

doi: 10.11918/j.issn.0367-6234.2016.11.026

多因素耦合作用下砒砂岩冻胀性能试验

刘李杰, 白英, 李晓丽, 于际伟

(内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

摘要: 为研究含水率、温度、干密度与砒砂岩冻胀率的关系, 针对内蒙古鄂尔多斯市准格尔旗砒砂岩进行不同含水率、不同温度、不同干密度下多因素耦合冻胀试验. 研究结果表明: 砒砂岩含水率在 11% 以下时, 几乎不发生冻胀; 含水率为 12%~16% 时, 冻胀率随含水率增加呈线性增大; 冻胀率随干密度的增大而增大, 当冷端温度达到 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 表现异常; 冻胀率随冷端温度的降低而增大, 但干密度为 1.85 g/cm^3 的试件, 冻胀率随冷端温度的降低冻胀率有减小态势. 运用 spss 软件对试验数据进行多元非线性回归, 确定了含水率、干密度、冷端温度多因素耦合作用下冻胀率的回归方程.

关键词: 胀冻率; 含水率; 冷端温度; 干密度

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2016)11-0169-05

Experimental research on the freeze capacity of pisha sandstone under the multifactors

LIU Lijie, BAI Ying, LI Xiaoli, YU Jiwei

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract: In order to study the relationship between freeze capacity of pisha sandstone and its moisture rate, temperature, and dry density as well, this paper focuses on the multi-factor experiment on different moisture, temperature, and dry density at Zhungeer Banner, Erdos City, Inner Mongolia Autonomous Region. According to the study, it will almost not be frozen, when the moisture rate is below 11%. When it comes between 12% to 16%, the moisture rate will be changed. The freeze rate is increased with the increase of the dry density. It will be performed exceptionally, when the temperature is below $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. The freeze rate is increased with the decrease of the temperature of its cold end portion. However, as for the materials which own 1.85 g/cm^3 dry density, the freeze rate is in decreasing state with the decrease of the temperature of its cold end portion. By SPSS software on the study of its data with multi-non-linear regression, the regression equations of freeze rate is confirmed under multi-factor among the moisture rate, dry density, and temperature.

Keywords: freeze rate; moisture rate; the temperature of its cold end portion; dry density

砒砂岩主要分布在陕西省府谷县至内蒙古准格尔旗薛家湾一带. 内蒙古砒砂岩区属典型的温带大陆性气候, 四季分明. 在冬春两季, 白天在太阳辐射照耀下温度迅速升高, 产生“融解”现象, 晚间温度快速下降产生“冻结”现象, 昼夜“融解”和“冻结”交替. 砒砂岩土壤昼夜胀缩交替, “水”、“冰”相变频繁, 使得土壤结构更加松散, 胶结力变差, 加剧砒砂岩的风化, 地表土层因冻融而发生结构上的变异, 相

应地砒砂岩发生了冻融侵蚀. 科研工作者从不同方面对砒砂岩易于侵蚀的内在原因开展了许多研究^[1-5], 而且关于冻融作用对土的物理性质、水理性质和力学性质的影响已有详细的描述^[6-9], 然而目前关于砒砂岩冻融侵蚀的研究所见甚少. 为此本试验地选在内蒙古南部鄂尔多斯市准格尔旗, 东经 $111^{\circ}12'00''\sim 111^{\circ}14'40''$, 北纬 $40^{\circ}18'40''\sim 40^{\circ}23'00''$, 开展多因素作用下砒砂岩冻胀性能试验研究. 冻结温度条件是影响冻胀行为以及冻胀后土结构变化的一个重要因素, 冻结温度条件不同, 即使是同一初始状态(干容重、含水率相同)、同一土类的土样, 其冻融过程的成冰方式、水分迁移量、未冻水含量以及冻胀特性等都是不相同的; 土体干密度是衡量冻胀试

