

# 宁夏引黄灌区渠道衬砌破坏原因分析与防治措施研究

朱思远, 陆立国, 顾靖超

(宁夏水利科学研究所, 宁夏 银川 750021)

**摘要:** 在多年工程实践及调查研究的基础上, 总结影响渠道防渗衬砌冻胀破坏的主要因素: 渠床土质、冻土深度、地下水埋深、渠道走向、衬砌结构形式及材料对衬砌渠道防冻胀的影响, 提出选择合理断面形式及衬砌结构、应用防渗新材料、换填弱冻胀性土、隔热保温等削减或适应冻胀的措施。

**关键词:** 渠道衬砌; 破坏成因; 防冻胀技术; 宁夏引黄灌区

**中图分类号:** TV5      **文献标识码:** A

## Reason Analysis and Prevention Measurement for Canal Lining Destroying in Ningxia Irrigation Area

ZHU Si yuan, LU Li guo, GU JIN chao

(Ningxia Water Science Research Institute, Yinchuan 750021, China)

**Abstract:** Based on many years engineering practice and research, the paper summarized the main factors affecting heave proof for the canal lining such as: the soil texture, the depth of frozen soil, the groundwater table, the canal trend, the lining structure and the material. The article also proposed the reasonable cross section and lining structure, compound lining of membrane material, filling weak heave soil, insulating and preserving heat and so on.

**Key words:** channel lining; anti frostbite swelling technology; Ningxia irrigation area

宁夏引黄灌区是全国古老的大型灌区之一, 具有两千多年的渠道灌溉历史。目前灌区共有支斗渠 17 026 条, 长 14 671 km。现已累计砌护支斗渠 5 456.37 km, 使支、斗渠节水效益显著。但由于宁夏地处季节冻土区, 气候寒冷, 因冻胀使衬砌工程均有不同程度的破坏, 特别是地下水位较高的地区, 冻胀破坏尤为严重, 致使工程效益不能充分发挥, 维修费用也大为增加, 且水资源大量浪费。通过全面调查分析全区灌区支渠现有不同衬砌形式的破坏现状、冻胀破坏机理和破坏原因, 提出防治的措施和建议。

### 1 渠道衬砌破坏的特点

通过对灌区支斗渠衬砌工程进行破坏现状调查及其破坏的相关因素调查。按照调查内容分项观测记录, 其中断面结构形式采用卷尺测量记录, 结构发生破坏的程度按照目测的类别记录, 结构发生破坏的因素, 通过咨询当地技术人员, 做好记录<sup>[1]</sup>。

#### 1.1 破坏程度分类

渠道冻胀破坏类型的划分等级目前国内尚无统一的标准。根据实际情况, 将宁夏灌区支斗渠的破坏大体划分为裂缝、位

移、断裂、隆起架空、滑塌、整体上抬六种类型<sup>[2]</sup>。

(1) 裂缝。表现有两种形式, 一是混凝土板与板之间的砂浆勾缝或细石混凝土填缝处产生裂缝, 混凝土板之间没有完全失去连接作用, 仍保持着较低的连接强度; 二是受冻结力和冻胀力, 以及混凝土板自身收缩产生的拉应力等影响, 使混凝土板产生裂缝。常见的有纵向裂缝和横向裂缝。

(2) 位移。表现为渠道上沿向渠内发生移动, 一般较严重的位移距离为 1~5 cm, 较轻的位移距离为 < 1 cm。发生位移的渠道多为两拼或三拼的 U 形渠道。由于冻胀使基土膨胀, 引起弧形板上沿向渠内倾斜, 极易造成混凝土板断裂。

(3) 断裂。混凝土板发生裂缝后随着冻胀加剧逐步呈现出断裂状, 常见沿渠道纵向、横向及斜向 45° 夹角断裂。

(4) 隆起架空。表现为在渠道某衬砌部位, 混凝土板被基土抬高, 具有明显的垂直位移。与裂缝和断裂的区别是混凝土板已完全失去连接作用。在地下水位较高的渠段, 渠床基土距地下水近, 含水量大, 冻胀量大, 而渠顶冻胀量小, 造成混凝土衬砌板大幅度隆起、架空。这种现象一般出现在坡脚或冰面以上 0.5 m 坡长处和渠底中部, 有时也顺坡向上形成数个台阶状。

收稿日期: 2010-12-18

作者简介: 朱思远(1981-), 男, 助理工程师, 硕士, 主要从事农业水土工程的相关研究工作。E-mail: zhuisiyuan2004@yanoo.com.cn.

