

聚氨酯保温板在内蒙古临河南边渠 试验场中的应用研究

张 栋¹,银英姿¹,杨宏志²

(1.内蒙古科技大学建筑与土木工程学院,内蒙古 包头 014010;
2.内蒙古自治区水利科学研究院,内蒙古 呼和浩特 010020)

摘 要:在我国北方的季节性冻土地区,冻害是防渗衬砌渠道面临的难题之一,其中冻胀破坏最为严重,分布比较广泛且对输水工程的危害程度较大,因此研究渠道冻胀的破坏机理和防治措施是亟待解决的重要工程技术问题。本试验通过在内蒙古临河地区南边分干渠做聚氨酯保温板的防冻胀试验,分析各种保温板厚度下各层基土的地温、冻深、含水率和冻胀量等影响冻胀变化因素的规律及其特征,总结出了该地区素混凝土衬砌渠道中聚氨酯保温材料的防冻胀破坏方案。结果显示:采用聚氨酯保温板防冻胀技术可以有效地减少冻胀作用对渠道刚性衬砌材料的破坏,确保衬砌的稳定,渠道安全地运行,同时也为后续刚性衬砌渠道中聚氨酯保温材料厚度施工设计提供了技术支持。

关键词: 聚氨酯保温板;内蒙古临河南边渠;保温试验;应用研究
中图分类号: TV41 **文献标志码:** A

Application research polyurethane thermal insulation plate in the south canal of Lin-he, inner mongolia

ZHANG Dong¹, YIN Ying-zi¹, YANG Hong-zhi²

(1. The School of Architecture and Civil Engineering, Inner Mongolia University
of Science & Technology, Baotou, Inner Mongolia 014010, China;
2. Inner Mongolian Autonomous Region Research Institute on Hydraulic Sciences, Hohhot, Inner Mongolia 010020, China)

Abstract: In China's seasonal frozen soil region, frostheaving, a tough problem encountered by concrete lining canal, is widely distributed and does great harm to water conveyance project. To explore its damage mechanism and control measures is of great importance. Through the site test on polyurethane thermal insulation plate in the south canal of Lin-he, Inner Mongolia, this paper explores the changing rules and features of the ground temperature, frozen depth, moisture content and frost heave amount with treatments of boards of different thickness, with the anti-freeze expansion plan for the concrete lining channel in this region. The results showed that polyurethane thermal insulation plate could effectively reduce the frost heave damage to rigid lining material of canal, ensure the stability of lining and the safety of canal, which will be of value for the selection of thickness of insulation materials in the rigid lining canal.

Keywords: polyurethane thermal insulation plate; the south canal of Lin-he, Inner Mongolia; thermal insulation test; application research

北方季节性冻土地区,冬季冻结时间长,气温寒冷,输水渠道基土容易产生冻胀。冻结期过后,气温回升,基土又消融,在这种冻融循环情况下刚性渠道混凝土衬砌极易产生冻胀破坏。美国、俄罗斯、日本等发达国家采用“抵抗”冻胀的技术措施,用钢筋混凝土取代素混凝土,并采取一些辅助设施,其防渗防冻效果好,但工程造价高,不适合当前我国的国情^[1]。近年来,为解决渠道防渗抗冻胀问题,我国一些科研单位进行了大量的试验研究,取得了许多成果和技术经验:王正中、陈涛等分析了渠道衬砌的主要破坏时段和破坏部位的分布规律及其形成原因^[2-6];王正中、余书超等对渠道衬砌冻胀破坏的力

收稿日期:2015-12-07
基金项目:内蒙古自治区自然科学基金项目(2013MS0717);水利部公益性行业科研专项经费项目(201301094)
作者简介:张 栋(1992—),男,山西忻州人,硕士生,研究方向为岩土工程。E-mail:1404905430@qq.com。
通信作者:银英姿(1968—),女,内蒙古包头人,教授,硕士生导师,研究方向为水工建筑物冻害防治。E-mail:811489571@qq.com。

