DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2019.05.002

砒砂岩风化特性试验

杨才千[1,2],刘　强[1],瞿　冯[2],赵艳兵[2],吴智仁[3]

(1.湘潭大学土木工程与力学学院,湖南 湘潭　411105;2.东南大学土木工程学院,江苏 南京　210096;
3.江苏大学环境与安全学院,江苏 镇江　212013)

摘要:采用 X 射线衍射仪、超景深三维显微镜对不同深度的砒砂岩进行矿物成分检测及微观结构观测,研究了不同深度砒砂岩的风化特性,选取次生矿物总量、孔隙率作为评价指标,对不同深度砒砂岩的风化程度进行判定。试验结果表明:不同深度砒砂岩中所含的矿物种类相同,主要为石英、长石、绿泥石、方解石、伊利石、黑云母、高岭石等,但所含的次生矿物总量不同,随着深度的增加,次生矿物总量降低;随着深度的增加,砒砂岩表面粗糙度逐渐减小,微裂隙、孔隙的尺寸及数目逐渐减少,砒砂岩受外界环境影响减小,风化程度逐渐降低。

关键词:砒砂岩;风化;矿物成分;微观结构;孔隙率

中图分类号:TV882.1;S157　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1006-7647(2019)05-0010-06

Experimental study on weathering characteristics of Pisha sandstone//YANG Caiqian[1,2], LIU Qiang[1], QU Feng[2], ZHAO Yanbing[2], WU Zhiren[3] (1. *College of Civil Engineering and Mechanics*, *Xiangtan University*, *Xiangtan* 411105, *China*; 2. *School of Civil Engineering*, *Southeast University*, *Nanjing* 210096, *China*; 3. *School of Environmental and Safety Engineering*, *Jiangsu University*, *Zhenjiang* 212013, *China*)

Abstract: An X-ray diffractometer and an ultra-deep three-dimensional microscope were used to determine the mineral composition and microstructure of the Pisha sandstone at different depths. The weathering characteristics of the Pisha sandstone at different depths were studied. The amount of the secondary minerals and the porosity were selected as the evaluation indicators to determine the degree of weathering of the Pisha sandstone. The experimental results show that the kinds of minerals in different depths of Pisha sandstone are the same, including quartz, feldspar, chlorite, calcite, illite, biotite, kaolinite, etc. However, the total amount of the secondary minerals is different. With the increase of depth, the secondary mineral reduces and the surface roughness of the Pisha sandstone decreases gradually. With the increase of depth, the size and number of the micro-cracks and pores are gradually reduced, the influence of the external environment become small on the weathering of Pisha sandstone, and the degree of weathering gradually decreases.

Key words: Pisha sandstone; weathering; mineral composition; microstructure; porosity

砒砂岩是分布在黄河流域的一种由砂岩、砂页岩和泥质砂岩所构成的特殊松散岩石互层,由于其颗粒间胶结程度差、结构强度弱等特点,遇水很快发生溃散,在冻融、重力、水力等外力作用下发生崩解、坍塌等现象,故砒砂岩地区植被退化严重,土壤侵蚀剧烈,是我国水土流失最严重的区域,也是黄河中游的主要产沙区域[1-2]。砒砂岩地区土壤侵蚀模数约为 3 万~4 万 t/(km^2·a),其中进入黄河的泥沙量多年平均近 2 亿 t,淤积到黄河下游河道的粗泥沙每年约为 1 亿 t,占黄河下游每年平均淤积量的 25%[3]。因此,砒砂岩地区水土流失是学者专家们研究的热门课题之一[4]。

近年来,砒砂岩水土流失的研究主要包括岩性特征、气候环境等因素对砒砂岩侵蚀的影响以及机理,其中侵蚀的类型主要有风蚀、水蚀、重力侵蚀及冻融侵蚀。石迎春等[5-8]从原状砒砂岩样品的矿物组成、微观结构角度研究了砒砂岩岩性特征对其侵蚀性能的影响;刘李杰等[9-12]对冻融循环作用下砒砂岩的冻胀融沉特性、微观结构及力学性能变化等方面进行了研究,分析了砒砂岩受冻融侵蚀的机理;李俊俊等[13-15]通过对砒砂岩进行室内冲刷试验及模拟降雨试验,研究了冲刷强度、坡度、植被等对砒砂岩的影响,分析了砒砂岩受水力侵蚀的机理。然而,这一系列的侵蚀机理研究大多是针对砒砂岩在

