

网络出版时间:2014-03-26 17:09

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.04.001

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.04.001.html

辐射与低温水入渗对土壤水热变化规律的影响

任 杰^{1,2a}, 沈振中^{2a,2b}, 杨 杰¹, 赵 坚^{2b}

(1 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2 河海大学 a 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,

b 水利水电学院, 江苏 南京 210098)

[摘 要] 【目的】研究辐射与低温水入渗条件下土壤水分和温度特性的变化规律,为进一步研究如何改善水库下游河岸带生态环境提供理论基础。【方法】以中细砂为代表性土样,利用自主研制的试验系统装置,设置 3 种辐射温度(无辐射、30 和 40 ℃),分析了在低温水入渗(水温 10 ℃、入渗水头 25 cm)和不同辐射温度作用下土壤内部水分和温度的动态变化特性。【结果】砂土湿润锋的垂直距离和稳定入渗率随辐射温度的升高而增加。辐射热流增加,土壤表层温度升高,温度梯度增大,表面向内部的传热量增加,土壤内部温度升高;辐射温度为 40 ℃时,土壤内部温度梯度大,且整体平均温度较无辐射时要高。有无辐射热流,低温水的入渗均会对土壤内部温度 and 水分分布产生影响,且土壤深层温度降幅较大。有辐射时,土壤表层温度明显高于无辐射。【结论】在低温水入渗条件下,辐射温度的变化对土壤水、热动态均会造成影响,其影响范围和强度因辐射温度的不同而存在差异。

[关键词] 辐射;低温水;入渗;土壤水分;土壤温度

[中图分类号] S152.7

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2014)04-0150-07

Influence of radiation and low-temperature infiltration on soil moisture and temperature variation

REN Jie^{1,2a}, SHEN Zhen-zhong^{2a,2b}, YANG Jie¹, ZHAO Jian^{2b}

(1 Institute of Water Resources and Hydro-Electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

2 a State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, b College of Water

Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: 【Objective】 This study investigated the variation of soil moisture and temperature affected by radiation and infiltration of low-temperature water to support further research on improving downstream ecological environment in the riparian zone. 【Method】 Using fine sand as the representative soil sample, a self-developed test system device was used to analyze the dynamic characteristics of the soil internal temperature and moisture under infiltration of water at low temperature (water temperature 10 ℃, infiltration head 25 cm) and different radiation temperatures (no radiation, 30 and 40 ℃). 【Result】 The vertical distance of sandy soil wetting front and steady infiltration rate increased along with the radiation temperature. As the increase of radiation heat flux, the soil surface temperature and temperature gradient rose, and the surface to the internal heat transfer increased accordingly, leading to increase of soil internal temperature. The internal soil temperature gradient was large when the radiation temperature was 40 ℃, and the overall average temperature was higher than that of no radiation. The infiltration of water at low temperature had impacts on the soil internal temperature and moisture distribution regardless radiation. And the reduced amplitude of temperature in deep soil was large. Soil surface temperature with radiation was significantly

〔收稿日期〕 2013-04-07

〔基金项目〕 国家自然科学基金项目(51309189)

〔作者简介〕 任 杰(1980—),男,河南信阳人,博士,主要从事水工结构和岩土工程研究。E-mail:henanrenjie@163.com

higher than the case without radiation.【Conclusion】 With low water infiltration, variation of radiation temperature had influence on soil moisture and temperature dynamics, and its scope and impact strength varied with radiation temperature.

Key words: radiation; low-temperature water; infiltration; soil moisture; soil temperature