学模型进行了探讨^[7-9];宁建国等建立含损伤的冻土本构模型^[10];李爽等对渠道冻胀破坏进行了有限元分析^[11-12];吉林省灌区渠道使用开发出的新型土工复合材料,既防渗又防冻^[13-15];黑龙江省香磨山灌区在支渠和斗渠上采用 PP 纤维混凝土衬砌防治了冻害^[13];内蒙古河套灌区在干渠上使用模袋混凝土衬砌、聚苯乙烯保温板等保温措施都取得了良好的效果^[16-17]。

本试验在内蒙古临河地区南边分干渠平面试验场进行,将目前渠道中正在被大力推广的一种新型保温材料—硬质聚氨酯保温板铺设在混凝土衬砌体下面,利用其导热系数低的优点改变和控制基土周围热量的输入和输出,人为影响冻土结构,从而减轻或消除基土的冻深和冻胀,通过做现场冻胀试验,分析试验数据,探求该地区渠道衬砌中聚氨酯保温板的适用条件。

1 试验概况

南边分干渠平面试验场位于内蒙古临河地区双

河镇,该地区属于典型的温带大陆性干旱气候,冬季寒冷而漫长,夏季短促温热,降水量稀少,蒸发强烈,干燥多风,昼夜温差大。表层土主要是粘土,厚度一般为 3~5 m,下部土以粉砂为主,属于强冻性质的土壤。土壤冻结始于每年的 11 月中旬,冻土层厚度 1.0~1.3 m,次年 5 月上旬冻土层全部消融,冻融历时 160 d 左右,试验场土壤性质参数见表 1。

表 1 试验场土壤性质参数

Table 1 Parameters of soil property inthe field test

名称 Name	天然含水率/% Natural water content/%	塑性指数 Plasticity index	液性指数 Liquidity index	状态 State
重粉质壤土 Heavy silt loam	21	8.64	0.17	硬塑 Hard plastic

试验所用聚氨酯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、运输施工方便等特点,聚氨酯保温新材料性质参数^[18]见表 2。

表 2 聚氨酯保温板参数

Table 2 The parameters of polyurethane insulation board

项目 Project	密度 Density /(kg·m ⁻³)	吸水率,浸水 96 h Water absorption, Water immersion 96 h (体积百分数 Volume percent, %)	压缩强度 Compression strength (压缩 Compression 50%) /kPa)	弯曲强度 Flexural strength /kPa	尺寸稳定性 Dimension stability - 40℃ ~ + 70℃/%	导热系数 Thermal conductivity /(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
规范值 Value in the code	≥15	≤6	≥60	≥180	≤4	≤0.041
聚氨酯 Polyurethane	70	1.98	323	196	±1.5	0.013

衬砌渠道采用聚氨酯保温措施,就是利用保温材料导热系数低的性能改变和控制渠道衬砌基土周围热量的输入、输出及转化过程,人为地影响冻土结构,使冻土内部的水热耦合作用在时间上、空间上向不利于冻胀的方向发展、变化。具体表现在:① 提高冻结区的地温;② 推延冻结的进程,减缓冻结速率,削减冻深;③ 减少水分迁移量,降低冻土中的冰含量;④ 削减冻胀量。