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0504505);湖南省创投项目(2018GK5028)

作者简介:杨才千(1974—),男,教授,博士,主要从事智能材料与结构研究。E-mail:ycqjxx@seu.edu.cn

外力作用下的侵蚀产沙破坏,对于砒砂岩在自然环境变化下的损伤研究较少。而环境变化引起的风化侵蚀,加重了砒砂岩的初始劣化状态,致使砒砂岩的抗蚀能力减弱,岩体的强度和稳定性进一步降低。因此,砒砂岩风化特性的研究为砒砂岩地区水土流失的治理、岩石崩塌、山体滑坡等地质灾害的防治提供了必要的理论依据。

本文以内蒙古鄂尔多斯市准格尔旗的砒砂岩为研究对象,对不同深度的砒砂岩样品进行矿物成分检测和微观结构观测,研究不同深度砒砂岩的风化特征,然后采用次生矿物总量和孔隙率作为砒砂岩风化程度的判定指标,对不同深度砒砂岩的风化程度进行判定。

1 试验设计

1.1 试验取样

通过前期的文献调研和现场调研,选定内蒙古鄂尔多斯市准格尔旗暖水乡 109 国道附近一处野外区域作为取样地点,砒砂岩取样现场如图 1 所示,具体步骤如下。

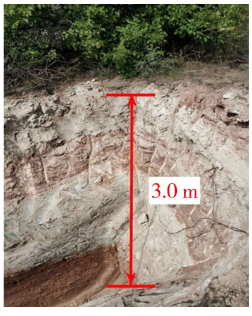


图 1 砒砂岩取样现场

步骤 1:采用小型挖掘机在选定好的位置挖掘一个取样坑,基坑深为 3.0 m,在取样坑内沿垂直方向每隔 0.5 m 进行标定并依次取样,取样标准为结构未受扰动的小块状砒砂岩岩样。

步骤 2:将所取不同深度的砒砂岩样品用密封袋密封保存,称量样品重量并记录,使用铺满泡沫颗粒的箱子放置样品,以减少运输过程对样品的扰动。

步骤 3:试验样品运回实验室后,再次进行称重,并与现场的称重记录进行对比,剔除由于水分蒸发或运输扰动引起重量差别较大的试样。

步骤 4:对不同深度的砒砂岩样品进行矿物成分检测及微观结构观测,分析不同深度砒砂岩的风化特性。

1.2 试验方法

1.2.1 X 射线衍射

X 射线衍射法(XRD)作为研究物质微观结构的方法在物质本源研究、物质结晶过程与物相转变研究、矿物晶体结构分析等方面均有较为广泛的应用[16-18]。岩石在风化作用下其矿物组成、内部结构特征(孔隙率、结构面、孔隙连通性等)均发生变化[19-21]。因此,通过检测不同深度砒砂岩的矿物成分来对其风化特性进行研究。

为得到取样地点不同深度处砒砂岩的矿物成分变化,沿深度方向每间隔 0.5 m 选取砒砂岩试样,将样品放入烘干箱内在 105℃ 的温度下烘干 24 h,再将烘干后的样品进行研磨,过 200 目筛网,得到粒径小于 80 μm 的粉末样品。采用 X 射线衍射仪(图 2)对样品进行扫描,设定 X 射线衍射仪的初始角为 5°,终止角为 90°,步宽为 0.02°,扫描速度为 0.15 s/step,获得不同深度砒砂岩样品的 X 射线衍射图谱。然后将粉末衍射联合会国际数据中心(JCPDS-IC-DD)提供的各种物质标准粉末衍射资料(PDF 卡片)与 X 射线衍射图谱进行比对分析,确定砒砂岩的矿物物质组成,并计算各个物相的质量分数。总结分析砒砂岩矿物成分的变化规律,比较不同深度砒砂岩的次生矿物总量,判定不同深度砒砂岩的风化程度。