收稿日期: 2015-03-26

基金项目: 教育部“创新团队发展计划”(IRT13069); 国家自然科学基金(41261070); 内蒙古自治区自然科学基金(2012MS0616)

作者简介: 刘李杰(1987—), 男, 硕士研究生

通信作者: 白英, byy90@sohu.com

验中发生冻胀量大小及其冻融机理的一个重要因素,目前许多试验都表明土体的冻胀性、融沉性以及冻融后土物理性质的变化,与土的干密度之间存在良好的关系^[10];已有工程实践证明,并非所有的含水土体都产生冻胀,只有当土中水分达到一定界限后才会发生冻胀现象,这个含水率被称为土的起始冻胀含水率. 本文研究冷端温度、干密度和含水率三者与砒砂岩冻胀率的关系,以期揭示冻胀作用对砒砂岩侵蚀的机理.

1 土的物性和试件制备

试验研究的砒砂岩粒径组成见表 1,液塑限分别为 29.3% 和 19.6%.

表 1 砒砂岩的粒径组成

Tab.1 Grain distribution of the pisha sandstone

粒径区间/mm	质量百分含量/%
$d < 0.01$	7.47
$0.01 \leq d < 0.05$	40.83
$0.05 \leq d < 0.10$	37.07
$0.10 \leq d < 0.25$	11.13
$0.25 \leq d < 0.50$	3.5
$0.50 \leq d < 1.00$	2.7
$d > 1.00$	0.74

试件制备:重塑土样制备满足 GB/T50123—1999《土工试验方法标准》规定,将砒砂岩烘干后过

表 2 测试土样的物理性质参数和实验方案

Tab.2 Physical parameters of the tested soil samples and their corresponding testing

试验编号	干密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	含水率/%	冷端温度/°C
No.01~ No.09	1.74	8、9、10、11、12、13、14、15、16	-5
No.10~ No.18	1.74	8、9、10、11、12、13、14、15、16	-10
No.19~ No.27	1.74	8、9、10、11、12、13、14、15、16	-15
No.27~ No.36	1.74	8、9、10、11、12、13、14、15、16	-20

2 冻胀试验及结果分析

试验仪器:在沪升牌高低温湿热试验箱内进行,采用封闭系统(即无补水)、自由冻结. 将试件放入表面包裹 3 cm 厚泡沫保温材料的不锈钢筒中,束缚其横向变形,保证在纵向上发生冻胀. 试验箱制冷方式为风冷,在试样上部覆盖 0.3 mm 厚铁板,在传递冷源的同时避免试件含水率的损失. 在铁板上部安装精度为 0.01 mm 的百分表测量其位移,在试件的上部、中部和下部各安装一个电热偶反映试件温度. 将整个试验装置固定在固定架上置于试验箱内

筛(筛孔直径为 2 mm),取筛下足够土样放入干燥器. 根据试样筒的容积和试验干密度计算所需干土,再由干土质量和含水率计算所需蒸馏水. 利用两头压实法制得直径为 61.8 mm,高度为 145 mm 的试样. 冻融试验的土样经验算,其干密度与要求干密度之差不大于 $\pm 0.01 \text{ g/cm}^3$,含水率与要求含水率之差不大于 0.5%. 试样的均匀性主要表现在密度和含水率的均匀性上,要求密度和含水率不超过允许差值,以使试验结果离散型减小. 每种试验处理设置两个重复.

试验方案:为了系统全面地研究含水率、干密度、冷端温度对砒砂岩冻胀的影响,试验采用全面的试验. 含水率的数值范围:采用砒砂岩的天然含水率 8% 为含水率最小值,制样机能制得的试件最大含水率 16% 为含水率上限,以 1% 的幅度递增. 冷端温度的考虑:由于在冷端温度高于土体的冻结温度时土体不发生冻结,故在选取冷端温度范围时,同时考虑了土中水的冻结温度以及要注意几个冷端温度要具有一定的间距,以便使试验结果具有一定的普遍性和实用性;再综合考虑试验地区的温度条件,选取 -5、-10、-15 和 -20 °C 的冻结冷端温度来考察冷端温度对砒砂岩性质的影响. 干密度的取值:以标准击实的最大干密度 1.74 g/cm^3 为干密度下限,天然干密度 1.85 g/cm^3 为上限,中间插入 1.77、 1.80 g/cm^3 两值. 具体实验方案见表 2,剩余 3 个干密度重复上述试验.

