, 雨水下渗量越小, 且对地面冲刷力较大, 因而土体含水率和盐分含量较小。比如: 图 8b ~ 8d 中在山谷处(实线处)水分含量最高, 越接近山脊处(虚线处)水分含量越低; 图 9b ~ 9d 中在山谷处盐分含量最高, 越接近山脊处盐分含量越低; 图 8a 中山脊线上侧等高线稀疏地形较缓, 雨水容易下渗, 土体含水率高, 山脊线下侧等高线密集地形较陡, 雨水较难下渗, 土体含水率低; 图 9a 中山脊线上侧地形较缓, 雨水容易下渗, 从而携带大量盐分下渗, 导致土体盐分含量高, 山脊线下侧地形较陡, 雨水较难下渗, 不利于盐分下渗, 因此土体盐分含量低。



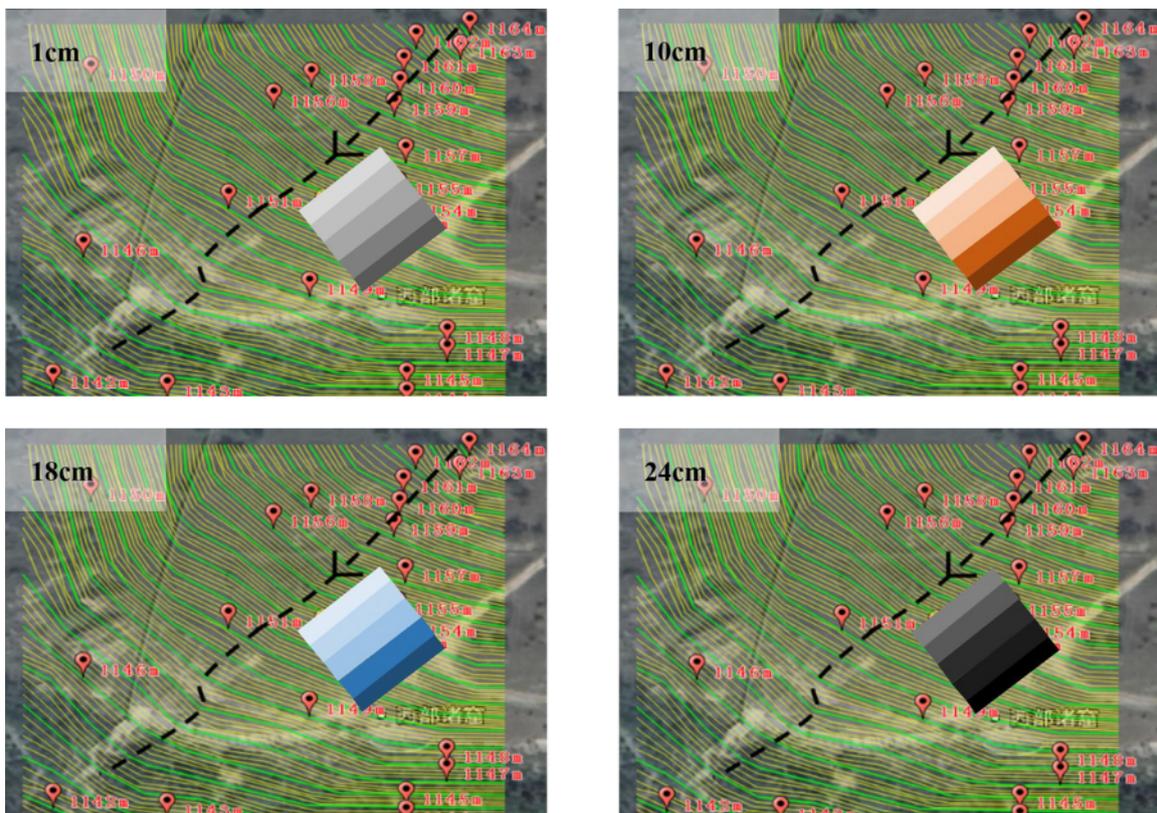