图 2 X 射线衍射仪

1.2.2 超景深三维显微观测

超景深三维显微系统集形貌观察、记录、测量等功能于一体,改善了传统光学显微镜景深浅、工作距离短等缺点,保证观测表面粗糙的物体也能够得到清晰、高分辨率的图像,同时大幅度削减对焦的观察工时,属于适用范围较广泛的常规显微镜。岩石在风化作用下其矿物组成、内部结构特征(孔隙率、结构面、孔隙连通性等)均发生变化[19-21]。因此,通过观测不同深度砒砂岩的微观结构来对其风化特性进行研究。

为得到取样地点不同深度砒砂岩的微观结构特征,沿深度方向每间隔 0.5 m 采集砒砂岩小块体样品,采用超景深三维显微镜(品牌:日本 Keyence,仪器型号:VHX-2000E,见图 3)对样品表面进行观测,得到不同深度的砒砂岩样品的表面微观形态图像,

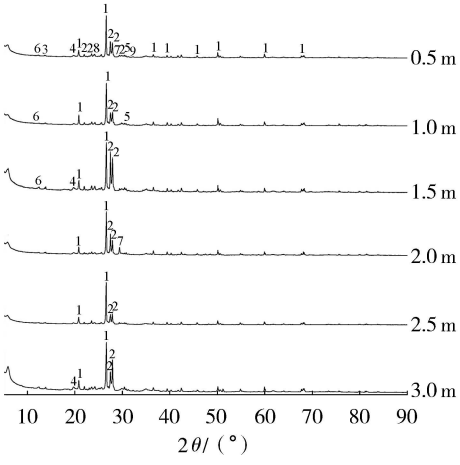
研究不同深度砒砂岩微观结构的变化规律,并通过对微观图像进行技术处理计算其孔隙率,判定不同深度砒砂岩的风化程度。

图 3　超景深三维显微镜

2　试验结果与分析

2.1　矿物组成

试验测得不同深度砒砂岩样品的 X 射线衍射图谱,如图 4 所示。



1—石英;2—长石;3—高岭石;4—伊利石;5—白云石;6—绿泥石;7—方解石;8—黑云母;9—赤铁矿

图 4　不同深度砒砂岩的 X 射线衍射图谱

将图 4 中的 X 射线衍射图谱与标准衍射卡片进行比对可知:

a. 砒砂岩的矿物组成主要为石英、长石、绿泥石、方解石、伊利石、黑云母、白云石、高岭石等,基于矿物学的基本理论,胶结物为伊利石、高岭石、赤铁矿等。其中,各谱线在石英(衍射角 $2\theta=26.6°$)、长石($2\theta=27°\sim28°$)的主峰位具有较强的衍射信号,且峰形尖锐,表明砒砂岩中石英、长石的质量分数较高且结晶度较高。

b. 不同深度的砒砂岩样品的 X 射线衍射图谱大致相似,说明砒砂岩所含主要矿物种类并没有随深度而改变。

c. 不同深度的砒砂岩在石英和长石等主峰位具有不同的衍射强度,说明各物相的质量分数有所变化。对比浅层风化严重的砒砂岩和深层新鲜砒砂岩的 XRD 结果,发现风化严重的砒砂岩在长石($2\theta=27°\sim28°$)的标准峰位置处衍射强度较低,而高岭石($2\theta=12.3°$)、白云石($2\theta=30.7°$)的标准峰位置处衍射强度较高。根据以上结果对比可以推断,在砒砂岩的风化过程中,长石有所消耗而白云石、高岭石逐渐生成,此过程与水、CO_2 存在密切的联系。