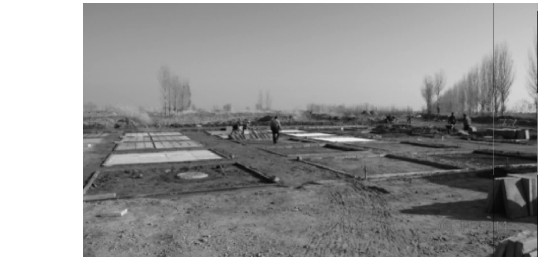


图 1 现场试验平面图
Fig.1 The field test diagram, Lin - he

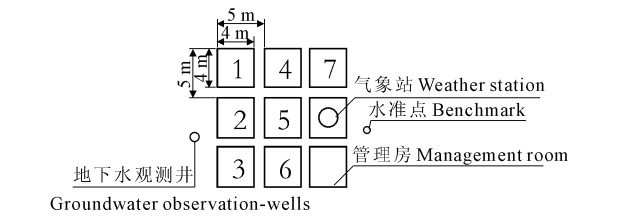


图 2 试验场布置图
Fig.2 The test layout diagram

2 试验方案

2.1 试验设计

由于冻土力学很复杂,土的冻胀是一个多场同时耦合的结果,在软件模拟计算中很多影响因素都不考虑,计算结果很难反映出实际情况。由于各地区气候、土质、地下水位等情况的不同,目前渠道混凝土衬砌防冻胀保温板厚度的确定还没有形成成熟的理论体系,很多地区只是根据各地区大量的冻胀

试验及经验来确定保温板的厚度,其厚度的选定直接关系到工程质量和经济效益,需谨慎对待。

试验目的是为了探求平面冻胀试验场内素混凝土衬砌下各种厚度聚氨酯保温板的保温效果,揭示本地区基土冻结、冻胀规律,为优化渠道衬砌防冻胀设计提供基础依据。

平面冻胀试验场位于内蒙古河套灌区永济灌域南边分干渠二闸管理段附近,试验场面积为 14×14

m^2 ,试验场中共设置 7 种方案,其中 6 种为不同厚度聚氨酯保温板方案,最后一种为无保温处理的对比段,每种方案面积均为 $4 \times 4 \text{ m}^2$,各方案之间间隔 1 m,试验场各方案平面布置如图 2 所示。每种方案上砌筑 6 cm 厚预制混凝土砌块,混凝土砌块下铺设 3 cm 厚 M10 砂浆垫层,各方案中聚氨酯保温板铺设厚度见表 3。

表 3 聚氨酯保温板铺设厚度方案
Table 3 Laying thickness of Polyurethane insulation board in the test

方案 Scheme	1	2	3	4	5	6	7
保温板厚度/cm Insulation plate thickness	2	3	4	5	6	8	0

在试验场内布设 1 组分层冻胀量观测装置,分层冻胀量的埋置深度分别为 0、20、40、60、80、100、120 cm 共 7 层,安装丹尼林冻土器 1 套,自动气象站 1 套。试验中主要观测内容有:基土的分层冻胀量、基土的分层温度场、衬砌冻胀量值、地下水位变化过程、基土含水率等内容。

2.2 施工质量控制

首先按照各方案中聚氨酯保温板的铺设厚度人工进行场地平整及修理,然后埋设各种监测仪器,待全部监测仪器埋设完成后进行不同保温材料以及衬砌材料的铺设。保温材料铺设时注意块与块之间的衔接,不得留有间隙,应紧密,防止因铺设时人为造成的缝隙使冷空气进入。

试验方案在实施过程中要严格按照规范^[19]施工,每一道施工工序都要严格把关,切实做到“安全、标准、认真”的原则。本试验从基土整平、夯实、埋设地温传感器、铺设防水聚乙烯薄膜、铺设聚氨酯保温板到最后砂浆垫层、混凝土衬砌板整个过程中,任何一个环节都要标准化施工。只有在前期施工过程严格控制,后期进入冻胀期后才可以较准确地采集数据,精确地分析结果。

2.3 现场监测

2.3.1 观测时间 试验观测时间为 2014 年 11 月 15 日起至 2015 年 4 月 15 日,历时 5 个月。

2.3.2 监测方法

1) 基土含水率监测。
基土含水率监测分仪器自动化采集网络传输与人工钻孔取样两种形式。采用土壤水分传感器自动化监测,每 30 min 采集数据一次,网络传输数据至接收平台(计算机)中。人工钻孔取样在冻结期分三次进行,分别为在封冻前及达到最大冻深时和冻融

