

# 酸侵蚀区白砂岩冻融损伤的影响因素研究

刘松明, 陈有亮, 杜曦, 黄骥, 聂大祥

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

**摘要:** 通过循环冻融试验,探究酸侵蚀地区白砂岩冻融损伤的影响因素。研究对三组白砂岩分别作不浸泡、水浸泡、酸浸泡的处理后进行不同次数的冻融循环,再进行单轴压缩试验。并从纵波波速、峰值应力、应力-应变曲线、相对杨氏模量、损伤变量等方面分析不同处理方式的影响。研究表明:水的浸泡是白砂岩冻融损伤的主要原因,酸侵蚀能在一定程度上加快白砂岩的冻融损伤,但本实验中影响不大。研究成果对寒区及酸侵蚀区的建设及工程具有一定的参考价值。

**关键词:** 白砂岩; 冻融循环; 酸侵蚀; 单轴压缩试验; 峰值应力

中图分类号: TU528.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)05-0127-05

## Study on influence factor of freezing - thawing damage of white sandstone in acid erosion area

LIU Songming, CHEN Youliang, DU Xi, HUANG Ji, NIE Daxiang

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** Through circulation freezing-thawing test, the paper studied the influence factors of freezing-thawing damage of white sandstone in acid erosion areas. The paper firstly treated white sandstone sample with different ways such as not soaked, soaked in water and soaked in acid, and performed freezing-thawing test at different circulation times, then carried out uniaxial compressive strength test. It also analyzed the effect of different processing ways from longitudinal wave speed, peak stress, stress - strain curve, relatively young's modulus and damage variable. The results indicated that white sandstone being soaked in water is the major reason of freezing-thawing damage, and acid erosion can speed up the freezing-thawing damage to in certain extent, but the impact is not significant in this experiment. The research conclusion can provide valuable reference for the engineering construction in cold and acid erosion area.

**Key words:** white sandstone; freezing-thawing circulation; acid erosion; uniaxial compressive strength test; peak stress

我国的永久性寒区面积占国土面积的22.3%<sup>[1]</sup>,季节性寒区面积则占全国国土面积的75%<sup>[2]</sup>,是世界上寒区面积分布最广的国家之一。近年来随着西部开发、振兴东北老工业基地等国家建设的需要,工程中经常会接触到寒区岩体工程。我国又是个工业大国,不少工业污水的排放,也使得地下水受到酸侵蚀。在那些既是寒区,又受酸雨侵蚀的地区,石制建筑往往剥蚀严重,强度受损,造成工程事故。对于岩石冻融损伤及酸侵蚀的研究, Bagde<sup>[3]</sup>等研究了冻融循环荷载作用下完整砂岩试块的疲劳特性; 蒋立浩等<sup>[4]</sup>等分析了花岗岩在不同温度冻融循环试验的条

件下岩石试块各种力学性能随冻融循环次数的变化规律; 陈四利等<sup>[5]</sup>进行了花岗岩在不同溶液、不同浓度下的浸泡和单轴压缩试验。

本文在不同的环境下(干燥、水浸泡、酸浸泡)进行了不同次数的冻融循环试验研究,并比较其弹性模量及单轴压缩强度等,以探讨酸侵蚀下冻融损伤的影响因素,为受酸侵蚀寒区的工程建设提供参考。

## 1 试验概况

### 1.1 试样制备

试验中采用的白砂岩均取自福建某石料矿场,

收稿日期: 2014-04-27; 修回日期: 2014-06-10

基金项目: 上海市研究生创新基金项目(JWCXSL1302)

作者简介: 刘松明(1990-),男,湖南衡阳人,硕士研究生. 研究方向为岩石、混凝土材料力学性能研究。

通讯作者: 杜曦(1991-),男,江苏徐州人,硕士研究生. 研究方向为岩石、混凝土性能研究。

颜色较浅,略带粉红色,测得密度  $\rho = 2.35 \text{ g/cm}^3$ 。将其加工成标准试件  $50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ , 满足《工程岩体试验方法标准》GB/T50266-99 的要求: 试件两端面不平整度误差不得大于  $0.05 \text{ mm}$ ; 沿试件高度, 直径的误差不得大于  $0.3 \text{ mm}$ ; 端面应垂直于试件轴线, 最大偏差不得大于  $0.25^\circ$ 。试验前采用康科瑞 NM-3C 非金属超声检测仪测定了岩试件的动弹性模量, 挑选测量值相近的试件进行同一批试验, 以减小同批次岩石试件的离散性。每组 5 个, 共 75 个试样。