为了进一步分析砒砂岩各物相的质量分数随深度的变化规律,使用 TOPAS 软件对不同深度砒砂岩样品的 X 射线衍射图谱进行定量分析,分析结果如图 5 所示。

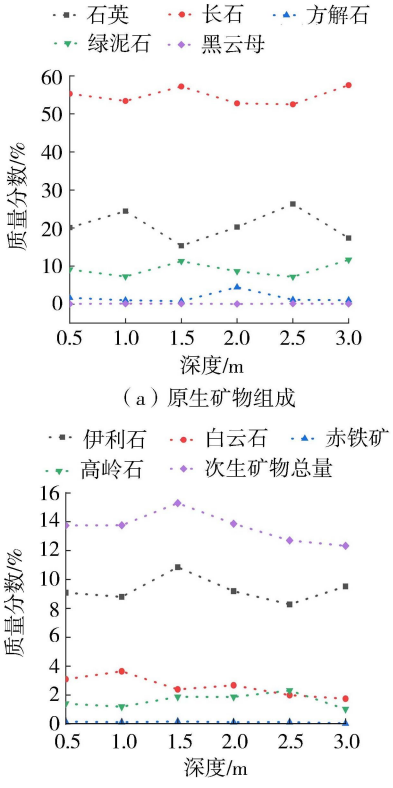


图 5　不同深度砒砂岩的矿物组成

由图 5 可知:

a. 砒砂岩中长石的质量分数在 50% 以上,而长石属于次稳定矿物,易发生水解反应生成高岭石、伊利石等。因此,砒砂岩内部原有的结晶胶结逐步转化为黏土胶结,降低了颗粒间的胶结作用,导致砒砂岩结构疏松。

b. 随着深度的增加,砒砂岩中次生矿物(伊利石、白云石、高岭石、赤铁矿)总量呈现先增大后减小并逐渐趋于稳定的趋势。

c. 在 0.5 ~ 1.5 m 深度范围内,砒砂岩中次生矿物总量呈上升趋势,且次生矿物总量占比相对较大,为 13.7% ~ 15.3%。因为浅层范围内砒砂岩的风化程度受外界环境影响较大,砒砂岩中长石、方解石等原生矿物在水和 CO_2 作用下生成粒径较小的高

岭石等次生矿物和可溶性的碳酸氢钙($Ca(HCO_3)_2$),导致岩石结构发生破坏,风化程度较高。其中,粒径较小的次生矿物随着雨水的渗透,沿着孔隙进入到下层砒砂岩区域,因此在此深度范围内,砒砂岩次生矿物总量随深度的增加表现出上升趋势。

d. 在1.5~3.0 m深度范围内,砒砂岩的次生矿物总量呈现逐渐减小并趋于平稳的趋势,次生矿物总量占比由15.5%降低至12.7%并逐渐趋于平稳。在此深度范围内,砒砂岩不直接与外界环境接触,受外界温度、湿度、风、雨水等影响较小,因此风化程度相对较低。

2.2 微观结构

采用超景深三维显微镜观测不同深度砒砂岩的表面微观结构,放大倍数为100倍,微观结构如图6所示。由图6可知:

a. 0.5 m深度处的砒砂岩表面较为粗糙,为多孔状结构,试样表面内存在微裂缝,裂缝宽度约为250 μm,且裂缝间无充填物。此外,砒砂岩颗粒粒径差别较大,颗粒与颗粒之间胶结力较小,胶结方式主要为面-面接触和点-面接触,此深度的砒砂岩基本没有强度,手指轻捏即可使其粉碎。

b. 在1.0~2.0 m深度范围内的砒砂岩表面较为平整,颗粒粒径较为均匀,存有少量的微裂隙和孔洞,且裂缝和孔洞内多为无填充或半填充的状态。同时,随着深度的增加,微裂缝、孔洞的尺寸及数目逐渐减少。