(a) 第3窟



(b) 第5窟



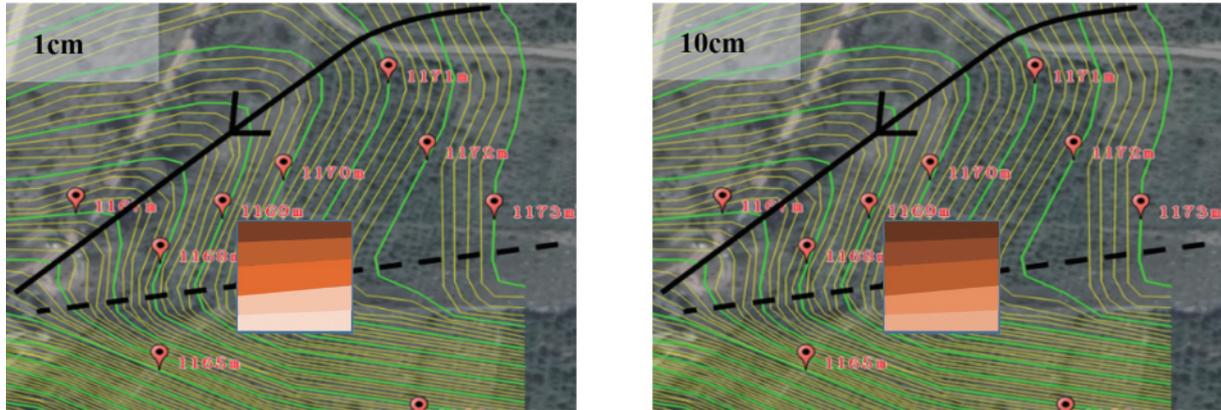
(c) 第18窟



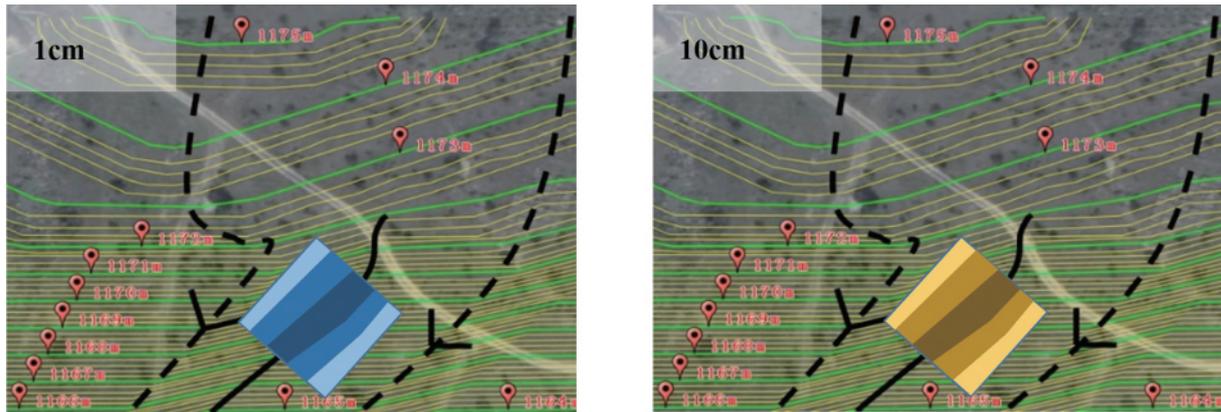
(d) 第42窟

图 8 各窟土体水分含量图

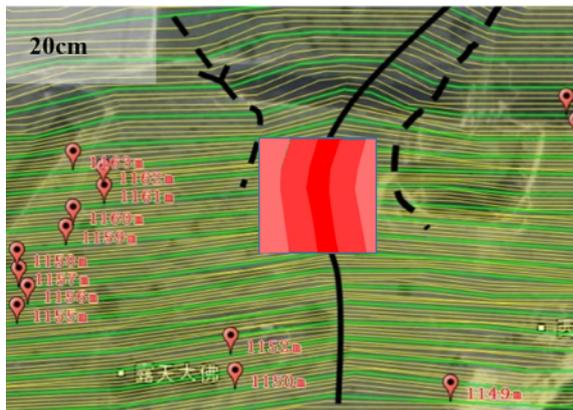
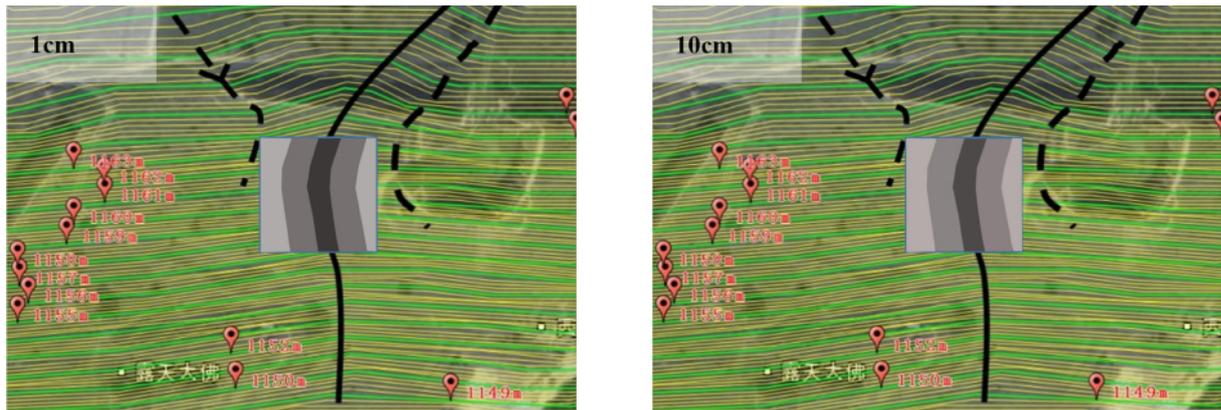
Fig. 8 Water content diagrams of the soil at different grottoes