高坝大水库建成运行后,其水库下泄至河道的低温水入渗到两岸,将会形成下部低温水层和上部天然温度表层双向辐射条件下的土壤非等温环境,必然会对水库水质、下游鱼类资源以及两岸地表农作物等带来一些不利的影响^[1]。因此,研究低温水入渗条件下土壤内部水分温度动态的变化特性,对进一步研究改善地下动植物受低温水影响的生存环境条件所可能采取的工程或非工程措施,具有重要的学术价值和实际应用价值。自 20 世纪初,国内外越来越多的学者针对非等温条件下土壤水分温度的变化特性开展了大量的研究,并取得了长足进展^[2-7]。Ji 等^[8]就土壤-植物-大气(SiSPAT)一维模型进行了大田试验验证,并很好地进行了土壤水分和温度动态变化预测分析;胡宏昌等^[9]研究表明,植被覆盖范围的变化会改变土壤的水热运动过程,但多年冻土和季节性冻土之间的响应是不同的;Bittelli 等^[10]通过用试验和模拟的方法对土壤水分温度的动态变化进行了研究。国内一些学者也进行了相关的研究,如杨更社等^[11]通过室内试验认为,温度梯度是水分迁移的主要驱动力,温度梯度越大,水分场越快达到重新分布状态;李毅等^[12]对覆膜开孔条件下不同质地层状土的蒸发特性进行了室内土柱试验研究,认为覆膜开孔率和夹层位置都影响蒸发过程中的水热运移规律;此外,刘伟等^[13]对土柱中温

度和水分的日变化规律进行了试验研究,认为土壤温度随着太阳辐射和大气温度的周期性变化而呈现出周期性变化,随着土层深度的增加,温度变化的滞后效应越发明显;刘德仁等^[14]研究了一种新型综合防冻胀翻浆路基,并探讨了外界环境变化对路基内部温度场和水分场的影响。上述研究虽取得了丰富的成果,但对于辐射与低温水入渗所形成的下部低温水层和上部天然温度表层双向辐射环境下的包气带温度水分分布规律的影响较少涉及。

本研究通过室内低温水入渗试验,对土壤水分和温度动态变化进行探讨,以获得外界环境变化下低温水入渗土壤的水分和温度变化规律,旨在为进一步研究水库低温水入渗下天然土壤的水热运移规律及其对地下生态环境的影响奠定基础。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

试验用土为中细砂土,其中值粒径为 0.68 mm,不均匀系数为 0.5。经风干、去除杂物,过孔径 2 mm 筛,混合均匀后,按设定干体积质量 1.56 g/cm³ 分层均匀装入试验砂槽。在填砂土过程中,每填入 9 cm 厚度的砂就进行压实,并且在砂层之间进行刨毛。用筛分法分别测定砂土的颗粒级配,结果见表 1。

表 1 试验砂土的颗粒级配

Table 1 Particle size distribution of the test media

指标 Index	粒径/mm Particle size range						%
	1~2	0.5~1	0.25~0.5	0.1~0.25	0.075~0.1	<0.075	
砂土级配 Sand distribution	0.82	13.21	62.08	22.51	0	1.38	

1.2 测试装置

自主研制的试验装置由高精度恒温水循环系统、多功能人工气候控制箱、水位升降控制台、日光辐射源模拟控制系统、三维渗流流量-压力-温度-水分模拟信号自动采集仪、温度和水分传感器以及二维土槽模型和加厚海绵等组成(图 1)。

高精度恒温水循环系统为试验装置的核心,主要作用是获取满足试验要求的恒温水,内胆采用优质不锈钢保温材料制成,并采用优质全封闭压缩机制冷系统,具有过热、过载自动保护的功能,并采用

数显显示,方便直观了解工作状态。可容纳 300 L、5~80 ℃恒温水,并由高精度仪表自动控制,保证液体温度波动误差达到±0.05 ℃,系统也适用-15~5 ℃液体介质(如酒精、硅油等)。

多功能人工气候控制箱为试验装置的主体部分,主要作用是构造一个满足试验要求的、可调节的人工环境,该试验箱可控的温度为 5~50 ℃,控温误差为±1 ℃;湿度为 50%~95%,控湿误差为 5%,通过外部的电子装置可以控制室内温度和湿度。