c. 在2.5~3.0 m深度范围的砒砂岩表面平整且结构较为完整,颗粒的粒径均匀,胶结程度较高,基本不存在裂纹或孔隙。

2.3 孔隙率

在得到不同深度砒砂岩放大100倍的微观结构图像后,采用Matlab对砒砂岩图像进行技术处理得到二值化图片,计算出不同深度砒砂岩样品的孔隙率。具体的操作步骤如下。

步骤1: 导入需要分析的微观图片,通过rgb2gray函数将数字图片转为灰度图片。

步骤2: 通过imhist函数查看灰度图片的灰度直方图,选择合适的阈值后通过im2bw函数实现二值化处理。其中,因为砒砂岩表面较为粗糙,有些颗粒并不处于试样的表面,而是在颗粒间的孔隙之中,选择过大或过小的阈值会导致二值化图像损失一些颗粒或者孔隙,造成误差。因此,设定阈值 t 的增量 $\Delta t=0.01$,将不同阈值 $t(0<t<1)$ 下的二值化图片与微观图片进行比对,选取最符合实际情况的二值化图片。

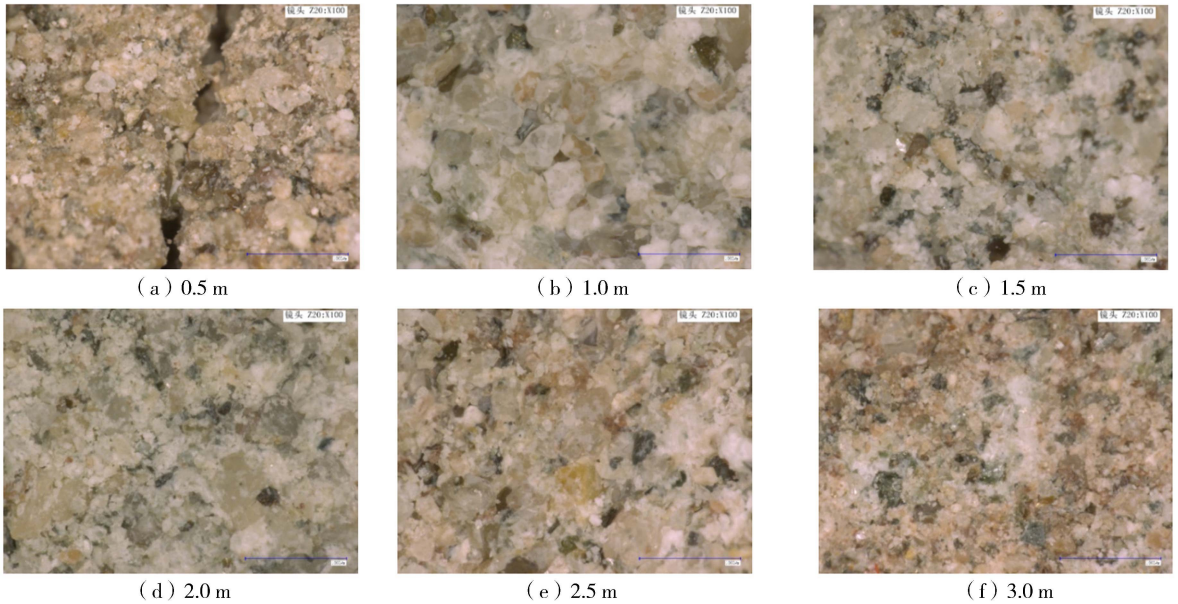
步骤3: 提取二值化图片像素总点数 S 和白色总点数 s,计算孔隙率 P_r:

$$P_r = \frac{s}{S} \times 100\% \tag{1}$$

二值化图片结果如图7所示,提取像素点参数后计算得到深度为0.5 m、1.0 m、1.5 m、2.0 m、2.5 m、3.0 m处砒砂岩的孔隙率分别为7.81%、6.92%、6.39%、6.06%、5.91%、5.92%。随着深度的增加,砒砂岩的孔隙率逐渐减少,且减小幅度呈逐渐减弱的趋势,表明随着深度的增加,砒砂岩受外界环境影响逐渐减小。