为模拟酸性地下水, 同时又由于试验条件的限制, 采用氯化钠、无水硫酸钠,  $6 \text{ mol/L}$  的盐酸调制而成, 所得溶液中硫酸根离子、氢离子都是  $0.01 \text{ mol/L}$ 、液氯离子  $0.02 \text{ mol/L}$ 、钠离子  $0.03 \text{ mol/L}$  (不考虑水的分解), 总体溶液呈酸性, pH 值为 2。

## 1.2 试验设备和试验方法

试块共分 3 大组, 第一组不浸泡, 第二组采用纯净水浸泡, 第三组采用配置的酸性溶液浸泡。二、三组试块浸泡 15 d, 以使得试块孔隙内水充分饱和。浸泡后测其弹性模量, 然后将白砂岩试块置于  $-20^\circ\text{C}$  低温数控箱中, 采用的低温数控箱由浙江土工仪器制造有限公司生产制造, 型号为 STDW-40, 低温可达  $-40^\circ\text{C}$ , 温度测量的精度为  $0.1^\circ\text{C}$ 。本实验采用干冻法(不补水冻融), 达到  $-20^\circ\text{C}$  时立即升温至  $20^\circ\text{C}$ , 再立即降温至  $-20^\circ\text{C}$ , 此为一个循环, 历时约 4 h。实验时, 各大组又分为 5 个小组, 分别冻融循环 0、10、25、50、75 次。冻融循环后测量其弹性模量, 再利用微机控制刚性伺服三轴压力试验机对冻融后的花岗岩进行单轴压缩试验, 试验采用应力控制方式, 以  $5 \text{ kN/s}$  的速率沿轴向施加轴向荷载, 直至试件破坏, 试验数据由试验系统自动采集。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 纵波波速

超声脉冲在固体材料中的传播速率依赖于此种材料的弹性特性和组织结构<sup>[6]</sup>, 通过对声速的测定, 能在一定程度上反映材料特性的改变。本实验中采用 V-METER III 超声脉冲速度测试仪测纵波波速  $v$ , 取平均值。

用超声脉冲速度测试仪测出自然状态以及不同溶液不同冻融次数下白砂岩的纵波波速, 每组取平均值, 如图 1 所示。由该图冻融次数为 0 时可以看出, 不浸泡组的纵波波速为  $2546 \text{ m/s}$ , 而水浸泡组和酸浸泡组的分别下降到了  $2460$  和  $2467 \text{ m/s}$ , 下

降幅度分别是  $3.4\%$  和  $3.1\%$ 。从图 1 还可以看出: 水浸泡组和酸浸泡组试块的纵波波速都随着冻融次数的增加而减小, 由冻融前的  $2460$  和  $2467 \text{ m/s}$ , 分别下降到了  $2264$  和  $2195 \text{ m/s}$ , 下降幅度分别是  $8.0\%$  和  $11.0\%$ , 且酸浸泡组略小于水浸泡组的纵波波速, 但两组的相差并不大。且这两组的纵波波速在冻融循环的初期下降明显, 到 50 次以后变化不大。而不浸泡只进行干冻组的纵波波速并没有出现明显规律的变化。这表明: 水的浸泡是导致白砂岩冻融循环后纵波波速下降的主要原因, 对比水浸泡组可知, 酸的侵蚀影响并不大。此外, 水浸泡组和酸浸泡组的纵波波速在冻融循环前期下降明显, 而到了 50 次以后下降不明显, 这是因为随着冻融循环的进行, 白砂岩的水分逐渐蒸发逸出, 导致后期岩石内部并无多少水分, 冻胀作用减弱, 对白砂岩纵波波速的损伤减弱。

### 2.2 峰值应力

由单轴压缩试验测得的白砂岩单轴抗压强度除以白砂岩试块的受压面积, 即可求出峰值应力, 每组试样的峰值应力取平均值, 得到不同处理条件下不同冻融循环次数下白砂岩的峰值应力, 如图 2 所示。