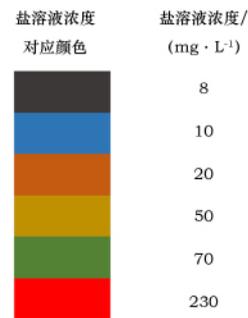
(a) 第3窟

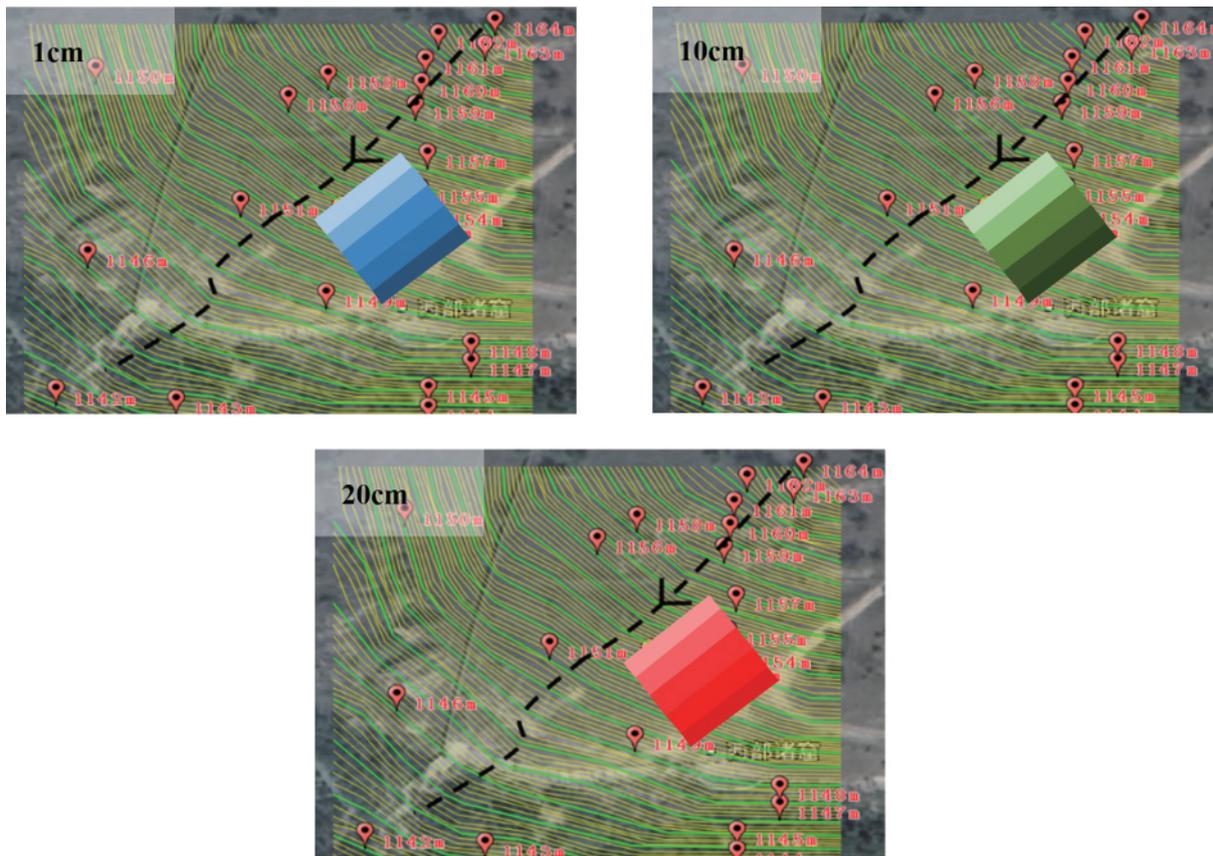


(b) 第5窟



(c) 第18窟





(d) 第42窟

图 9 各窟土体盐分含量图

Fig. 9 Salt content diagrams of the soil at different grottoes

4 结 论

本研究通过对云冈石窟顶部试样的孔隙比、渗透系数、含水率和盐分含量等各指标的综合分析,并结合云冈石窟顶部土层取样位置处的植物覆盖率和坡度数据,得到云冈石窟顶部表层土的水盐分布特征,主要结论如下:

1) 植被覆盖率和地形坡度是影响土体含水率的主要因素,植被覆盖率越高,土体含水量越高;取样位置坡度越大,土体含水率越低。

2) 土体盐分含量与孔隙比、渗透性和含水率密切相关。孔隙比与渗透系数在双对数坐标下,基本呈线性关系,土体孔隙比越大、渗透系数越大,水分越易下渗,从而携带盐分下渗,导致下层土体盐分含量越大。

3) 山谷附近容易汇水,较多雨水汇集会带来大量盐分,水盐的下渗量增大,土体水分和盐分含量增加。而坡度越大,雨水下渗量越小,且对地面冲刷力较大,因而土体水分和盐分含量较小。

所测数据基本能够反映云冈石窟顶部土层中水

盐分布规律,接下来还需获取更多不同位置、不同深度、不同时间土样的水盐信息,进一步研究云冈石窟顶部土体水盐的时空分布规律及盐分运移规律,从而有针对性地采取适当措施,减小水分入渗引发盐分下渗造成的石窟病害。

参考文献:

[1] 张赞勋,付林森,江东云,等. 大足石刻风化物可溶盐形成及破坏作用机理[C]//中国地质学会工程地质专业委员会,中国科学院地质研究所工程地质力学开放研究实验室. 第五届全国工程地质大会文集. 北京:地震出版社,1996:17-24.
ZHANG Zanxun, FU Linsen, JIANG Dongyun, et al. Dissolvable salt formation and damage mechanism of weathering materials in Dazu Stone Carvings [C]// Professional Committee of Engineering Geology for Chinese Geological Society, Open Research Laboratory of Engineering Geomechanics for Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences. Proceedings of the Fifth National Congress on Engineering Geology. Beijing: Seismological Press, 1996: 17-24.