2.4 风化程度

鉴于以往的研究成果[21-23],选取次生矿物总量、



(a) 0.5 m (b) 1.0 m (c) 1.5 m

(d) 2.0 m (e) 2.5 m (f) 3.0 m

图6 不同深度砒砂岩超景深三维显微观测

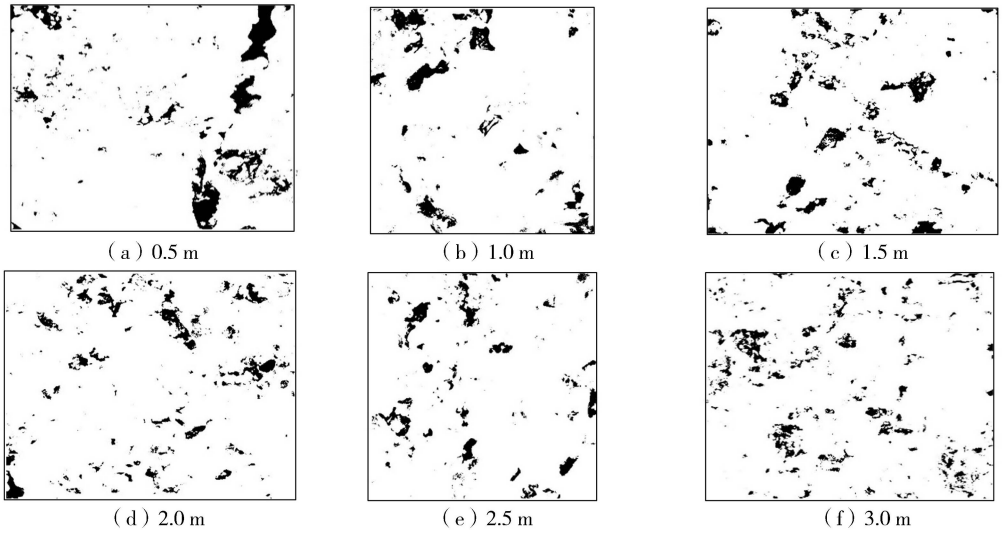


图7　不同深度砒砂岩微观结构图像的二值化图

孔隙率作为砒砂岩风化程度的评价指标,将风化程度划分为未、微、中、强风化4个等级,分别对应两个指标都基本无变化、少量变化、显著变化、极显著变化。

根据分级标准,对照2.1~2.3节试验结果判定深度大于2.5 m、2.0~2.5 m之间、1.0~2.0 m之间、小于1.0 m范围砒砂岩的风化程度分别为未风化、微风化、中风化和强风化。随着深度的增加,砒砂岩的风化程度逐渐减小,2.5 m深度以下基本处于未风化状态。

3　结　论

a. 不同深度砒砂岩中所含的矿物种类相同,主要为石英、长石、绿泥石、方解石、伊利石、黑云母、高岭石等。但不同深度的砒砂岩所含的次生矿物总量不同,随着深度的增加,次生矿物总量呈先增大后减小并逐渐趋于平稳的趋势。

b. 不同深度砒砂岩的微观结构不同,随着深度的增加,砒砂岩表面粗糙度逐渐减小,微裂隙、孔隙的尺寸及数量逐渐减少,颗粒间的胶结逐渐增强。

c. 随着深度的增加,砒砂岩的风化程度逐渐减小,2.5 m深度以下基本处于未风化状态。.

参考文献:

[1] 王愿昌,吴永红,寇权,等. 砒砂岩分布范围界定与类型区划分[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(1): 14-18. (WANG Yuanchang, WU Yonghong, QI Quan, et al. Definition of arsenic rock zone borderline and its classification[J]. China Soil and Water Conservation Science, 2007, 5(1): 14-18. (in Chinese))

[2] 姚文艺,肖培青,王愿昌,等. 砒砂岩区侵蚀治理技术研究进展[J]. 水利水电科技进展,2019,39(5):1-9. (YAO Wenyi, XIAO Peiqing, WANG Yuanchang, et al. Research progress on soil erosion control technologies in Pisha sandstone areas[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019,39(5):1-9. (in Chinese))

[3] 肖培青,姚文艺,刘慧. 砒砂岩地区水土流失研究进展与治理途径[J]. 人民黄河, 2014, 36(10): 92-94. (XIAO Peiqing, YAO Wenyi, LIU Hui. Research progress and harnessing method of soil and water loss in pisha sandstone region[J]. Yellow River, 2014, 36(10): 92-94. (in Chinese))