结束后,采用烘干法测定不同深度土质含水量,分析冻结过程中水分迁移情况。

2) 地下水位的监测。
地下水观测井井管材料为 PVC 管材,口径 110 mm,井深 4 m。井口高出保护房地面 0.3 m,井管滤水管长度 2 m,在冻深 1.5 m 范围内设有护套管防止井管冻拔。采用自计水位计自动采集水位变化。

3) 基土地温(冻结深度)监测。
地温监测采用 18B20 温度传感器,观测精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。温度采集深度保温措施分 5 层,分别为表层、保温板上(9 cm 处)、保温板下(19 cm 处)、30 cm 和 50 cm 处;对比段分 7 层,为表层、板下(9 cm 处)、19 cm、30 cm、50 cm、75 cm 和 100 cm 处。通过自动化采集系统及 GPRS 网络完成地温数据的监测、传输、储存,数据采集时间间隔为 30 分钟,采集系统放在保护房内。

4) 基土冻融变形量监测。
不同保温板厚度试验总冻胀量以及基土分层冻胀量用水准仪监测,埋设冻胀量基准桩,基准桩为 4 分铁管,外套为 6 分 PVC 塑料管,内外管间充填黄油。总冻胀量和分层冻胀量每 5 天监测 1 次,分层冻胀量的埋置深度分别为 0、20、40、60、80、100、120、150 cm。

3 成果分析

3.1 地下水位的分析

图 3 为试验场地下水埋深变化过程线,由图得出:试验场封冻前地下水在 0.3 m 左右,到 1 月 25 日地下水埋深达到最大 1.6 m,之后地下水位又回升,在冻结过程中,试验场地下水位降幅 1.3 m。

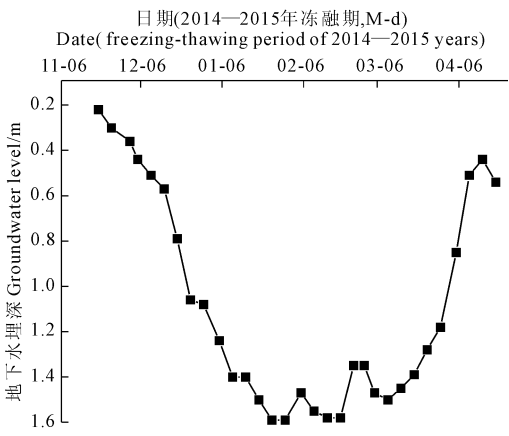


图 3 试验场地下水位变化过程线

Fig.3 Change of the underground water level at the proving ground

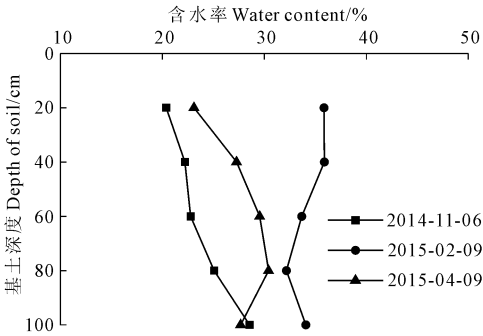


图 4 试验场对比段含水率分布

Fig.4 Moisture content distribution at non-thermal insulation at the proving ground

3.2 含水率分析

一般情况下,强冻胀性土质在冻结过程中都会有水分重分布的现象,主要表现在下层土中的水分向上层冻结锋面迁移,形成冰夹层或冰透镜体,使土体体积增大,宏观上表现出土体表面发生冻胀。在相同的冻结环境下,土体的性质和地下水位决定了冻结过程中水分迁移量的多少,也决定了土体冻胀量的大小。图 4 为无保温措施的对比段各层基土在封冻前及达到最大冻深时和冻融结束后的含水率分布,图中试验场对比段表层 40 cm 基土范围内在冻结期前后水分重分布的现象非常明显,水分迁移量约达到 15%。