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(5) 滑塌。表现为渠坡某部位, 衬砌的混凝土板在隆起达到脱离下部支撑体(即悬空)后而滑向下部, 常见于渠坡位置。混凝土板的滑塌一般表现为两种形式: ①由于冻胀隆起、架空, 使得坡脚支撑受到破坏, 衬砌板垫层失去稳定平衡, 当基土融化时, 上部板块顺坡向下滑移、错位, 互相穿插, 迭叠。②渠坡基土融化期的大面积滑塌, 渠坡滑塌, 导致坡脚混凝土板被推开, 上部衬砌板塌落下滑。

(6) 整体上抬。断面较小的渠道(渠深小于 1.0 m), 基土的冻胀不均匀性较小, 尤其是在弱冻胀区和衬砌整体性较好时, 如小型混凝土 U 形渠槽可能发生整体上抬。整体上抬的渠道, 融化期也可能由于不均匀沉陷和不能恢复原位, 导致混凝土板裂缝, 在逐年反复冻融循环的作用下, 使渠道逐渐破坏。

## 1.2 破坏特征分析

(1) 梯形衬砌断面渠道冻害特征: 因预制板较小、砌缝多、勾缝砂浆与混凝土弹性模量不同及施工中难以完全控制的质量问题, 在冬季负温作用下, 渠基土的不均匀冻胀, 以及由砌缝中渗入水结冰后体积的增大, 使防渗层膨胀、开裂、预制板架空、错位、互相穿插、迭叠成为台阶, 完全丧失防渗功能。

(2) U 形防渗衬砌抗冻胀特征: 渠基土冻胀变形比较均匀, 渠底具有一定的反拱作用、可以抵抗一定的冻胀压力, 其冻害程度较轻。

(3) 弧形渠底切线边坡防渗衬砌抗冻胀特征: 较好地改变了梯形断面渠基土冻胀变形的不均匀性、在同样条件下冻害较轻、裂缝数少、缝宽较小。

## 2 破坏成因分析

### 2.1 冻胀破坏原理分析

该地区衬砌发生破坏的形式有裂缝、隆起、位移、断裂、滑塌, 原理为在低温作用下, 在混凝土衬砌板下部, 基土(土壤)中水分冻结后, 体积增大, 土体受到膨胀上涨。但是, 在土体冻结过程中, 在混凝土衬砌板下部, 土层通过其中的水分冻结成冰产生的胶结力, 将土颗粒与其上部的混凝土衬砌板紧密地胶结在一起, 这种胶结力称为土与混凝土板之间的冻结强度<sup>[5]</sup>, 这使得混凝土衬砌板与紧接其下部的冻土层表面紧紧粘接, 因此混凝土衬砌阻止冻土层的膨胀上涨变形, 冻土层冻胀产生的土应力增加到混凝土板极限强度时, 混凝土衬砌便首先发生破坏, 即勾缝发生裂缝, 随后, 冻土层的变形继续增加, 相继发生隆起、断裂、位移、滑塌。

### 2.2 影响冻害破坏的因素

响衬砌渠道冻胀破坏的因素较多, 主要因素包括: 渠床土质、土体密度、气温、地温、冻土深度、冻胀量、基土水分、地下水位、渠道走向、基土温度、衬砌结构形式及材料等<sup>[2-4]</sup>。

(1) 渠床土质。试验研究证明<sup>[4]</sup>, 土颗粒粒径大于 0.1 mm 的饱和粗颗粒土中, 在冻结过程中是几乎不存在冻胀, 土体冻胀系数为 0.2%, 其冻胀性属极弱冻胀类; 随着粒径减少或土体分散性增大, 水分迁移量愈大, 冻胀性也增强。粒径小于 0.1~0.05 mm 时, 土体冻胀系数一般在 0.5%~2.0%, 其冻胀性属于弱冻胀类; 土颗粒粒径在 0.05~0.002 mm 的土, 冻结期水分迁移非常剧烈, 冻土层中形成厚度不等的冰透镜体, 土体冻胀