进行试验,当监测到冻胀停止时,停止冻结.

2.1 含水率对砒砂岩冻胀的影响

冻胀率和含水率关系如图 1 所示. 对 288 个试件进行冻胀试验后得出:在本试验研究的含水率范围内,8%~11% 含水率的试件,冻胀率几乎为 0;在冷端温度和干密度不变的情况下,12%~16% 含水率试件的冻胀率随含水率的增加呈线性增长;以试验地 30a 气象资料为基础,在 -10 °C 持续的时间较长. 表 3 给出冷端温度为 -10 °C 时 4 种干密度的冻胀率和含水率之间的关系式.

表 3 冻胀率与含水率的关系

Tab.3 Relationship between frost rate and moisture

干密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	二者关系式	相关系数	起始冻胀含水率/%
1.85	$\eta = 0.1846\omega - 2.0544$	0.8890	11.13
1.80	$\eta = 0.1986\omega - 2.3972$	0.9147	12.07
1.77	$\eta = 0.2607\omega - 3.3938$	0.9876	13.02
1.74	$\eta = 0.2853\omega - 3.5360$	0.9490	12.39

注: ω 为含水率.

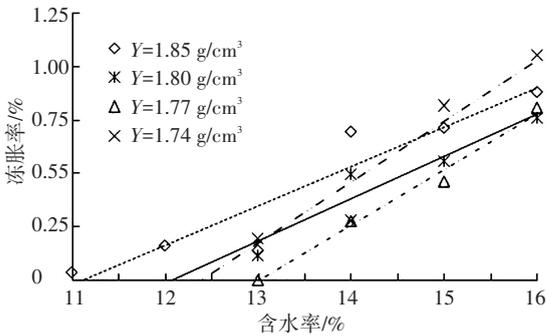


图 1 冻胀率和含水率关系

Fig.1 Relationship between frost rate and moisture

已有工程实践证明,并非所有的含水土体都产生冻胀,只有当土中水分达到一定界限后才会发生冻胀现象,这个含水率被称为土的起始冻胀含水率.而当试样密度、上部荷重及冻结温度等均固定不变时,土体的冻胀量 Δh 将仅是含水率 ω 的单值函数,即

$$\Delta h = \varphi(\omega).$$

所以,在控制其他条件不变仅改变含水率的情况下求出当冻胀量 $\Delta h = 0$ 时的试件含水率,即为该土的起始冻胀含水率.在试验中,考虑到试验条件只能控制在一定精度范围内,因此,宜将使冻胀量等于零或接近于零的一个含水率数值定为该土的起始冻胀含水率^[11].由上述的 4 条回归线,令 $\eta = 0$ 确定了 4 个干密度在冷端温度为 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 时的起始冻胀含水率.

2.2 干密度对砒砂岩冻胀的影响

一般情况下土中孔隙会随干密度增加而缩小,在不改变土体含水率时却改变了土体饱和度.它们之间存在着如下关系^[12]:

$$\omega = \frac{S_r(G_s\gamma_w - \gamma_d)}{G_s\gamma_d}. \quad (1)$$

式中: ω 为土体含水率,%; S_r 为饱和度,%; γ_d 为土的干容重, g/cm^3 ; G_s 为土颗粒的重度; γ_w 为水的容重, g/cm^3 .

