

# 灌溉水温对冻融土入渗规律的影响

邢述彦

(太原理工大学建筑与环境工程学院)

**摘 要:** 在冬春灌溉期间, 由于灌溉水源、灌溉方式、灌溉时间不同, 当水流入农田时, 将具有不同的水温。灌溉水温不同, 在相同的灌溉水量条件下, 其热容量不同, 导致土壤温度分布不同, 必将影响到冻土的入渗规律。该文通过土壤冻结期间积水入渗试验, 获得了不同入渗水温条件下冻土的入渗规律。试验结果表明, 入渗水温对冻土入渗规律的影响十分明显, 冻土的入渗能力随入渗水温的升高而增强。研究结果对于季节性冻土区冬春灌溉合理灌水技术参数的确定提供依据。

**关键词:** 入渗水温; 季节性冻土; 累积入渗量; 地温

**中图分类号:** S15217<sup>+</sup> 12

**文献标识码:** A

**文章编号:** 100226819(2002)0220041204

在我国北方大部分地区, 地表及地表以下一定深度范围内的土壤在冬春季节经历周期性的冻结和消融过程, 农田的冬灌和春灌是在冻融土条件下进行的。因此, 深入研究冻融土壤的入渗规律以及影响冻融土入渗能力的因素, 对于指导农业灌溉具有重要意义。关于地下水埋深、冻土厚度、土壤含水率对冻土入渗的影响规律已作了较深入的研究, 但入渗水温的影响尚未见报道。土壤中水分运动和温度分布是相互联系的, 土壤温度的变化会引起土壤水的物理化学性质的变化, 从而引起土壤水分运动参数及其基质势的变化, 由温度差形成的温度势梯度本身也会造成水分的流动。冻融条件下, 土壤中的水分分为液态和固态两部分, 当温度的变化足以使土壤中水分发生相变时, 将对土壤的入渗特性产生影响。本文通过大田土壤自然冻结条件下, 不同入渗水温的入渗试验, 分析其土壤入渗特性, 为季节性冻土区冬春灌溉技术参数的确定提供依据。

## 1 试验条件

### 1.1 试验区气候和土壤

试验在山西省平遥县西北部农田进行, 试验区气候属温带大陆性半干旱季风气候, 全年太阳总辐射  $544128 \times 10^3 \sim 565122 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ ; 年平均气温  $10.12 \sim 10.14$  , 极端最高气温  $39.11$  , 极端最低气温  $-21.14$  ; 试验区土壤 11 月中旬开始冻结, 次年 3 月解冻, 最大冻土深度  $77 \text{ cm}$ , 无霜期  $171 \text{ d}$ 。

试验区位于山西省汾河中游冲积平原区, 地势平坦, 地下水埋深为  $1 \sim 3 \text{ m}$ , 土壤耕作层深度  $15 \sim 22 \text{ cm}$ , 有明显的犁底层。  $0 \sim 20 \text{ cm}$  为壤土,  $20 \sim 34 \text{ cm}$  为壤质砂土,  $34 \sim 54 \text{ cm}$  为砂质壤土,  $54 \sim 100 \text{ cm}$  为壤质砂土。

试验是在同一块农田(高粱茬地), 两种冻结状态下进行的, 其土壤物理参数见表 1。

表 1 两种冻结状态下的土壤物理参数

Table 1 Soil physical parameters of two kinds of frozen depth

冻结深度 $\bar{z}/\text{cm}$	土壤深度 $\bar{z}/\text{cm}$					
	6~ 10	17~ 20	0~ 2	10	20	30
	容重 $\bar{\rho}_g/\text{cm}^{-3}$			含水率 $\bar{\theta}/\%$		
4	11187	11417	11106	11106	9176	15103
40	11225	11447	4135	18126	19122	18125

### 1.2 试验仪器和设备

入渗试验采用自制的双环入渗仪, 内环内径  $26 \text{ cm}$ , 高  $25 \text{ cm}$ , 在地表封冻前预埋于试验地块, 下环深度  $20 \text{ cm}$  (到达犁底层)。

地温采用热敏电阻测定, 亦于地表封冻前预埋入试验田土壤剖面。电阻值用数字万用表测取。

入渗内环供水用量筒计量进行, 并用特制的水位控制装置控制内环水位。

### 1.3 试验方法

大田土壤的入渗过程一般在  $90 \text{ min}$  达到相对稳定, 达到相对稳定后, 土壤的入渗速度主要取决于土壤的稳定入渗率, 故选  $90 \text{ min}$  作为试验周期, 并以  $90 \text{ min}$  的累积入渗量作为反映入渗周期土壤入渗能力的指标。