系数在 3.0% 以上, 其土冻胀性属强冻胀类。

当地下水位相同时, 土壤的冻胀量随土颗粒大小而异, 颗粒越粗, 冻胀量越小, 颗粒越细, 冻胀量越大。根据国内的相关试验结论, 按土的冻胀性强弱依次排列为: 粉质土、亚砂土> 亚黏土、重壤土> 轻壤土> 砂壤土> 砂砾土(< 0.05 mm 粒径的含量超过 12%)> 粗砂> 砂砾石。当粒径从 0.05~0.002 mm 的颗粒含量大于 60% 时, 最具冻胀危险。

在调查中, 对渠道所在区域土壤土质取样并进行了颗粒分析, 并以支斗渠所属的干渠渠系将土壤进行了划分, 见表 1。

表 1 灌区渠系土壤质地统计表

渠系名称	%					
	砂土比例	砂壤土比例	轻壤土比例	中壤土比例	重壤土比例	黏土比例
惠农渠系	1.55	6.62	48.56	40.42	1.8	1.06
汉延渠系	0.40	2.98	54.77	39.97	1.67	0.21
唐徕渠系	8.21	7.96	40.81	38.98	3.71	0.34
西干渠系	44.26	32.57	17.42	4.45	1.29	0
汉渠	2.17	4.59	41.62	48.3	2.34	0.98

(2) 冻土深度。宁夏引黄灌区地处西北高寒地区, 从地理位置和气候特征划分, 灌区属季节性冻土地区, 土壤冻结一般产生于当年的 11 月中下旬, 次年的 2 月中旬冻土深度达到最大值。根据水科所多年实测结果: 渠道坡角最大冻深值青铜峡河西灌区为 97.5 cm, 贺兰地区为 95 cm, 平罗、石嘴山地区为 93 cm。4 月下旬冻土基本全部融化, 整个冻结周期平均 170 d 左右。地面冻土深度与渠道冻土深度见表 2。

表 2 引黄灌区平均地面冻土深度与渠道冻土深度对照表 cm

项目	各月平均冻土深度				各月最大冻土深			
	12月	1月	2月	3月	12月	1月	2月	3月
大地冻深值	63	81	100	97	68	86	105	105
渠道阴坡	35	60	81	82	49	82	95	95
渠底	31	48	61	57	40	63	65	63
渠道阳坡	22	35	43	42	27	49	50	45

(3) 地下水位。地下水埋深是影响冻胀性的重要指标。试验结果表明<sup>[2]</sup>, 对土体冻深有影响的地下水埋深范围, 应小于等于土壤毛细管水上升高度与土体冻深之和。不同土壤地下水对冻胀无显著影响的临界深度为: 黏土、重粉质黏土 200 cm, 重壤土、中壤土 150 cm, 轻砂壤土 100 cm, 砂土 50 cm。对于均质土的渠床, 其各部位的冻胀并不完全随着不同部位的冻深发展成比例增长, 各部位冻胀量的大小主要由基土的水分补给条件决定, 当地下水位低于渠底, 冻结期不行水时, 冻胀量由下而上逐渐减小; 当地下水位高于渠底或冬季渠道行水时, 渠底冻胀量较小或不出现冻胀, 最大冻胀量出现在冰(水)面之上一定范围内。

由于地下水温较负气温要高, 并且地下水通过土壤毛细作用, 不断向冻结锋面迁移水分, 从而对冻结进程起到阻滞。当渠床土质愈黏重, 水分迁移愈强烈, 对冻深削减作用也愈大; 但冻深线与地下水位线, 一般保持 20~30 cm, 最小不小于 15 cm, 地下水位埋深 1.5 m 时, 冻深可减少 5%~10%; 地下水位

埋深 1.0 m 时,冻深减少 10%~15%;并随土壤质地变化,土质愈黏时,冻深削减百分数取大值。土壤分层冻胀率随地下水位的减小反映比较敏感,当地下水位在 50 cm 时,土层冻胀率:壤土可达 30%,砂壤土达 6%;地下水位在 30 cm 时,土层冻胀率:壤土达 45%,砂壤土达 14%,中细砂也可达到 4% 左右。

地下水位变化不仅对渠道输水渗漏存在影响,而且对渠道衬砌基土冻胀量影响强烈,是衬砌渠道冻胀破坏的重要原因。渠道附近的地下水位与灌区地下水位同步变化,引黄灌区地下水位的变化随农业灌溉周期而变化。每年 3 月下旬冻土开始