采用聚氨酯保温板后,板下基土温度环境发生变化,温度梯度变小,使基土中水分向冻结锋面迁移能力减弱,冻结锋面推进变缓,在时空上造成不利于水分迁移的条件,从而减缓了基土的冻胀变化。图 5 为 8 cm 厚聚氨酯保温板下各层基土冻结前后含水率分布图。

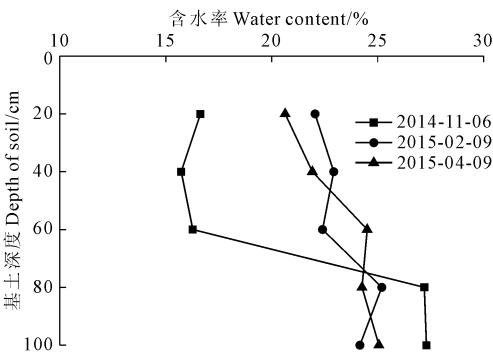


图 5 试验场 8 cm 聚氨酯保温下含水率分布

Fig.5 Moisture content distribution at 8 cm thick polyurethane board at the proving ground

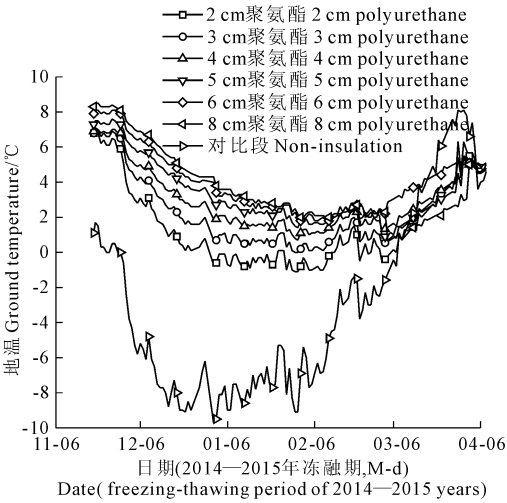


图 6 试验场各方案保温下地温过程线

Fig.6 Change line of ground temperature at the proving ground

3.3 地温分析

图 6 为试验场各方案保温下地温变化过程线,从图中看出:在冻结期,地温随着时间推移呈下降趋势,在 2 月中旬地温开始回升,此时在对比段 70 cm 处地温降到 0℃以下,最大冻深值达到 71.5 cm,3 月上旬开始消融,表层地温迅速升高,对比段 30 cm 范围内地温受气温波动影响较为敏感,地温升降变化比较明显。在整个冻结期内对比段保温下地温变化非常明显,其余各种保温措施下地温变化却缓慢,而且随着保温板厚度的增加,基土温度越来越高。在整个冻结期内,2 cm 聚氨酯保温下最低地温为 -1.1℃,3 cm 聚氨酯保温下最低地温为 0℃,其余厚度的聚氨酯保温板下没有出现负温。

3.4 冻胀量分析

图 7 为对比段表层冻胀量变化过程线,图 8 为各保温措施下表层冻胀量变化过程线。在整个冻结

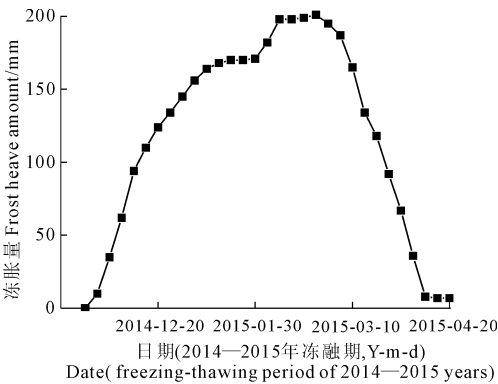


图 7 试验场对比段冻胀量变化过程线

Fig.7 Change of frost heave amount at non-thermal insulation at the proving ground