[2] 李黎,王思敬,谷本親伯. 龙游石窟砂岩风化特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(6): 1217-1222.
LI Li, WANG Sijing, TANIMOTO C. Study of weathering characteristics of sandstone at Longyou Grottoes [J]. Chinese

- Journal of Rock Mechanics and Engineering 2008, 27(6): 1217 – 1222.
- [3] LEHMANN J. Damage by accumulation of soluble salts in stonework [J]. Conservation of Stone, 1971, 1(11): 35 – 45.
- [4] 田秋林, 朱世煜, 陆军, 等. 西北寒旱区盐渍土水盐迁移规律研究 [J]. 公路, 2019(8): 22 – 27.
TIAN Qiulin, ZHU Shiyu, LU Jun, *et al.* Study on water and salt transfer law of asphalt road in cold and drought saline area in northwest China [J]. Highway, 2019(8): 22 – 27.
- [5] 郭芳, 姜光辉. 大同云冈石窟可溶盐的分布及硫同位素特征 [J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(3): 126 – 130.
GUO Fang, JIANG Guanghui. Distribution of soluble salts and sulfur isotope in the Yungang Grottoes, Datong [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(3): 126 – 130.
- [6] JIANG Guanghui, GUO Fang, POLK J S. Salt transport and weathering processes in a sandstone cultural relic, North China [J]. Carbonates and Evaporites, 2015, 30(1): 69 – 76.
- [7] 黄继忠, 袁道先. 水与盐对云冈石窟石雕的影响初探 [J]. 文物世界, 2004(5): 61 – 66.
HUANG Jizhong, YUAN Daoxian. A preliminary study on the influence of water and salt on Yungang Grotto [J]. World of Antiquity, 2004(5): 61 – 66.
- [8] 王金华. 大足千手观音造像保存状况及病害专题研究 [J]. 中国文物科学研究, 2007(2): 70 – 78.
WANG Jinhua. The preservation conditions and diseases research of the Avalokitesvara sculpture in Dazu Rock Carvings [J]. China Cultural Heritage Scientific Research, 2007(2): 70 – 78.
- [9] 张兵峰, 蒋思维. 重庆大足石刻大佛湾渗水病害初探 [J]. 中国文物科学研究, 2016(1): 68 – 71.
ZHANG Bingfeng, JIANG Siwei. Preliminary exploration of water seepage disease on Big Buddha Bay of Dazu Rock Carving [J]. China Cultural Heritage Scientific Research, 2016(1): 68 – 71.
- [10] 杨善龙, 王彦武, 苏伯民, 等. 瓜州榆林窟崖体砾岩中水盐分布特征研究 [J]. 敦煌研究, 2018(1): 136 – 140.
YANG Shanlong, WANG Yanwu, SU Bomin, *et al.* The moisture and salt distribution properties of the cliff in the Yulin Grottoes at Guazhou [J]. Dunhuang Research, 2018(1): 136 – 140.
- [11] 许健, 郑翔, 王掌权. 黄土边坡盐蚀剥落病害特征调查及其水盐迁移规律研究 [J]. 工程地质学报, 2018, 26(3): 741 – 748.
XU Jian, ZHENG Xiang, WANG Zhangquan. Investigation for water and salt migrations on spalling disease of loess slope caused by salification erosion [J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(3): 741 – 748.
- [12] 李小倩, 夏江宝, 赵西梅, 等. 不同潜水埋深下浅层土壤的水盐分布特征 [J]. 中国水土保持科学, 2017, 15(2): 43 – 50.