融化,土壤水分下渗,致使地下水位开始上升,4 月下旬末渠道放水,农田开始灌溉,地下水位出现第一个高峰值,埋深在 1.0 m 左右;7 月下旬随着小麦收割后复种灌溉等,致使地下水位出现第二个高峰值,埋深在 0.8 m 左右;10 月下旬冬灌开始,由于灌溉面积大,而且灌溉时间集中,这时地下水位急剧上升,达到全年最大值,埋深 0.5~0.7 m。随冬灌结束,土壤封冻,地下水位迅速下降,第二年的 2 月初地下水位下降至最低值,埋深在 2.3~2.5 m。根据多年地下水位实测资料,灌区主要干渠在不同时期渠底距地下水面的调查统计资料见表 3。

表 3 引黄灌区地下水位距干渠渠底埋深调查表

渠道	惠农渠				唐徕渠				汉延渠			
	非冻结		冻结		非冻结		冻结		非冻结		冻结	
分期	渠长/ km	占总渠 长/%										
地下 水位/m												
≤1	8	6.25	5	3.8	-	-	-	-	-	-	-	-
1~2	12	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
≤1	86	66.2	30	22.6	4	4	-	-	10	13.1	-	-
1~2	15	11.4	76	57	41	39.4	-	-	24	31.6	-	-
2~3	8	6.2	22	16.6	30	28.8	8	7.7	13	17.1	8	10.2
3~4	-	-	-	-	29	27.8	19	18.3	17	22.4	22	28.1
4~5	-	-	-	-	-	-	48	46.1	12	15.8	44	56.6
5~6	-	-	-	-	-	-	29	27.9	-	-	4	5.1

(4) 渠道走向。渠道走向不同,决定了渠道横断面上各部位的冻结和冻胀的不均匀性。试验表明,南北走向的渠道,其两坡冻结规律是由坡面上部逐渐向渠底发展,坡上部冻深最大,渠底冻深最小。东西走向的渠道,则阴阳两坡冻深差别明显,两坡冻深发展很不平衡,渠道阳坡中下部冻深最小,渠道阴坡中上部冻深最大,阴阳坡对应点冻深相差 20~50 cm。东西走向的渠道,由于阳坡日照时间长和强度大,故地温高于阴坡,冻害轻于阴坡。渠顶虽温度低于渠坡中、下部,但一般因其含水量低于中、下部,故渠顶虽冻深大,但冻胀量较小,甚至无冻胀变形,而中、下部则冻胀量大,冻害较渠坡顶部严重。其冻深分布东西走向向渠道阴坡冻深为阳坡的 1.9~2.2 倍,为渠底的 1.3~1.36 倍;北西 150 左右走向渠道,阴坡冻深为阳坡的 1.3~1.5 倍,为渠底的 1.1~1.3 倍。

(5) 衬砌材料及结构形式。不同衬砌结构形式的渠道,其适应、抵御冻胀破坏的能力不同,衬砌结构形式应以适应或削减冻胀为主。国内对渠道衬砌的形式进行了大量的试验研究,研究的结构形式主要有:U 形衬砌、弧形坡脚梯形衬砌、弧形底梯形衬砌、抛物线形衬砌、梯形衬砌等;衬砌的施工方式有现浇、预制安装等;预制板的形状有肋梁板、楔形板、六角板、中部加厚板、空心板、弧形板、槽形板、U 形槽壳、矩形槽壳等;衬砌的材料主要有钢筋混凝土、少筋混凝土、混凝土、沥青混凝土、浆砌石、塑膜、土工布等。

### 3 渠道衬砌破坏防治措施

#### 3.1 渠道防渗新材料的应用

(1) 新型土工复合材料。我国自 60 年代中期开始用塑膜

防渗,经过 30 多年的运用,实践表明,具有防渗效果好、质轻、延伸性强、造价低及抗老化的特点。近年来又开发出用土工织物或其他材料与土工膜结合而成的新型土工复合材料,分一布一膜和两布一膜两种。

(2) 改性 PP 纤维混凝土。改性 PP 纤维混凝土在渠道防渗衬砌中主要是作为复合土工膜的表面护砌使用,用以保护复合土工膜,延长防渗衬砌工程的寿命。根据吉林省水科院试验结果表明,改性 PP 纤维混凝土具有提高渠道防渗衬砌的抗冻胀性能和降低工程造价的特点。改性 PP 纤维的参考掺量一般都是体积比 0.1%,即 0.9 kg/m<sup>3</sup>。