在入渗试验的同时, 每隔  $10 \text{ min}$  用数字万用表记录一次预先埋入土壤剖面中各层位的热敏电阻

收稿日期: 2001202215 修订日期: 2001211210  
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59879014)  
作者简介: 邢述彦, 副教授, 太原市迎泽西大街 79 号 太原理工大学水利系, 030024

值, 据此换算出入渗过程中各层位的地温。

入渗水温分别为 3、5 和 10, 是入渗内环的水温值。

对比试验的土壤质地、结构、处理方法、含水率等完全相同, 即在试验开始之前, 土壤具有相同的物理参数。

## 2 试验结果及分析

### 2.1.1 入渗水温对冻融土入渗能力的影响

图 1a 为土壤冻结深度 4 cm, 3 种水温下的土壤 90 min 累积入渗曲线, 当水温为 3、5 和 10 时, 土壤 90 min 累积入渗量分别为 512、615 和 712 cm。由此可见, 水温较高时, 冻融土壤的入渗能力会大大提高, 图 1b 为土壤冻结深度为 40 cm, 两种水温下的土壤累积入渗曲线, 当水温为 3 和 7 时, 土壤 90 min 累积入渗量分别为 317 cm、417 cm。

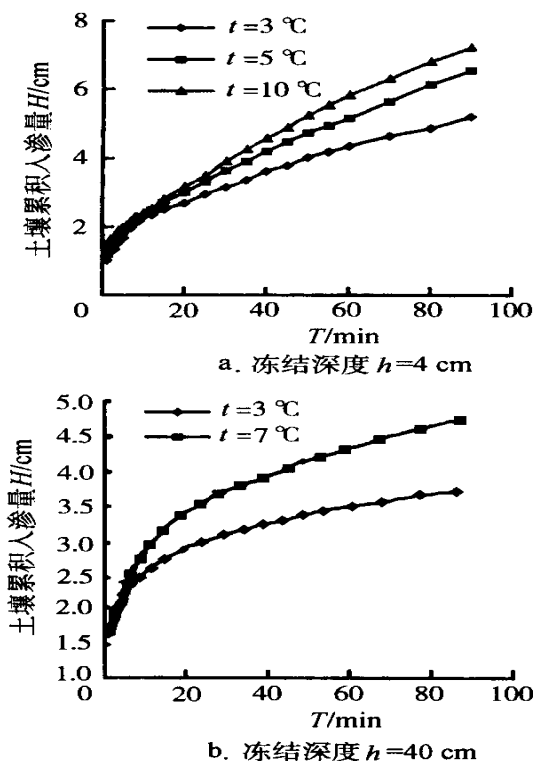


图 1 不同水温条件下土壤累积入渗曲线

Fig. 1 Cumulative infiltration curves with different water temperatures for frozen depth of 4 cm and 40 cm

### 2.1.2 入渗水温对冻融土壤相对稳定入渗率的影响

土壤的相对稳定入渗率反映了土壤入渗周期内入渗能力的强弱。由图 2 可见, 在相同土壤条件下, 相对稳定入渗率随着水温增高而增大, 冻土深度增加时, 相对稳定入渗率随水温增高而增大的速率降低。

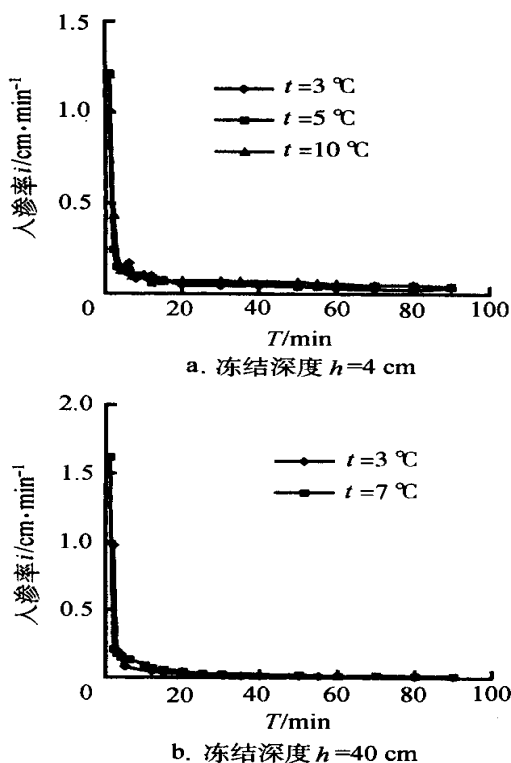


图 2 不同水温条件下土壤入渗率曲线

Fig. 2 Infiltration rate curves with different water temperatures for frozen depth of 4 cm and 40 cm