LI Xiaoqian, XIA Jiangbao, ZHAO Ximei, *et al.* Water and salt distribution characteristics of shallow soil at different diving water levels [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2017, 15(2): 43 – 50.
- [13] 山西省地矿局第三综合勘察公司. 云冈石窟顶部第四纪覆盖层勘察报告 [R]. 山西云冈: 云冈石窟顶部防渗保护工程会议资料之五, 1990, 4.
Third Comprehensive Prospecting Company, Shanxi Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources. Quaternary overburden on the top of Yungang Grottoes survey report [R]. Yungang, Shanxi: The fifth part information of the conference for impervious protection engineering at the top overburden of Yungang Grottoes, 1990, 4.
- [14] 宿白. 云冈石窟分期试论 [J]. 考古学报, 1978(1): 25 – 38.
SU Bai. The periodization of the Yungang cave temples [J]. Acta Archaeologica Sinica, 1978(1): 25 – 38.
- [15] 蒙宽宏, 姚余君, 柴亚凡, 等. 环境因子对土壤水分渗透特征的影响 [J]. 防护林科技, 2006(3): 25 – 27.
MENG Kuanhong, YAO Yujun, CHAI Yafan, *et al.* The research of soil infiltration character influence by environmental factor [J]. Protection Forest Science and Technology, 2006(3): 25 – 27.
- [16] 吴宏伟. 大气 – 植被 – 土体相互作用: 理论与机理 [J]. 岩土工程学报, 2017, 39(1): 1 – 47.
WU Hongwei. Atmosphere – plant – soil interactions: theories and mechanisms [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(1): 1 – 47.
- [17] 朱朝娟, 周光明, 余娜, 等. 离子色谱法同时快速测土壤中的 F^- , Cl^- , NO_2^- , Br^- , NO_3^- , HPO_4^{2-} , SO_4^{2-} [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2010, 32(9): 54 – 58.
ZHU Chaojuan, ZHOU Guangming, YU Na, *et al.* Simultaneous fast determination of F^- , Cl^- , NO_2^- , Br^- , NO_3^- , HPO_4^{2-} and SO_4^{2-} in soil samples by ion chromatography [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2010, 32(9): 54 – 58.
- [18] 董佩, 王旭升, 万力, 等. 云冈石窟覆盖层特征及其对石窟渗水影响 [J]. 科技导报, 2013, 31(10): 62 – 66.
DONG Pei, WANG Xusheng, WAN Li, *et al.* Characteristics of the overlying sediments in Yungang Grottoes and its impact on surface water infiltration [J]. Science Technology Review, 2013, 31(10): 62 – 66.
- [19] 李亚军, 吕红玉, 初桂华, 等. 山西省酸雨变化趋势特征分析 [J]. 环境科学与技术, 2014, 37(增刊1): 67 – 71.
LI Yajun, LYU Hongyu, CHU Guihua, *et al.* Analysis of changing trend characteristics of acid rain in Shanxi Province [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 37(Suppl 1): 67 – 71.
- [20] 李生秀, 寸待贵, 高亚军, 等. 黄土旱塬降水向土壤输入的氮素 [J]. 干旱地区农业研究, 1993, 11(增刊1): 83 – 92.
LI Shengxiu, CUN Daigui, GAO Yajun, *et al.* Mineral nitrogen introduced into soil by precipitation on Loess dryland [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1993, 11(Suppl 1): 83 – 92.