(3) 膨润土防水毯(GCL)。膨润土防水毯(GCL)是一种新型的土工合成材料。既具有土工材料的全部特性,又具有优异的防水(渗)性能,其主要特性如下:具有优异的防水防渗性能,抗渗静水压可达 1.0 MPa 以上,渗透系数 10<sup>-9</sup> cm/s;膨润土是天然无机材料,不会发生老化反应,耐久性好;且环保。施工简便且不受施工环境温度的限制,0℃以下也可施工。施工时只需将 GCL 防水毯平铺在地上,立面或斜面施工时,用钉子和垫圈将其固定,并按要求搭接即可。具有自愈性、容易修补;防水层发生较大意外破损,只需对破损的部位加以简单的修补即可。性能价格比高,用途非常广泛。

(4) 土工格室。土工格室是我国近几年引进的国外技术生产的一种新型土工合成材料,是以聚烯烃为基材,加入特殊添加剂,经高强度焊接而成的三维蜂窝状结构,质轻、耐磨、强度高、耐老化。土工格室是将混凝土板结构以土工格室为框架,其内现浇混凝土,土工格室的作用是将混凝土板有机地分割成块,相互连锁,形成柔性结构,具有优异的抗冻胀变形能力,能

防止在高强度冻胀区产生鼓起搭架、滑脱等现象。

(5) 聚苯乙烯保温板。聚苯乙烯硬质泡沫板是一种优质的隔热保温材料。具有自重轻、导热系数低、吸水性小、耐老化和运输施工方便等特点。近年来在各地广泛应用,如内蒙古河套灌区节水改造工程和宁夏引黄灌区工程,保温防冻胀效果好,宁夏水利科学研究所为此进行了专门的试验研究<sup>[4]</sup>。

(6) 玻璃钢渠道。玻璃钢防渗渠道以玻璃钢为原料,在定型模具上压制而成,断面形状为U形,每块渠板长4~6 m,在玻璃钢板的外侧再胶结5条玻璃钢加强筋,以增强渠板的刚度。玻璃钢是一种复合材料,由189号不饱和聚酯树脂、103号胶衣树脂、玻璃纤维布、翠绿糊、甲乙酮、耐酸钴按一定的比例合成,具有强度大、耐腐蚀、不易老化、不渗漏等特点,用玻璃钢为原料开发出的玻璃钢渠道使用寿命长、轻便耐用、防渗效果明显,有着较好的推广前景。

### 3.2 渠道衬砌工程措施

(1) 合理选择渠线。为避免渠线通过黏重土质及地下水位很高的地区,在条件许可时应采取填方断面。应符合:  $h > H$ , 即,  $h$  为渠底与地下水位之间的距离,  $H$  为渠底以下冻深值+临界深度。在干渠挖方渠段,灌溉停止,冻结期来临,有地下水侧向补给给渠基土壤或向渠道内排水时,在渠道堤岸外侧布置排水暗管,截断地下水对渠基土壤的补充,在局部洼地,预留排水出路,降低地下水位,可极大的降低基土土壤水分,减少冻胀,防止衬砌渠道的流土塌落滑坡。

(2) 回避法。主要有渠线选择法、埋入法、置槽法、架空渠槽法<sup>[6,7]</sup>。

(3) 结构法。渠道防渗抗冻胀衬砌结构形式研究已进行了多年,先后提出了弧形断面衬砌,底弧直线边坡梯形断面衬砌,U形断面衬砌,矩形槽壳、U形槽壳等形式。衬砌混凝土板有肋梁板、楔形板、中部加厚板、空心板、槽形板等。

(4) 膜料复合衬砌结构。国内对各类材料的防渗防冻胀衬砌形式的大量试验结果表明:无论是采用混凝土衬砌还是采用浆砌石,均应与膜料复合全断面衬砌,可极大地减少渠道水渗漏对基土的补给,从而达到减少或防治冻胀的目的。宁夏水利科所试验观测结果表明,在混凝土板下加铺塑料薄膜后,基土含水量可从25%~28%下降为15%~18%,地下水位由0.3~0.5 m降到1.3~1.5 m。膜料防渗渠道的渗漏强度仅为混凝土衬砌渠道的1/15,冻胀量比未铺膜料的渠道减少33%~56%。在膜料下再加一层40 cm厚的砂砾石,则冻胀量削减量可达70%以上。