水位升降控制台为试验装置的主要辅助部分,

主要作用是提供一个满足试验要求的、可调节恒定的水头,供稳定渗透试验用。该升降台由容量 30 L

水箱、电机、15 和 30 L 2 种浮子流量计以及支架等 4 部分所构成,可调节水头为 0~4 m。

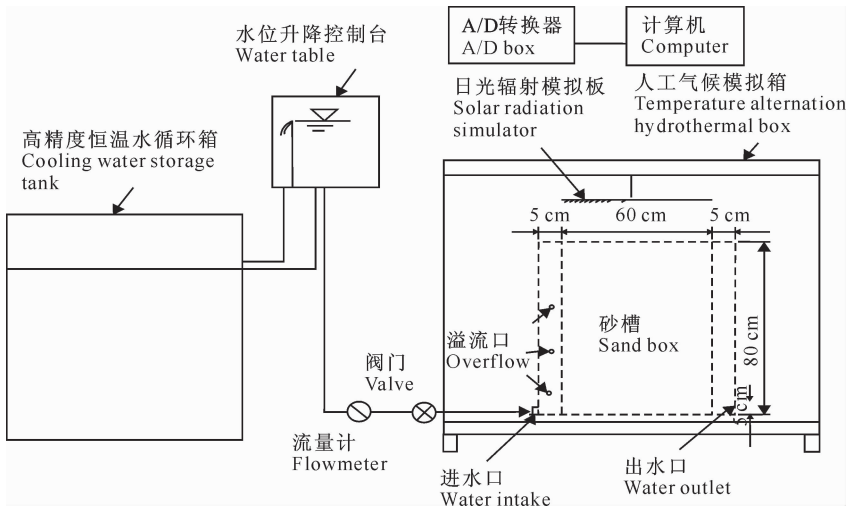


图 1 试验装置构造示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental device

日光辐射源模拟控制系统由温度控制箱、加热板和温度传感器 3 部分组成,主要作用是土壤表层提供所需的温度。温度控制箱可调节加热板的辐射温度,并通过温度传感器传输实际温度到控制箱,进行实时调节控制,可形成多种不同辐射温度的蒸发环境,以调节控制箱及箱内地表温度。

三维渗流流量-压力-温度-水分模拟信号自动采集仪主要由流量传感器、压力传感器、温度传感器、水分传感器、高性能 A/D、D/A 数据采集板等组成,主要作用是实时采集分析所需的渗透流量、压力、温度和水分等各种试验数据。试验过程中,操作者可以选用控制方式和试验参数进行干预,并由计算机

自动记录和保存数据,供进一步分析调用。

1.3 试验方法

试验采用有机玻璃制成的二维砂槽,长 70 cm、宽 20 cm、高 80 cm。砂槽左右两端用有机玻璃挡板对称隔成宽 5 cm 的水槽,并在有机玻璃挡板上对称钻有直径 5 mm 左右的透水孔,间距为 1 cm。上游水槽边壁沿垂直方向分别设有高 10、30 和 50 cm 的溢流口,保证稳定的上游入渗水头,并在右侧水槽垂直方向设有高 5 cm 的出水口(图 1)。本试验砂土槽前壁埋设了 4 排共 12 个水分传感器,在后壁均匀埋设了 6 排共 30 个温度传感器,传感器通过采集仪与电脑相连,实时采集数据。传感器布置如图 2 所示。

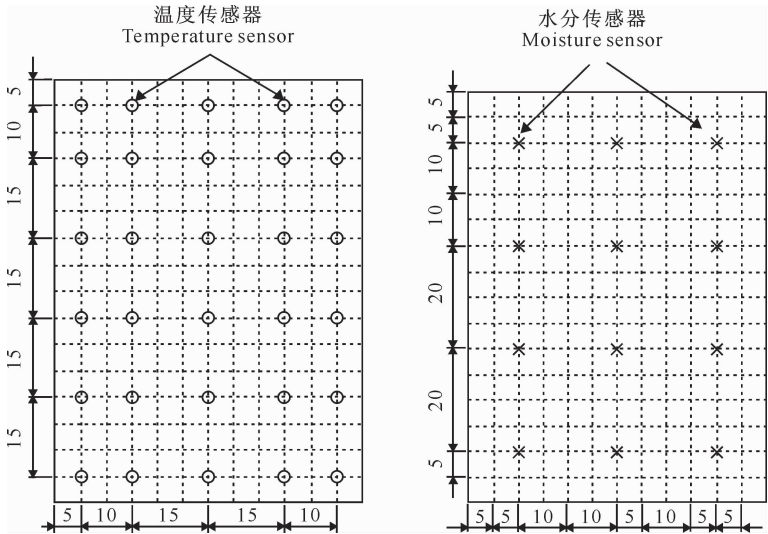


图 2 温度和水分传感器布置示意图(单位:cm)