期内,无保温措施的对比段冻胀量变化很明显,最大达到 20.1 cm,随着保温板厚度的增加,冻胀量越来越小。当保温板厚度达到 6 cm 时,最大冻胀量仅为 0.2 cm。与对比段相比,2、3、4、5、6、8 cm 厚保温板方案产生冻胀的时间分别推迟了 7、15、20、30、45、65

d,冻胀削减率均达到 96% 以上,保温效果良好。表 4 为各方案下冻胀量特征值。

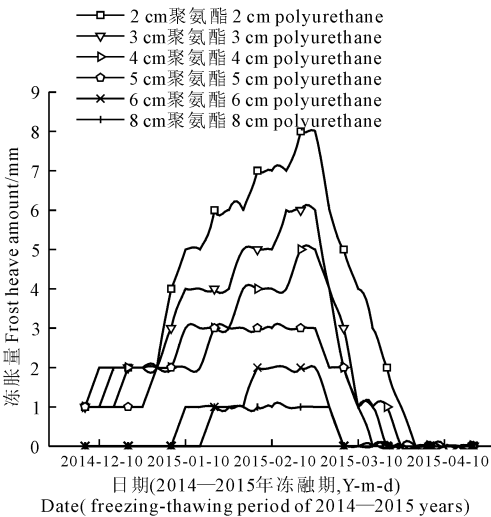


图 8 试验场保温方案冻胀量变化过程线

Fig.8 Change of the frost heave amount at therm at the proving groundal insulation

表 4 各方案下冻胀量特征值

Table 4 Characteristic values of the frost heave amount at each scheme

方案(板厚) Scheme(plate thickness)	对比段 Non-insulation	2 cm	3 cm	4 cm	5 cm	6 cm	8 cm
冻胀量 Frost heave quantity/mm	201	8	6	5	3	2	1
冻深值 Frozen depth/mm	715	195	189	170	166	172	165
冻胀率 Frozen-heave factor/%	28.1	4.1	3.2	2.9	1.8	1.2	0.6

3.5 冻深分析

图 9 为试验场对比段冻深变化过程线,图 10 为各保温措施下冻深变化过程线。从 2014 年 11 月中旬地表开始封冻,到 2015 年 2 月上旬达到最大冻深,对比段最大冻深为 71.5 cm,2 cm 聚氨酯保温板下最大冻深为 19.5 cm,3 月上旬开始消融,至 5 月

上旬融通。两图冻深线对比,在冻结期使用聚氨酯保温板后对冻结锋面的推进明显起到了抑制作用,起始冻结时间推迟,冻结速率也减小;在消融阶段,由于保温板的保温隔热作用,阻碍了基土与大气之间的热交换,消融速度也减缓。各方案冻深特征值见表 4。