Study of water and salt distribution characteristics in the top soil layer of Yungang Grottoes

LIU Cheng¹, SUN Wenjing^{1 2}, HUANG Jizhong², REN Jianguang³

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. Institute for the Conservation of Cultural Heritage, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

3. Yungang Grottoes Research Institute, Datong 037007, China)

Abstract: Soluble salts are an important cause of the weathering of stone relics. Accumulation and migration of soluble salts is inseparable from water. Salts in the top soil layer of Yungang Grottoes are an important source of the interior salts of Yungang stone relics. Therefore, it is of great significance to study the distribution characteristics of water and salts in the top soil layer of grottoes for the goal of reducing the accumulation of soluble salts in stone relics in the future. In our work, the saturated permeability coefficient, water content, void ratio and soluble salt content of soils at different depths and different locations in the top of Yungang Grottoes were systematically analyzed and tested. The distribution characteristics of water and salts in the top soil layer of Yungang Grottoes were studied in combination with the slope and vegetation coverage ratio at the sampling locations. The results show that 1) the higher the vegetation coverage ratio, the higher the water content of soil samples; 2) the larger the slope, the lower the water content of soil samples and 3) the void ratio and the saturated permeability coefficient show a linear relationship. The vegetation coverage ratio, slope and permeability are the main factors affecting the distribution of water and salts in the top soil layer of grottoes.

Key words: Water content; Soluble salt; Saturated permeability coefficient; Vegetation coverage ratio; Slope

(责任编辑 张存祖; 校对 潘小伦)