Fig. 2 Location of temperature and moisture sensors (Unit:cm)

试验装置连好后,在砂槽中装入供试中细砂土,土层厚 80 cm,宽 60 cm;在下文中,用垂直距离表示土层深度,80 cm 为表层,0 cm 为最底层;用水平距离表示土层宽度。

本研究选用入渗水温为 10 ℃,入渗水头为 25 cm,辐射温度为无辐射、30 和 40 ℃ 共 3 组试验,以了解不同辐射温度下低温水入渗对土壤内部水分温度分布特性的影响。砂土的初始温度保持在 20 ℃。根据试验方案,在试验开始之前,通过高精度恒温水循环系统制备试验所需的低温水水温,再通过水位升降控制台调节供水强度的大小,并使其稳定。当水温稳定后,同时打开秒表和进水口阀门,开始入渗试验,观测湿润锋、溢流口处流量和下游出水口处流量。前 10 min 每隔 1 min 要刻画一次湿润锋,10 min 之后根据湿润锋的间距变化再进行刻画,观测时间要本着先密后疏的原则,直至湿润锋难以刻画时,表明试验达到稳态,试验结束。

2 结果与分析

2.1 不同辐射温度下湿润锋随时间的变化

图 3 为入渗水温 10 ℃,入渗水头 25 cm,辐射

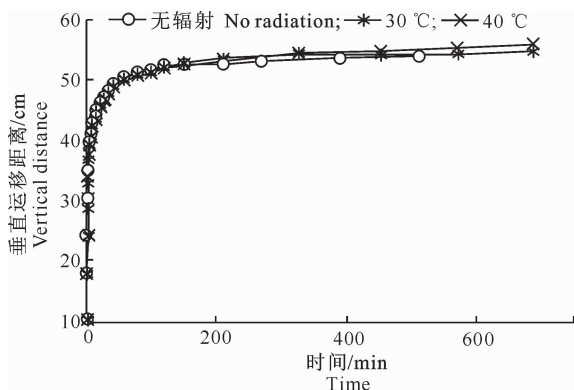


图 3 不同辐射温度下湿润锋垂直运移距离随时间的变化

Fig. 3 Variations of vertical distance of wetting front with time at different radiation temperatures

分析不同辐射温度下入渗率 $i(t)$ 与时间 t 的关系可知,入渗率 $i(t)$ 与时间 t 呈现较好的幂函数关系。因此,本试验采用 Kostiakov 三参数模型^[15]来拟合不同辐射温度下入渗率 $i(t)$ 与时间 t 的关系,可以得到拟合参数 α 、 β 和 i_c (表 2)。由表 2 可以看出,不同辐射温度下拟合方程的决定系数均大于 0.94,相关系数较好。稳定入渗率值随着辐射温度的增加而增大。将拟合参数 α 、 β 、 i_c 代入 Kostiakov 三参数模型,由此可得,不同辐射温度下入渗率 $i(t)$ 与入渗时间 t 的关系表达式分别为:

温度分别为无辐射、30 和 40 ℃ 时,湿润锋垂直运移距离随时间的变化结果。由图 3 可知,对于同一质地的土壤,3 种辐射温度下湿润锋垂直运移距离变化曲线类似。随着入渗时间的延长,湿润锋垂直运移距离逐渐增加;在低温水入渗前 150 min,辐射温度增加对湿润锋垂直运移距离的影响不明显,曲线几乎重叠;之后,湿润锋垂直运移距离随着辐射温度的升高而增加。由图 3 还可以看出,在低温水入渗初期(0~200 min),湿润锋垂直运移距离增加较快,后期增加减缓。引起该入渗特征的可能原因为:入渗初期,由于水分受到土壤基质吸力的影响,且土壤的基质势大于重力势,水分向上运动;随着入渗时间的延长,土壤水分逐渐饱和,土壤水分的重力势逐渐增加,并逐渐等于土壤的基质势,导致湿润锋的垂直运移距离增加幅度变慢。