由图 2 冻融次数为 0 时可以看出, 不浸泡组的峰值应力为  $49.60 \text{ MPa}$ , 水浸泡组的峰值应力为  $48.16 \text{ MPa}$ , 酸浸泡组的峰值应力为  $47.40 \text{ MPa}$ , 白砂岩的峰值应力分别下降了  $2.9\%$  和  $4.4\%$ , 这说明浸泡后白砂岩试块的强度略有下降, 且酸侵蚀的影响并不大。由图 2 可以看出, 不浸泡组的峰值应力随着冻融循环次数的增加并无明显变化规律, 与上一节不浸泡组纵波波速的变化相符合。水浸泡组的峰值应力随着冻融次数的增加而降低, 由冻融前的  $48.16 \text{ MPa}$  下降到  $36.34 \text{ MPa}$ , 下降幅度为  $24.5\%$ 。其峰值应力  $\sigma$  随冻融循环次数  $n$  的函数关系如下:

$$\sigma = 35.93 + 12.12e^{-\frac{n}{19.41}} \quad (R^2 = 0.990) \quad (1)$$

相关系数  $R^2$  达到了  $0.990$ , 说明试验数据与模拟曲线比较符合。

酸浸泡组的峰值应力随着冻融次数的增加而降低, 由冻融前的  $47.40 \text{ MPa}$  下降到了  $36.79 \text{ MPa}$ , 下降幅度为  $22.4\%$ 。其峰值应力  $\sigma$  随冻融循环次数  $n$  的函数关系如下:

$$\sigma = 37.23 + 10.08e^{-\frac{n}{17.12}} \quad (R^2 = 0.980) \quad (2)$$

### 2.3 应力-应变关系

由单轴压缩试验所得到的试块强度及位移, 可求

出应力和应变。图 3 是不同处理条件下白砂岩试块经历 75 次冻融循环后选取的典型应力 - 应变曲线。

从图 3 可以看出,不同处理条件下白砂岩试块经历 75 次冻融循环后的典型应力 - 应变曲线大致分为五个阶段:

(1)压密阶段:此阶段曲线呈上凹型,随着应力的增大,应变增长较快。这主要是因为白砂岩试块内存的微裂纹在外力作用下趋于闭合所致;

(2)弹性阶段:此阶段的曲线基本呈直线状态,应力与应变成比例增长,该曲线在此阶段的斜率就是平均切线杨氏模量,由该曲线可知,不浸泡组的斜率略大于其他两组,与 2.1 节结果相符;

(3)剪切破坏阶段:由于压力机夹板一端具有圆形凹槽,加载时未垫钢板,当应力达到一定程度时,试块发生剪切破坏,白砂岩试块嵌入凹槽,此阶

段应变迅速增大而应力变化不大;

(4)弹性阶段:由于剪切破坏后实际受压面积有所减小,故此阶段可视为凹槽范围内岩石在两端受约束情况下的受压。此阶段的曲线与第二阶段基本相似,应力与应变成比例增长;

(5)应变软化阶段:在此阶段,当应力达到峰值应力后,试块的裂隙快速发展,应变增长较快,应力减小,试块迅速破坏。

图 3 中,酸浸泡组和水浸泡组的应变都略大于不浸泡组,这是因为这两组经过浸泡后,水进入了试块的裂隙中并填充其中,使得试块的弹性提高,增加了延性。此外,由此曲线可以看出,酸浸泡组和水浸泡组的应力 - 应变曲线较为接近,这表明,该实验条件下,酸的侵蚀影响并不大。