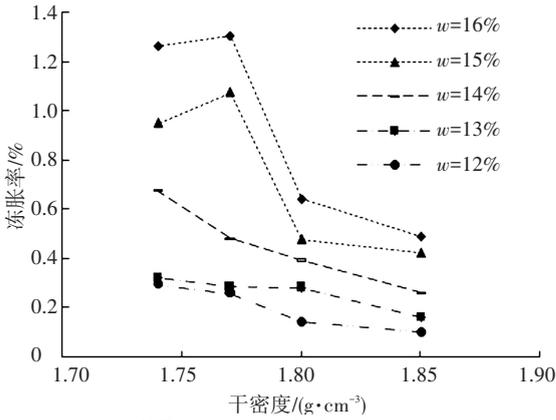
式(1)表明:在一定含水率条件下,密度较小的土体冻结时,土中有着充分的孔隙容纳固态冰的自

由膨胀,不会影响到土体颗粒之间分离;密度增大时自由水充填孔隙程度增大,土体饱和度增高,因此在单向冻结温度场中冻胀性也增大;当土体密度达到某一标准密度时,土颗粒间达到最佳团聚条件,这种状态能够保证提供水分迁移的薄膜结构处于最有利条件,土体冻胀性也达到最大程度.

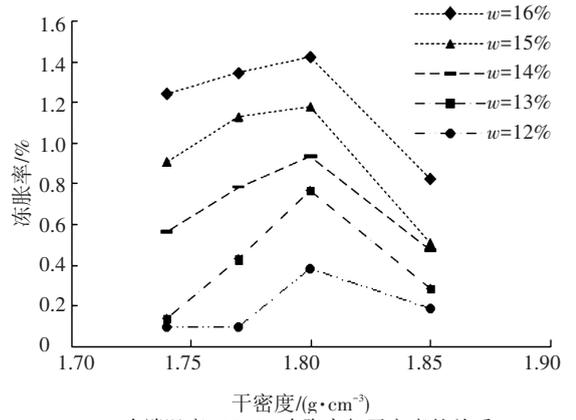
冻胀率与干密度的关系如图 2 所示.从图 2 可以看出:冷端温度为 $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 时,冻胀率随着干密度的增大而减小;冷端温度为 $-15\text{ }^\circ\text{C}$ 时,冻胀率随着干密度的增大而增大,在干密度为 $1.80\text{ }g/cm^3$ 处冻胀最大,当干密度继续增大到 $1.85\text{ }g/cm^3$ 时,冻胀率反而降低到最大值的一半;冷端温度为 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 时,在干密度为 $1.74\text{ }g/cm^3$ 处冻胀率最大,干密度增大到 $1.77\text{ }g/cm^3$ 时,冻胀率大幅下跌,之后冻胀率随着干密度的增大而增大;冷端温度为 $-5\text{ }^\circ\text{C}$ 时,冻胀率的变化规律与冷端温度为 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 时相同.整体上,冻胀率随干密度的增大在增大,同时,冷端温度的不同也影响着冻胀率与干密度之间的关系.