2.2 低温水入渗率随时间的变化

图 4 为不同辐射温度下入渗率实测值随时间的变化曲线。从图 4 可以看出,在 3 种辐射温度影响下,低温水在土壤中的入渗率开始时较大,随着时间延长迅速递减,50 min 左右保持基本恒定。

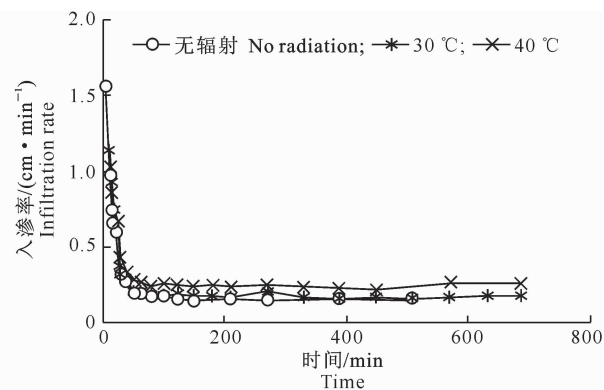


图 4 不同辐射温度下低温水入渗率随时间的变化

Fig. 4 Variations of infiltration rate of low-temperature water along with time at different radiation temperatures

$$\text{无辐射: } i(t) = 5.677t^{-0.810} + 0.057; \quad (1)$$

$$\text{辐射温度} = 30 \text{ } ^\circ\text{C}: i(t) = 20.72t^{-1.284} + 0.147; \quad (2)$$

$$\text{辐射温度} = 40 \text{ } ^\circ\text{C}: i(t) = 10.45t^{-1.062} + 0.2. \quad (3)$$

用辐射温度为 30 ℃ 的入渗率实测值对公式(2)进行验证,可得出入渗率 $i(t)$ 随时间 t 的变化过程,其不同时间入渗率预测值与实测值之间的平均相对误差小于 5%。由此说明,对于无辐射、辐射温度为 30 和 40 ℃ 3 种条件下,用 Kostiakov 三参数模型能较好

地描述不同辐射温度下入渗率随时间的变化特性。

表 2 不同辐射温度下低温水入渗率 $i(t)$ 与时间 t 关系的拟合参数

Table 2 Fitting parameters for infiltration rate of low-temperature water $i(t)$ and time t at different radiation temperatures				
辐射温度/℃ Radiation temperature	$i(t)=at^{-\beta}+i_c$			
	α	β	i_c	R^2
无辐射 No radiation	5.677	0.810	0.057	0.969
30	20.720	1.284	0.147	0.947
40	10.450	1.062	0.200	0.940

2.3 不同辐射温度下土壤温度场和水分场的分布

图 5 和图 6 分别为在环境温度 20 ℃,入渗水头 25 cm,入渗水温 10 ℃,无辐射、30 和 40 ℃条件下,砂槽内土体达到相对稳态后的温度场和水分场分布

图。由图 5 和图 6 可知,土壤温度变化呈明显的阶梯式,土壤平均温度随着土壤深度增加而递减,表层土壤平均温度最高;此外,辐射温度 40 ℃时土壤温度梯度最大,并且整体温度都较无辐射和辐射温度为 30 ℃时要高;土壤水分变化也呈明显的阶梯式,土壤体积分含水率随深度增加而增大,表层土壤体积分含水率最小。分析表明,当辐射温度升高时,土表温度增高,与下层土壤的温差加大,使上层土壤产生由上而下的热量传递,而下层土壤受到入渗低温水的影响温度降低,从而形成下部低温水层和上部辐射温度双向辐射条件下的非等温环境。此外,地表无辐射的情况相当于地面被植被覆盖,低温水的入渗使土体内部的温度发生变化,但不受模拟辐射的影响。