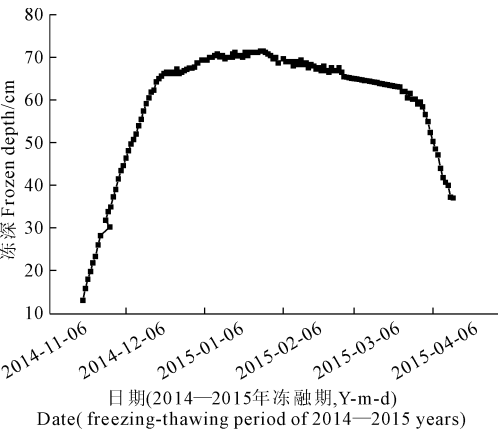


图 9 试验场对比段冻深变化过程线

Fig.9 Change of frost line at non-thermal insulation

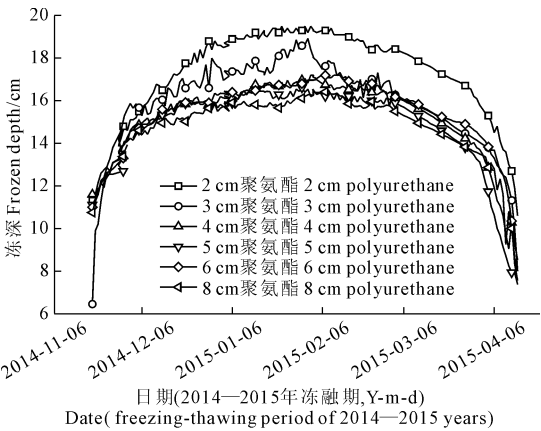


图 10 试验场保温方案冻深变化过程线

Fig.10 Change of frost line at thermal insulation

4 结 论

1) 通过内蒙古临河地区南边渠平面试验场试验,在混凝土衬砌板下铺设 2、3、4、5、6、8 cm 厚的聚氨酯保温板,最大法向冻胀量分别削减 96.02%、97.01%、97.51%、98.51%、99%、99.5%,冻深分别削减 72.73%、73.57%、76.22%、76.78%、75.94%、76.92%,冻胀量都在规范允许的范围之内,说明采用此规格的聚氨酯保温板可以明显削减冻胀量、冻深、提高基土地温、抑制基土中水分迁移,此方法技术可行,经济合理,施工方便,可在水利工程中进一步推广应用。

2) 在实际渠道中考虑到日照及遮阴程度、地下水等因素需要进行修正,该地区最大冻深为 71.5 cm 时,参照抗冻胀设计规范^[19]取值,冻深修正系数取 1.12,设计冻深平均值为 80 cm,保温板厚度(设计冻深 1/15~1/10)取 6~8 cm,即可防止本地区衬砌板的冻胀破坏。

3) 使用该种规格的聚氨酯保温板,平均 1 cm 厚聚氨酯板削减冻深 12 cm,削减冻胀量 5 cm。根据前人的研究成果及工程技术经验,在实际渠道保温施工中聚氨酯保温板的厚度不宜太薄,一般不小于 3 cm。

4) 本试验研究对实际工程应用提供参考,在现场施工时要注意保温板之间的衔接,不得留有间隙,同时在保温板上下面各铺设一层防水的聚乙烯薄膜,防止保温板受潮或吸水影响其保温性能,同时也可以防渗和防止冷空气的进入。

参 考 文 献:

[1] 曹政权,齐广平,李 涛,等.灌溉渠道防渗措施应用现状分析

[J].甘肃农业大学学报,2006,(4):116-120.

[2] 王正中.梯形渠道砼衬砌冻胀破坏的力学模型研究[J].农业工程学报,2004,24(3):24-29.

[3] 石 娇,王正中,张丰丽,等.高地下水位弧底梯形混凝土衬砌渠道冻胀断裂破坏力学模型及应用[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2015,43(1):213-219.

[4] 孙杲辰,王正中,王文杰,等.梯形渠道砼衬砌体冻胀破坏断裂力学模型及应用[J].农业工程学报,2013,29(8):108-114.

[5] 陈 涛.砼衬砌渠道冻胀破坏力学模型及应用[D].杨凌:西北农林科技大学,2004.

[6] 王正中,李甲林,陈 涛,等.弧底梯形渠道砼衬砌冻胀破坏的力学模型研究[J].农业工程学报,2008,24(1):18-23.

[7] 宋 玲,欧阳辉,余书超.混凝土防渗渠道冬季输水运行中冻胀与抗冻胀力验算[J].农业工程学报,2015,31(18):114-120.

[8] 张 茹,王正中.季节性冻土地区衬砌渠道冻胀防治技术研究进展[J].干旱地区农业研究,2007,25(3):236-240.

[9] 李甲林,王正中.渠道衬砌冻胀破坏力学模型及防冻胀结构[M].北京:中国水利水电出版社,2013.

[10] 宁建国,朱志武.含损伤的冻土本构模型及耦合问题数值分析[J].力学学报,2007,39(1):70-76.