[4] 黎铭,张会兰,孟铖铖. 黄河皇甫川流域水沙关系特性及关键驱动因素[J]. 水利水电科技进展,2019,39(5): 27-35. (LI Ming, ZHANG Huilan, MENG Chengcheng. Study on characteristics of water-sediment relationship and key influencing factors in Huangfuchuan Watershed of Yellow River[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2019,39(5):27-35. (in Chinese))

[5] 石迎春,叶浩,侯宏冰,等. 内蒙古南部砒砂岩侵蚀内因分析[J]. 地球学报, 2004, 25(6): 659-664. (SHI Yingchun, YE Hao, HOU Hongbing, et al. The internal cause of the erosion in Pisha sandstone area, Southern Inner Mongolia[J]. Journal of Earth, 2004, 25(6): 659-664. (in Chinese))

[6] 叶浩,石建省,侯宏冰,等. 内蒙古南部砒砂岩岩性特征对重力侵蚀的影响[J]. 干旱区研究,2008, 25(3): 402-405. (YE Hao, SHI Jiansheng, HOU Hongbing, et al. Effect of the lithologic characters of pisha sandstone on gravity erosion in South Inner Mongolia[J]. Arid Zone Research,2008, 25(3): 402-405. (in Chinese))

[7] 叶浩,石建省,王贵玲,等. 砒砂岩化学成分特征对重力侵蚀的影响[J]. 水文地质工程地质,2006, 33(6): 5-8. (YE Hao, SHI Jiansheng, WANG Guiling, et al. Effect of chemical compositions of Pisha sandstone on the gravity erosion[J]. Hydrogeological Engineering Geology, 2006, 33(6): 5-8. (in Chinese))

[8] 叶浩,石建省,李向全,等. 砒砂岩岩性特征对抗侵蚀性影响分析[J]. 地球学报,2006, 27(2): 145-150. (YE

Hao, SHI Jiansheng, LI Xiangquan, et al. The effect of soft rock lithology upon its anti-erodibility[J]. Journal of Earth, 2006, 27(2): 145-150. (in Chinese))
[9] 刘李杰. 鄂尔多斯砒砂岩冻融特性试验研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2015.
[10] 张强. 鄂尔多斯砒砂岩融沉特性试验研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2016.
[11] 陈溯航. 紫红色砒砂岩冻融循环下变形特性及微观结构试验研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2017.
[12] 李明玉. 冻融循环下砒砂岩重塑土力学性能及本构模型的研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2017.
[13] 李俊俊. 砒砂岩坡面侵蚀影响因素的冲刷试验研究[D]. 南京:东南大学, 2016.
[14] 王其东. 降雨条件下砒砂岩坡面侵蚀规律试验研究[D]. 南京:东南大学,2016.
[15] 常平. 冲蚀条件下砒砂岩坡面水力侵蚀特性试验研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2018.
[16] 李轶,倪凌峰,郭燕飞. 聚氨酯海绵负载二氧化钛/石墨烯复合蒙脱土漂浮材料可见光降解 17α 乙炔基雌二醇[J]. 河海大学学报(自然科学版),2017,45(2):116-121. (LI Yi, NI Lingfeng, GUO Yanfei. Floating catalyst based on polyurethane foams modified with TiO2/graphene-montmorillonite for visible-light degradation of 17αethinylestradiol [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2017,45(2):116-121. (in Chinese))
[17] 蒋林华,张炎,李辰治,等. 石灰石粉水泥基材料的研究与应用进展[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018, 46(1): 83-89. (JIANG Linhua, ZHANG Yan, LI Chenzhi, et al. Review on the research and application of cement-based materials with limestone powder[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2018,46(1):83-89. (in Chinese))
[18] 徐超,柴菲,刘若彤,等. 无纺织物过滤黏土的梯度比试验及机理研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(3): 227-233. (XU Chao, CHAI Fei, LIU Ruotong, et al. Gradient ratio tests and filtration mechanism of cohesive soil-geotextile system[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(3): 227-233. (in Chinese))
[19] 尚彦军,吴宏伟,曲永新. 花岗岩风化程度的化学指标及微观特征对比—以香港九龙地区为例[J]. 地质科学, 2001, 36(3): 279-294. (SHANG Yanjun, WU Hongwei, QU Yongxin. Comparison of chemical and microscopic characteristics of granite weathering degree: a case study from Kowloon, Hong Kong[J]. Geological Science, 2001,36(3): 279-294. (in Chinese))
[20] 巫锡勇,罗健,魏有仪. 岩石风化与岩石化学成分的变化研究[J]. 地质与勘探, 2004(4): 85-88. (WU Xiyong, LUO Jian, WEI Youyi. Research ofrock weathering and chemical composition of rock[J]. Geology and Exploration, 2004(4): 85-88. (in Chinese))
[21] 李日运,吴林峰. 岩石风化程度特征指标的分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(22): 3830-3833. (LI Riyun, WU Linfeng. Analysis and research on characteristic index of rock weathering degree[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(22): 3830-3833. (in Chinese))
[22] 刘春,白世伟. 岩体风化程度两级模糊综合评判研究[J]. 岩土力学与工程学报, 2005, 24(2): 252-256. (LIU Chun, BAI Shiwei. Two-level fuzzy comprehensive evaluation of rock mass weathering degree[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(2): 252-256. (in Chinese))
[23] RAMANA Y V, GOGTE B S. Quantitative studies of weathering in saprolitized charnockites associated with a landslip zone at the porthimund dam [J]. India Engineering Geology,1982, 19(1): 29-46.