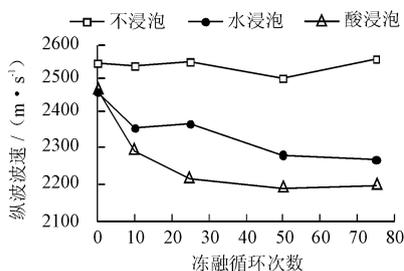


图 1 纵波波速与冻融次数的关系图

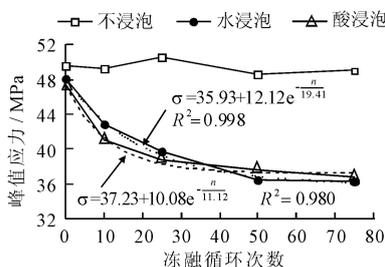


图 2 岩石峰值应力与冻融循环次数的关系

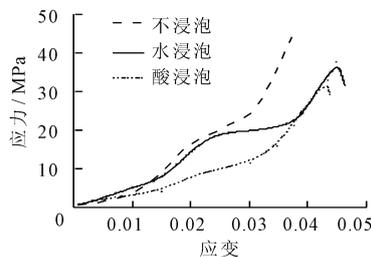


图 3 75 次冻融循环后应力 - 应变曲线

## 2.4 相对杨氏模量

用超声脉冲速度测试仪测试不同处理条件下不同冻融循环次数的白砂岩杨氏模量,每组取平均值。求出相对杨氏模量  $E/E_0$ ,即冻融后的杨氏模量  $E$  与冻融前的杨氏模量  $E_0$  之比。图 4 为不同处理条件下不同冻融循环次数的白砂岩相对杨氏模量。从图 4 可以看出,不浸泡组的相对杨氏模量没有明显的变化规律,而水浸泡组和酸浸泡组在冻融循环前 50 次时相对杨氏模量下降较快,50 次以后,相对杨氏模量变化不大。对水浸泡组的相对杨氏模量  $E/E_0$  与冻融循环次数  $n$  进行指数函数拟合,得:

$$\frac{E}{E_0} = 0.781 + 0.143e^{-\frac{n}{29.16}} \quad (R^2 = 0.791) \quad (3)$$

对酸浸泡组的相对杨氏模量  $E/E_0$  与冻融循环次数  $n$  进行指数函数拟合,得

$$\frac{E}{E_0} = 0.741 + 0.198e^{-\frac{n}{9.36}} \quad (R^2 = 0.998) \quad (4)$$

由此可见,白砂岩在酸浸泡和水浸泡的情况下

相对杨氏模量随冻融循环次数的增加呈负指数规律减小。

## 2.5 损伤变量

在外载或环境作用下,由细观结构缺陷萌生、扩展等不可逆变化引起的材料或结构宏观力学性能的劣化称为损伤。在文献[7]中,Rabotnov 对早期损伤变量概念进行了推广,提出了损伤变量  $D$ ,它表示由于损伤而丧失了部分承载能力后的面积  $\bar{A}$  与初始无损伤时的面积  $A$  之比,即

$$D = \frac{\bar{A}}{A} \quad (5)$$

本实验中,由于试块损伤及性能在各个方向无明显差异性,即可视为各向同性损伤问题,由有效应力可得:

$$F = \sigma \cdot A = \bar{\sigma} \cdot \bar{A} \quad (6)$$

式中:  $\sigma$  为表观应力(采用未受损伤面积  $A$  计算所得的应力),  $\bar{\sigma}$  为试块内部的有效应力或真实应力(采用受损后实际受压面积  $\bar{A}$  计算所得应力)。

联立(5)、(6)可得:

$$D = 1 - \frac{\sigma}{\bar{\sigma}} \quad (7)$$

很明显,对于完全无损伤状态, $D = 0$ ;对于完全丧失承载能力的状态, $D = 1$ 。本试验中,所采用的白砂岩试块来自同一批石料,且事先经过测弹性模量进行筛选,故不浸泡不冻融对照组试块可视为完全无损材料,其峰值应力 $\sigma = \bar{\sigma}$ 。将试验所得的峰值应力代入公式(7),并作出损伤变量 $D$ 与冻融循环次数 $n$ 的关系曲线,如图5所示。

由图5可以看出,随着冻融循环次数的增加,水浸泡组和酸浸泡组的损伤变量也随之增加,且到了50次以后趋于不变。而不浸泡组的损伤变量无明显的变化,即在干燥的条件下,试块在冻融循环中基本不受损伤。

### 3 讨论

由于影响试验结果的因素有很多,包括人为的操作误差、仪器本身的误差、白砂岩试块本身的不均匀不平整等,使得试验结果有较大的离散性,上述规律和结论还有待进一步验证,但仍具有一定的规律性。下面对不同处理条件的白砂岩冻融循环后的力学性能变化的原因进行探讨。