2.3 冷端温度对砒砂岩冻胀的影响

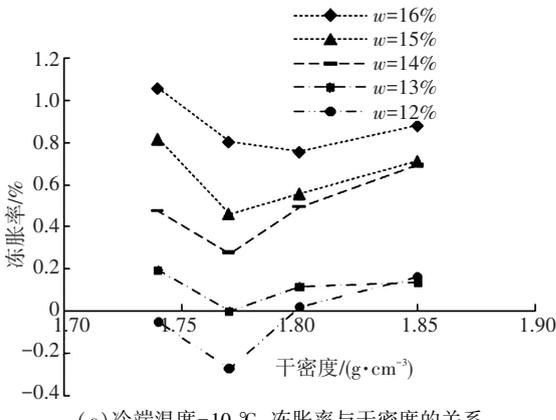
冻胀率与冷端温度的关系如图 3 所示.干密度为 $1.85\text{ }g/cm^3$ 的试件,温度较低时,试验过程中土样的冻胀率较小;随着冷端温度的升高,试件的冻胀率逐渐增大.产生这一现象的原因是,冷端温度不同,土样的冻胀机理是不同的.冷端温度较低 ($-20\text{ }^\circ\text{C}$) 时,在冻结过程中,土体中的温度梯度比较大,冻结速率较快,下部土体中水分也来不及迁移便在快速推进的冻结锋面作用下全部冻结,所以,孔隙水主要发生原位冻结(胶结成冰作用),同时分凝冰层很细小,分布均匀.土中能量处于动态平衡状态,冻胀变形停止并在土中形成近似稳定的温度场,孔隙变化不大,其扩大不超过 9% (因为有未冻水存在),冻胀率较小.随着温度的逐渐升高 ($-15\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-5\text{ }^\circ\text{C}$),土体中的温度梯度逐渐减小,冻结速率也逐渐降下来,冻结锋面前进的速度较慢,迁移到锋面附近的水分增多,此时土中水逐渐由原来胶结成冰作用占主导地位向分凝成冰作用占主导地位过渡,土体中形成一系列相间隔的分凝冰层,分凝冰层逐渐变厚.冰体积大大超过冻结前土体中的孔隙,土体冻胀率相应较大.而干密度为 1.80 、 1.77 和 $1.74\text{ }g/cm^3$ 的试件,不再符合上面规律.干密度为 1.80 、 $1.77\text{ }g/cm^3$ 试件的冻胀率随冷端温度的降低逐渐增大,在 $-15\text{ }^\circ\text{C}$ 时冻胀率达到最大,当冷端温度继续降低时,冻胀率反而减小. $1.74\text{ }g/cm^3$ 试件的冻胀率随冷端温度的降低逐渐增大.而且,在 1.74 、 1.77 和 $1.80\text{ }g/cm^3$ 3 个干密度,均在 $-15\text{ }^\circ\text{C}$ 时冻胀率达到最大.