(5) 换填弱冻胀性土。渠道防渗的实践证明,风积沙、粗砂、砂砾换基是一种适用于防治各种等级冻胀的有效措施。大量的试验结果表明,当冻胀率限制在2%(不冻胀)时,渠道断面各部位在不同水土条件下,所需换填深度见表4。新疆、内蒙的试验结果表明,渠道基土换填风积沙时,可极大的降低渠道冻胀量,当全断面换填厚度达到0.4~0.85 m时,渠道的最大冻胀量小于7 mm;全断面换填5 cm时,最大冻胀量达到9.2 cm。推荐的风积沙换填厚度为:渠底换填厚度0.5 h,边坡背阴面最大换填厚度0.7 h,边坡向阳面最大换填厚度0.6 h,坡顶背阴面最小换填厚度0.15 h,坡顶向阳面最小换填厚度0.1 h,  $h$  为自

然冻深。宁夏引黄灌区渠道砂砾层换填的厚度一般为边坡30~60 cm。

表4 砂砾垫层换填深度表

土质	地下水埋深/m	换填深度	
		边坡上部/cm	边坡下部及渠底/cm
黏土	> 冻深+ 2.5	50~ 70	70~ 80
重、中壤土	> 冻深+ 1.8	50~ 70	70~ 80
轻壤土、砂壤土	> 冻深+ 1.0	40~ 50	40~ 50
黏土、重、中壤土	小于上述最小值	60~ 80	80~ 100
轻壤土、砂壤土	小于上述最小值	50~ 60	60~ 80

(6) 保温措施。采用隔热材料或特殊衬砌结构对基土进行保温以消除或减少冻深是渠道防渗防冻胀衬砌中的一项有效的措施。国内对此开展了大量的试验工作,先后对珍珠岩、膨胀蛭石、岩棉、聚苯乙烯保温板等保温效果进行了试验,实验结果表明,聚苯乙烯泡沫塑料保温效果最好。

宁夏水利科学研究所2002~2005年在汉渠上展开的防冻胀试验,设计了不同厚度、不同密度的聚苯乙烯保温板对比试验,试验资料表明<sup>[2~4]</sup>:铺设3~4 cm厚的聚苯乙烯保温板,其每厘米板厚保温效果为1.86℃;在气温急降情况下,4 cm厚保温板保温效果达14.5℃,3 cm保温效果为12.95℃。目前在宁夏引黄灌区续建配套与节水改造干渠工程实践中,聚苯乙烯保温板已大面积推广应用。

(7) 隔水、排水措施。隔水措施主要有铺设隔水材料,如塑料膜料、土工布等,减少渠道渗漏对基土的补充;排水措施主要有渠底埋设排水暗管、渠坡砂砾石反滤层内埋设排水暗管、渠堤外侧埋设排水暗管等措施。埋设排水措施,对降低渠基土壤含水量效果显著。

对于地下水埋深较大的填方渠道或渠堤无侧向排水补给的挖方渠道,可采用隔水措施,提高防渗、防冻效率,多采用混凝土板下铺设塑膜、土工布,并结合聚苯乙烯保温板、砂砾石垫层,进行防冻胀衬砌。同时沿渠道纵向,在渠道底部或边坡砂砾石虑层中埋设暗管,在局部洼地将暗管内的集水排出渠堤,降低渠床基土的含水量。

#### 参考文献:

- [1] 王 堂,陆立国.宁夏支渠结构现状及衬砌破坏成因调查分析[J].中国农村水利水电,2007,(8):34-38.
- [2] 刘学军,陆立国.宁夏引黄灌区渠道防渗衬砌技术研究[J].西北水资源与水工程,2003,14(4):17-20.
- [3] 刘学军,张煜明.宁夏灌区渠道防渗衬砌工程防冻胀技术与应用[J].水资源与水工程学报,2009,20(9):98-102.
- [4] 陆立国,周 玲,王 堂.宁夏渠道衬砌防冻胀试验研究[J].中国农村水利水电,2008,(9):102-107.
- [5] 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,1985:28-31.
- [6] 防渗技术编辑部.渠库防渗论文集[M]//西安:三秦出版社,1994:93-169.
- [7] 杨 天.节水灌溉技术手册[M].北京:中国大地出版社,2002:1845-1952.