(收稿日期:2018-11-05 编辑:雷燕)

(上接第 9 页)

[68] 马超德,尹伟伦,陈敏,等. 沙棘治理砒砂岩工程建设与管理[J]. 中国水土保持, 2005(10): 22-24. (MA Chaode, YIN Weilun, CHEN Min, et al. Construction and management of Pisha sandstone control project by *hippophae rhamnoides*[J]. Soil and Water Conservation In China,2005(10):22-24. (in Chinese))
[69] 姚文艺,时明立,吴智仁,等. 砒砂岩区二元立体配置治理技术及示范效果[J]. 人民黄河,2016,38(6):1-7. (YAO Wenyi, SHI Mingli, WU Zhiren, et al. Binary stereo configuration control technology and demonstration effect in Pisha sandstone area[J]. Yellow River,2016,38(6):1-7. (in Chinese))
[70] 张喜旺,秦奋. 砒砂岩地区降雨与植被耦合关系对侵蚀产沙的影响[J]. 地理研究, 2016, 35(3): 513-524. (ZHANG Xiwang, QIN Fen. Effect of coupling relation between rainfall and vegetation on erosion and sediment yield in Pisha sandstone area [J]. Geographical Research,2016,35(3):513-524. (in Chinese))
[71] 姚文艺,李长明,张攀,等. 砒砂岩侵蚀机理研究与进展[J]. 人民黄河, 2018, 40(6): 1-8. (YAO Wenyi, LI Changming, ZHANG Pan, et al. Research and progress on erosion mechanism of Pisha sandstone[J]. Yellow River,2018,40(6):1-8. (in Chinese))
[72] 顾卫,崔维佳,许映军,等. 工程创面生态恢复产业化问题初探[J]. 水利水电科技进展,2008,28(6):66-70. (GU Wei, CUI Weijia, XU Yingjun, et al, Study on the industrialization of ecological restoration for surfaces destroyed by engineering[J]. Advances in Science and Technology of Water resources, 2008, 28(6): 66-70. (in Chinese))
[73] 黎铭,张会兰,孟铖铖. 黄河皇甫川流域水沙关系特性及关键驱动因素[J]. 水利水电科技进展,2019,39(5):27-35. (LI Ming, ZHANG Huilan, MENG Chengcheng. Study on characteristics of water-sediment relationship and key influencing factors in Huangfuchuan Watershed of Yellow River[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2019,39(5):27-35. (in Chinese))

(收稿日期:2018-07-19 编辑:郑孝宇)