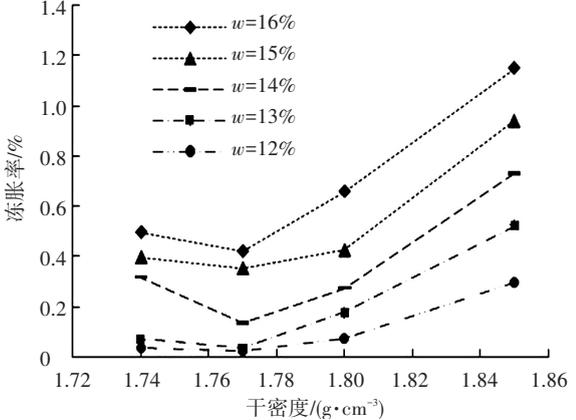
(a) 冷端温度 -20 °C, 冻胀率与干密度的关系



(b) 冷端温度 -15 °C, 冻胀率与干密度的关系



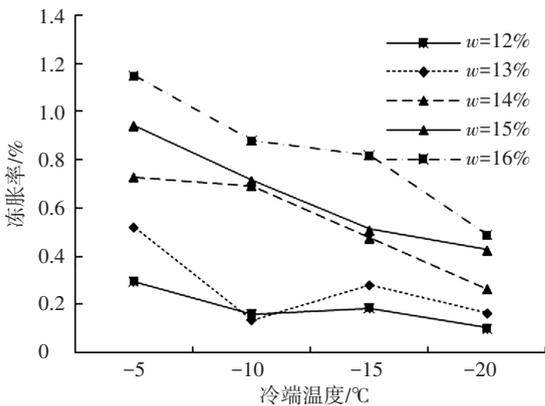
(c) 冷端温度 -10 °C, 冻胀率与干密度的关系



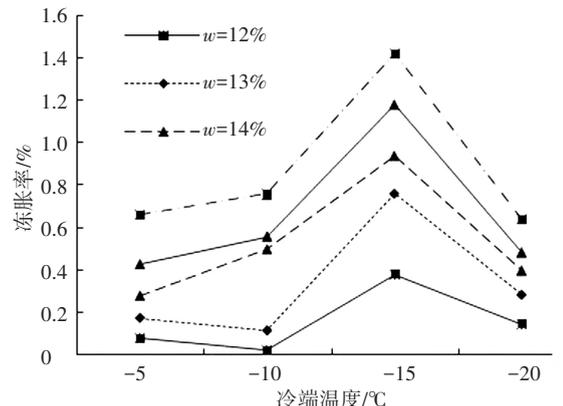
(d) 冷端温度 -5 °C, 冻胀率与干密度的关系

图 2 冻胀率与干密度的关系

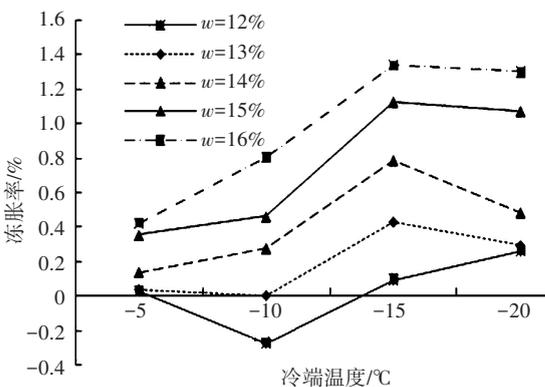
Fig.2 Relationship between frozen-heave rate and dry density



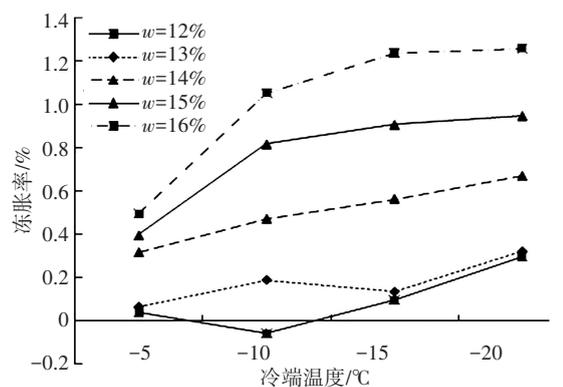
(a) $\gamma = 1.85 \text{ g/cm}^3$, 冻胀率与冷端温度的关系



(b) $\gamma = 1.80 \text{ g/cm}^3$, 冻胀率与冷端温度的关系



(c) $\gamma = 1.77 \text{ g/cm}^3$, 冻胀率与冷端温度的关系



(d) $\gamma = 1.74 \text{ g/cm}^3$, 冻胀率与冷端温度的关系

图 3 冻胀率与冷端温度的关系

Fig.3 Relationship between frozen-heave rate and test temperature

2.4 多因素耦合作用下冻胀率分析

运用 spss 软件对实验所得数据进行非线性拟合, 得到冻胀率与温度、含水率及干密度之间的关系如下:

$$\eta = -1.024t + 1.349\omega + 5.044\gamma^2 - 0.002t^2 + 0.009\omega^2 + 0.56\gamma t - 0.797\gamma\omega - 0.003\omega t - 16.763.$$

式中: η 为冻胀率, %; ω 为土体含水率, %; t 为温度, $^{\circ}\text{C}$; γ 为土的干密度, g/cm^3 . $R^2 = 0.787$, 修正后的 $R^2 = 0.763$, 标准差为 0.186, $F = 32.845$.

3 结 论

1) 在试验范围内, 冷端温度 -20°C 、干密度 $1.80\text{ g}/\text{cm}^3$ 、含水率为 16% 的试件冻胀率最大。

2) 含水率在 11% 以下 (包含 11%) 的试件冻胀率不明显, 几乎为 0. 试件冻胀率与含水率呈线性关系, 随着含水率的增加冻胀率增大, 粉砂冻胀率是淤泥质粘土冻胀率的十分之一, 冷端温度、含水率两个因素变化对其冻胀率几乎不产生影响. 而砒砂岩的冻胀率对含水率最为敏感, 所以, 砒砂岩不是一种单纯的粉砂, 它也具有一定的黏性。