### 2.1.3 入渗水流使土壤层温度发生明显改变

图 3a 为土壤冻结深度为 4 cm 入渗前土壤剖面温度和水温为 3、5 和 10 时, 入渗结束后土壤剖面的温度。由图可知, 入渗水流引起地温变化是十分显著的, 尤以地表下 10 cm 深度范围内的变化更为突出, 对应于 3 种水温其地温变化量为: 5 cm 深处, 分别为 1121、2126、7190, 即由原来的 -0118 增加了 1139、2144 和 8108。10 cm 深处地温由 -0115 增加到 0134、0168 和 4134, 分别增高了 0149、0183 和 4149。入渗水温越高, 所引起地温变化就越大, 而随着地层深度增加, 地温变化量减少, 在地表下 25 cm 处, 地温没有变化。图 3b 为冻结深度为 40 cm 时入渗试验前后土壤剖面温度变化的情况。

### 2.1.4 水温影响分析

冻土入渗能力明显小于相同条件下非冻结土壤的入渗能力, 其特性受地下水位埋深、耕作条件、含水率、冻层厚度的影响。在相同的地下水位埋深、耕作条件、含水率、冻层厚度条件下, 当灌溉水温不同时, 冻土的入渗能力有明显的差异, 其根本原因是入渗水流改变了土壤中的温度分布, 进而从以下几方面对土壤水分运动产生影响。

1) 地温的变化引起土壤水物理化学性质的变化

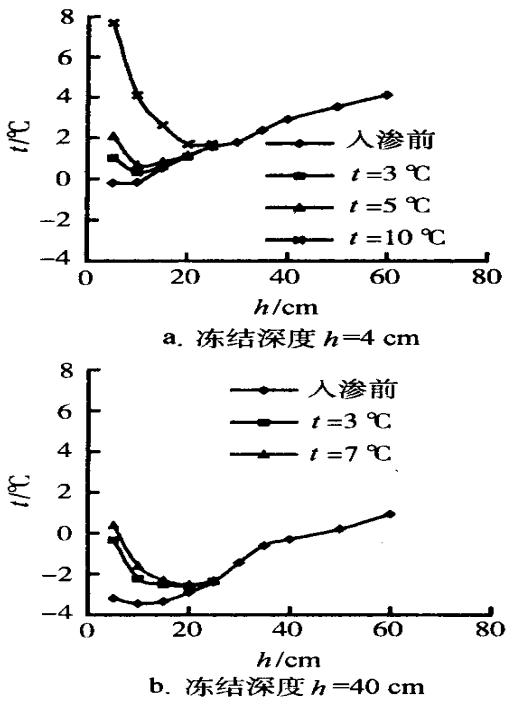


图 3 土壤剖面温度变化曲线

Fig 3 Changes of soil temperature with different water temperatures for frozen depth of 4 cm and 40 cm

温度升高时, 水的粘滞性降低, 表面张力降低, 基质势相应地升高, 导水率增大, 入渗量增大。

2) 由温度差形成的温度梯度造成水分的流动

根据达西定律, 单位时间内通过单位面积土壤的水量  $q = -K(W) \nabla W$  其中土水势 ( $W$  包括重力势、压力势、基质势和温度势, 通常土壤温度变化不大时, 无须专门考虑温度势  $W$  的影响, 温差直接引起的水分运动很小。受灌溉水温的影响, 在土壤中形成较大的温度梯度, 其影响就不可忽略, 水温高时, 在土壤中形成的温度梯度大, 由其影响的  $q$  也大。

3) 入渗水温使冻土中固态水发生相变

从土壤剖面温度曲线图 3a 可知, 入渗试验前, 表层土壤温度低于冻结温度, 土壤处于冻结状态, 其中土壤水分以固态存在于土壤颗粒之间, 阻塞了土壤的孔隙, 在入渗水流的作用下, 土壤温度升高。当土壤温度高于冻结温度时, 存在于土壤颗粒间的固态水相变为液态水, 冻层融化, 孔隙度增大, 过水断面增加, 入渗能力增强。灌溉水温不同, 冻层融化历时不同, 导致不同的入渗规律。即由于水温不同, 其热容量不同, 同一时刻, 引起的地温变化量不同, 由地温变化导致的土壤水的相变量不同, 因此其入渗规律不同。图 4 给出了土壤 90 min 累积入渗量 ( $H_{90}$ ) 随地表下 5 cm 和 10 cm 处地温的变化规律。

从图中可发现, 地温从负温变化到 +1 时, 对  $H_{90}$  影响较大, 当地温超过 1 后, 对  $H_{90}$  的影响减弱。在试验过程中, 地温随时间呈线性规律变化, 这