[11] 李 爽,王正中,高兰兰.考虑混凝土衬砌板与冻土接触非线性性的渠道冻胀数值模拟[J].水利学报,2014,45(4):497-503.

[12] 王文杰,王正中,李 爽,等.季节冻土区衬砌渠道换填措施防冻胀数值模拟[J].干旱地区农业研究,2013,31(6):83-89.

[13] 廖 云,刘建军,陈少峰.混凝土渠道冻胀破坏机制与抗冻胀技术研究进展[J].岩土力学,2008,29:211-214.

[14] 宋清林,何武全,李 根,等.混凝土衬砌渠道保温防冻胀技术研究[J].灌溉排水学报,2015,34(4):43-48.

[15] 程玉辉,周贺达.聚氨酯保温板在哈达山输水干渠中的应用研究[J].东北水利水电,2010,(12):6-9.

[16] 程满金,申利刚,步丰湖,等.聚苯乙烯保温板在衬砌渠道防冻胀中的应用研究[J].灌溉排水学报,2011,30(5):22-27.

[17] 程满金,申利刚.大型灌区节水改造工程技术试验与实践[M].北京:中国水利水电出版社,2003.

[18] 中华人民共和国水利部.渠道防渗工程技术规范:GB/T 50600—2010[S].北京:中国水利水电出版社,2010.

[19] 中华人民共和国水利部.渠系工程抗冻胀设计规范:SL 23—2006[S].北京:中国水利水电出版社,2006.

(上接第 126 页)

[17] 文卿琳,阿曼古丽·肉孜.盐胁迫对海岛棉种子萌发的影响[J].中国种业,2008,(1):39-41.

[18] 赵 旭,王林权,周春菊,等.盐胁迫对不同基因型冬小麦发芽和出苗的影响[J].干旱地区农业研究,2005,23(4):108-112.

[19] 张 娟,姜闯道,平吉成.盐胁迫对植物光合作用影响的研究进展[J].农业科学研究,2008,(3):74-80.

[20] 王东明,贾 媛,崔继哲.盐胁迫对植物的影响及植物盐适应性研究进展[J].中国农学通报,2009,25(4):124-128.

[21] 王美娥,陈 明,郎有忠,等.盐分胁迫对小麦光合生产及产量的影响[J].江苏农业学报,2013,(4):727-733.

[22] 杨淑萍,危常州,梁永超.盐胁迫对不同基因型海岛棉光合作用及荧光特性的影响[J].中国农业科学,2010,(8):1585-1593.

[23] 赵玉蓉,王维中.植物在盐害下的渗透调节[J].徐州师范学院学报(自然科学版),1995,13(4):59-62.

[24] 张海燕,赵可夫.盐分和水分胁迫对盐地碱蓬幼苗渗透调节效应的研究[J].植物学报,1998,40(1):56-61.

[25] 杨 帆,丁 菲,杜天真.土壤盐胁迫对构树幼苗生理特性的影响[J].江西农业大学学报,2008,(4):684-688.

[26] 张子学,王正鹏,凌中鑫,等.不同棉花品种 NaCl 胁迫的生理表现及其耐盐性筛选指标分析[J].中国棉花,2004,(8):8-10.

[27] 马洪波,曹月阳,陈 杰,等.土壤盐胁迫对小麦养分和渗透调节物质的影响[J].江苏农业学报,2012,(6):1300-1305.

[28] 马 丽,侯振安,梁永超,等.NaCl 胁迫对棉花幼苗生理特性的影响[J].石河子大学学报(自然科学版),2008,(2):180-184.

[29] 王秀玲,程 序,谢光辉,等.NaCl 胁迫对甜高粱发芽期生理生化特性的影响[J].生态环境学报,2010,(10):2285-2290.

[30] 韩 冰,徐 刚,郭世荣,等.不同浓度盐胁迫对黄瓜幼苗生长和生理代谢的影响[J].江苏农业学报,2014,(1):172-177.