3) 冻胀率整体随干密度的增大而增大, 但也有反常, 尤其在冷端温度为 -20°C 时。

4) 干密度为 $1.85\text{ g}/\text{cm}^3$ 的试件, 冻胀率随冷端温度的降低冻胀率减小, 1.80 、 1.77 和 $1.74\text{ g}/\text{cm}^3$ 的试件冻胀率整体随冷端温度的降低冻胀率增大。

5) 运用 spss 软件对试验数据进行多元非线性回归, 确定了含水率、干密度、温度多因素耦合作用下冻胀率的回归方程为 $\eta = -1.024t + 1.349\omega + 5.044\gamma^2 - 0.002t^2 + 0.009\omega^2 + 0.56\gamma t - 0.797\gamma\omega - 0.003\omega t - 16.763$.

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, Kou Quan, et al. Definition of arsenic rock zone borderline and its classification[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2007, 5(1): 14-18. DOI: 10.3969/j.issn.1672-3007.2007.01.003.
- [2] 唐政洪, 蔡强国, 李忠武, 等. 内蒙古砒砂岩地区风蚀、水蚀及重力侵蚀交互作用研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(2): 25-29.

- TANG Zhenghong, CAI Qiangguo, LI Zhongwu, et al. Study on Interaction Among Wind Erosion, Hydraulic Erosion and Gravity Erosion in Sediment-Rock Region of Inner Mongolia[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 15(2): 25-29. DOI: 10.3321/j.issn:1009-2242.2001.02.007.
- [3] 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, 36(6): 5-8.
YE Hao, SHI Jiansheng, WANG Guiling, et al. Effect of chemical compositions of Pisha sandstone on the gravity erosion[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2006, 33(6): 5-8. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3665.2006.06.002.
- [4] 毕慈芬, 王富贵. 砒砂岩地区土壤侵蚀机理研究[J]. 泥沙研究, 2008(1): 70-73.
BI Cifen, WANG Fugui. Research on soil erosion mechanism in soft rock regions[J]. Journal of Sediment Research, 2008, (1): 70-73. DOI: 10.3321/j.issn:0468-155X.2008.01.012.
- [5] 吴利杰, 李新勇, 石建省, 等. 砒砂岩的微结构定量特征研究[J]. 地球学报, 2007, 28(6): 597-602.
WU Lijie, LI Xinyong, SHI Jiansheng, et al. Quantitative Characteristics of the Microstructure of Pisha-sandstone[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2007, 28(6): 597-602. DOI: 10.3321/j.issn: 1006-3021.2007.06.014.
- [6] CHAMBERLAIN E J, GOW A J. Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils[J]. Engineering Geology, 1979, 13(79): 73-92.
- [7] VIKLANDER P. Permeability and volume changes in till due to cyclic freeze-thaw[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(3): 471-477.
- [8] GRAHAM J, AU V C S. Effects of freeze-thaw and softening on a natural clay at low stresses[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1985, 22(1): 69-78.
- [9] ELLIOTT R P, THORNTON S I. Resilient modulus and AASHTO pavement design[J]. Transportation research record, 1988, 1196: 116-124.
- [10] 童长江. 我国冻土融化压缩性研究[J]. 冰川冻土, 1988(3): 327-331.
Tong Changjiang. Thaw Consolidation of Frozen soils[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1988, 03: 327-331.
- [11] 陈金桩. 关于起始冻胀含水率的讨论[J]. 冰川冻土, 1986(3): 223-226.
Chen Jinzhuang. Discussion on Critical Water Content of Frost Heave[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1986, 03: 223-226.
- [12] 童长江, 管枫年. 土的冻胀与建筑物冻害防治[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
Tong Changjiang, Guan Fengnian. Frost heave of soil & Prevention of buildings' frost damage[M]. Water conservancy and electric power press, 1985.

(编辑 王小唯 苗秀芝)