说明水温对冻土入渗规律的影响主要体现在入渗初期, 一旦土壤水的相变过程结束, 水温对入渗规律的影响仅通过其对水的粘滞性和温度势的影响来实现, 这两者的作用远小于土壤水相变的作用。

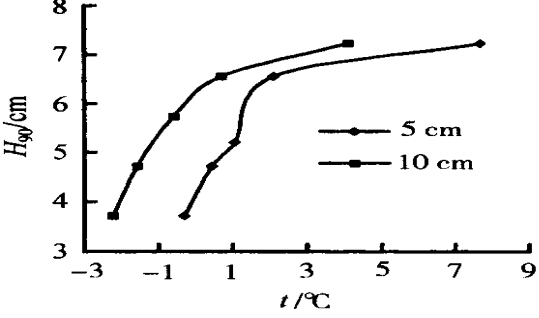


图 4  $H_{90}$  随土壤温度变化曲线

Fig 4 Relationship curves between  $H_{90}$  and soil temperature

2.1.5 不同土壤冻结深度条件下入渗水温的影响

比较图 1a 和 1b 不难发现, 相同的入渗水温对不同的冻结状态其影响程度是不同的。同样的入渗水温变化, 引起的入渗量的变化量不同, 第一种情况下, 水温从 3 提高到 5, 90 min 累积入渗量增加 1133 cm, 第二种情况下水温从 3 增高到 7, 90 min 累积入渗量增加了 1 cm, 可见, 水温对土壤入渗能力影响强度受土壤冻结深度的制约。随着冻结深度的增加由水温引起的土壤入渗量的增加会有所减少。冻土厚度大时, 土壤温度亦较低, 入渗过程中入渗水流作用下, 地温也发生了很大变化, 入渗水温为 3 和 7 时, 5 cm 深处地温由 -3.119 增加到 -0.1311 和 0.1408, 但试验结束时的地温值远小于冻土厚度较小时的值 (见图 3a 和 3b)。因此, 土壤水相变量小, 有效过水断面增加的幅度小, 最终导致相同入渗水温下, 冻土厚度大的  $H_{90}$  比冻土厚度小的  $H_{90}$  小。但  $H_{90}$  随入渗水温增高而增大的这一趋势未变。

3 结 论

- 1) 在季节性冻土分布区, 冬春灌溉期灌溉水温对冻融土的入渗能力有明显影响。
- 2) 土壤入渗能力随入渗水温的升高而增大。
- 3) 冻融土壤的相对稳定入渗率随入渗水温的升高而略有增大。
- 4) 入渗水温对冻融土入渗特性的影响是通过改变土壤中温度分布实现的。土壤的温度决定着土壤水的黏滞性、温度势和土壤水的相变, 其中对入渗能力起主要作用的是土壤水的相变。
- 5) 冻土层厚度不同的情况下, 水温引起的冻土入渗量变化的趋势相同, 但变化量不同, 冻土厚度较

小时, 水温作用下  $H_{90}$  变化大, 冻土厚度较大时,  $H_{90}$  随入渗水温变化量较小。

影响冻土入渗规律的因素很多, 本文仅就两种不同冻结状态下灌溉水温影响问题作了探讨, 不同土质结构、不同地下水位埋深等条件下灌溉水温对冻融土壤入渗规律的影响有待进一步研究。

#### [参 考 文 献]

- [1] 雷志栋等 土壤水动力学[M] 北京: 清华大学出版社, 1988
- [2] 樊贵盛等 大田土壤冻融条件下入渗特性的试验研究[J] 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997, 3(3): 31~ 37
- [3] 樊贵盛等 季节性冻融土壤的冻融特性和减渗特性的研究[J] 土壤学报, 2000, 37(1): 14~ 32
- [4] 郑秀清等 土壤含水率对季节性冻土入渗特性影响的试验研究[J] 农业工程学报, 2000, 11(6): 52~ 55

## Influence of Irrigation Water Temperature on the Infiltration Characteristics of Frozen Soils

Xing Shuyan

(Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract** During winter and spring irrigation, because of the variations in irrigation water source, irrigation manner and irrigation time, the irrigation water will be at different temperatures as it flowed into the farm land. Under the same irrigation rate, the water will have different heat capacity, which results in different soil temperature distribution, and affects the infiltration characteristics of frozen soil. During the freezing period, the infiltration experiments were conducted and the infiltration characteristics of the frozen soil under different water temperatures were obtained. The results show that the infiltration water temperature has strong influence on infiltration into frozen soil, the infiltration capacity enhanced with the water temperature increasing. It would provide basis for determining reasonable irrigation parameters within the winter and spring irrigation in seasonal frozen areas.

**Key words:** infiltration water temperature; seasonal frozen soil; cumulative infiltration capacity; soil temperature