岩石在受到冻融作用后,会发生抗压强度和弹性模量降低的现象,这是因为:岩石是一种非均匀性

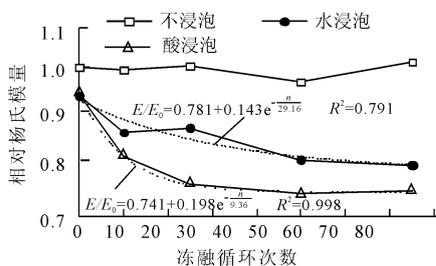


图4 相对杨氏模量与冻融循环次数关系曲线

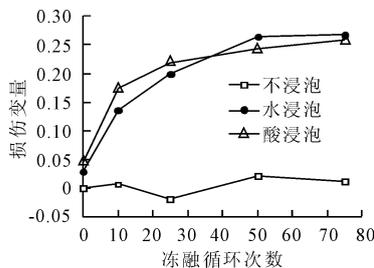


图5 损伤变量 $D$ 与冻融循环次数关系曲线

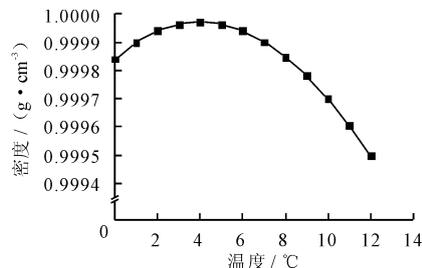


图6 水的密度与温度的关系图

酸浸泡组和水浸泡组的峰值应力在冻融循环后都小于不浸泡组,这是因为前两者都受到了水的浸泡,冻融时会产生冻胀作用,而酸浸泡组的峰值应力在冻融循环前期又略小于水浸泡组,这是因为酸浸泡组除了冻胀作用外,还受到了酸性溶液对白砂岩的侵蚀。将配好的酸性溶液倒入装有白砂岩的容器中,白砂岩与溶液迅速发生剧烈反应,溶液变浑浊,产生气泡,这表明在酸性溶液中,白砂岩会发生剧烈的化学反应,试块受到了一定的损伤。化学反应后的生成物以离子的形态溶于水,造成岩石内部孔隙的增大。而随着岩石内部孔隙的增大,也进一步

的天然产物,内部有裂缝、孔隙等,在水浸泡过程中,水会逐渐渗入岩石孔隙中。当受低温冰冻作用后,空隙中的水会结成冰。而水、冰、岩等多相介质具有不同的热物理性质:温度降低时,矿物晶粒体积收缩,而孔隙水成冰发生膨胀,变形的不协调导致在矿物晶粒及微孔隙间产生了巨大的冻胀力,而某些胶结强度比较弱的岩石颗粒在这种冻胀力下会出现破裂,使得岩石内部出现局部的损伤<sup>[8]</sup>。温度升高时,在孔隙、裂隙中的冰融化,体积减小,冻结应力释放,并且水分迁移,进而加速这种损伤。不浸泡组因为岩石内部没有水,不会产生冻胀力,故其弹性模量和峰值应力都没有出现明显变化。随着冻融循环试验的进行,水分不断迁移,并在低温时产生的冻胀力随温度的循环,交替作用在岩体骨架上。如此反复,岩石的物理力学性质等都遭受了不可逆转的破坏,因此岩体冻融损伤的过程是一个疲劳损伤破坏过程<sup>[9]</sup>。

图6是用BHDM型电子式液体密度计测量水的温度与密度的关系曲线图。由图6可看出由于水的密度是随温度变化的。在冻融循环过程中,降温时水变成冰,体积膨胀,导致岩石内微裂缝扩展;升温时冰化为水,并渗入到裂缝中去,如此反复,使得岩石的微裂缝开展,岩石的冻融过程实质上是水的冻结和融化过程。

促进了化学反应的进行,致使岩石内部的结构、裂纹等发生了改变。宏观上表现为岩石试块物理、力学的改变。所以,酸性溶液中的白砂岩峰值应力会比在水浸泡中的峰值应力要小一些。此外,化学溶液浸泡后,岩石内部矿物颗粒的大小和性质也会发生变化,使岩石的内聚力和内摩擦角减小<sup>[10]</sup>,宏观上表现为岩石的峰值应力降低以及变形改变。

必须指出的是,本实验中由于酸性溶液中浓度并不高,与试块反应耗尽后就不再有化学反应(不计与水的化学反应),故酸浸泡组的峰值应力等力学性质只比水浸泡组的略小甚至还要大一些。而实

际酸污染环境中的化学反应要比这持久的多,所以,酸腐蚀对冻融循环影响不大的结论仅适用于本实验,实际工程中还需进行更细致、长久的考虑。

## 4 结 语

通过水浸泡、酸浸泡及不浸泡处理情况下,不同冻融循环次数的不补水冻融循环试验,可以得出以下结论:

(1)酸浸泡和水浸泡后白砂岩冻融循环后峰值应力、纵波波速、相对弹性模量等力学性能都出现下降,且其力学性能的损伤在冻融循环的前期随着冻融循环次数的增加而增加,到了50次之后趋于稳定,不浸泡进行冻融循环后白砂岩的峰值应力、纵波波速、相对弹性模量等都无明显变化;

(2)不同的浸泡处理、不同循环冻融次数下白砂岩试块的应力-应变曲线在未放置垫板的情况下大致可分为压密、弹性、剪切破坏、弹性、应力软化五个阶段,在浸泡过后,试块的应变有所变大;

(3)酸侵蚀能在一定程度上加剧白砂岩的破坏,但引起白砂岩冻融破坏的主要因素为水的冻胀作用,即在干燥的环境下,试块不受冻融循环的破坏作用;

(4)本试验对寒区及酸侵蚀地区岩石工程的建设提供了一定的试验和理论依据。

## 参考文献:

- [1] 杨针娘,曾群柱. 冰川水文学[M]. 重庆:重庆出版社,2001.
- [2] 杨更社,蒲毅彬,马 巍. 寒区冻融环境条件下岩石损伤扩展研究探讨[J]. 实验力学,2002,17(2):220-226.
- [3] Bagde M N, Petros V. Fatigue properties of intact samples subjected to dynamic uniaxial cyclical loading[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2005,42(2):237-250.
- [4] 蒋立浩,陈有亮,刘明亮. 高低温冻融循环条件下花岗岩力学性能试验研究[J]. 岩土力学,2011,32(2):319-323.
- [5] 陈四利,冯夏庭,李邵军. 岩石单轴抗压强度与破裂特征的化学腐蚀效应[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(4):547-551.
- [6] 王 朋,陈有亮,周雪莲,等. 水中快速冷却对花岗岩高温残余力学性能的影响[J]. 水资源与水工程学报,2013,24(3):54-57+63.
- [7] 李兆霞. 损伤力学及其应用[M]. 北京:科学出版社,2002.
- [8] 徐光苗,刘泉声. 岩石冻融破坏机理分析及冻融力学试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(17):3076-3082.
- [9] 张慧梅,杨更社. 冻融荷载耦合作用下岩石损伤力学特性[J]. 工程力学,2011,28(5):161-165.
- [10] 丁梧秀,冯夏庭. 灰岩细观结构的化学损伤效应及化学损伤定量研究方法探讨[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(8):1283-1288.

(上接第126页)

## 参考文献:

- [1] 刘皓国. 叶尔羌河冰川阻塞性洪水发生的气象因素[J]. 新疆气象,2005,28(2):13-15.
- [2] 孙本国,毛炜峰,冯燕茹,等. 叶尔羌河流域气温、降水及径流变化特征分析[J]. 干旱区研究,2006,23(2):203-209.
- [3] 中瑞叶尔羌河项目组. 中瑞叶尔羌河冰川湖洪水监测预警项目实施方案[R]. 喀什:项目实施报告,2012.
- [4] 张祥松,李念杰,由希尧,等. 新疆叶尔羌河冰川湖突发洪水研究[J]. 中国科学 B 辑,1989(11):1197-1204.
- [5] Hewitt K. The Karakoram anomaly Glacier expansion and the 'elevation effect', Karakoram Himalaya[J]. Mountain Research and Development, 2005, 25(4): 332-340.
- [6] 罗菊花,古力巴尔·麦提. 叶尔羌河流域水文特性分析[J]. 水文,2005,25(3):58-62.
- [7] 孙桂丽,陈亚宁,李卫红,等. 新疆叶尔羌河冰川湖突发洪水对气候变化的响应[J]. 冰川冻土,2010,32(3):580-586.
- [8] 王 迪,刘景时,胡林金,等. 近期喀喇昆仑山叶尔羌河冰川阻塞湖突发洪水及冰川变化监测分析[J]. 冰川冻土,2009,31(5):808-814.
- [9] 沈永平,丁永建,刘时银,等. 近期气温变暖叶尔羌河冰湖溃决洪水增加[J]. 冰川冻土,2004,26(2):234.
- [10] Ch. Haemmig, H. R. Keusen et al. Installation of the observation and alarming station at Kyagar Glacier Lake [R]. Swiss: Report of the field mission, 2012.