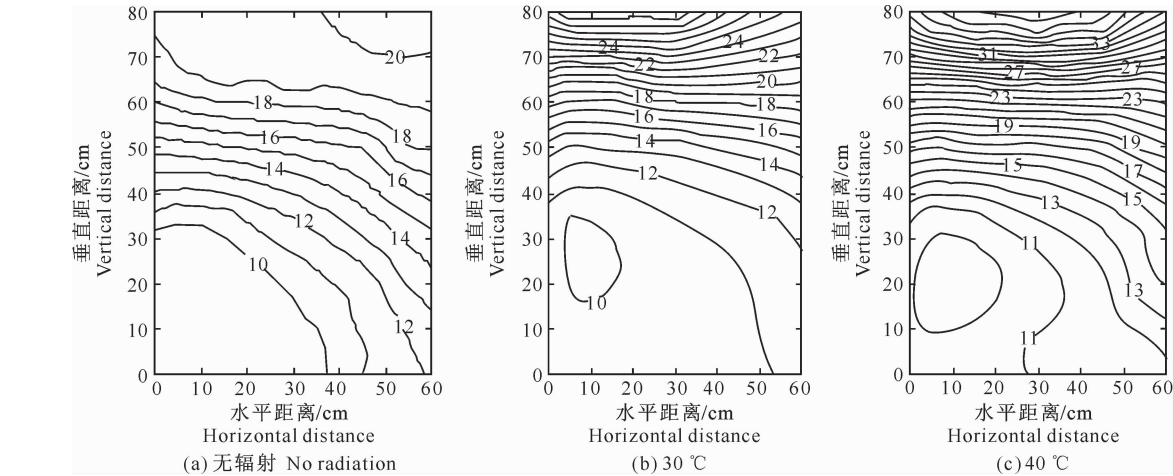


图 5 不同辐射温度下土壤温度场的变化(曲线上数据单位:℃)

Fig. 5 Variations of temperature field distribution at different radiation temperatures (Unit: ℃)

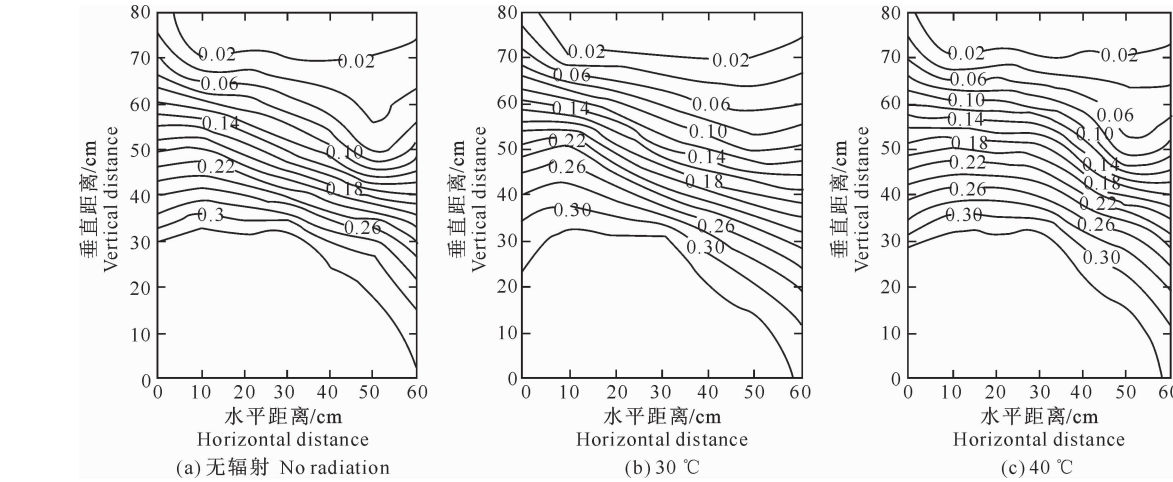


图 6 不同辐射温度下土壤水分场的变化(曲线上的数据单位:cm³/cm³)

Fig. 6 Variations of moisture field distribution at different radiation temperatures (Unit:cm³/cm³)

无辐射和辐射温度为 40 ℃时,土体纵剖面(水平距离 30 cm)经历不同时间后温度和水分布结

果见图 7 和图 8。由图 7 可知,有无辐射热流,低温水的入渗均会对土体内部温度产生影响,尤其在底

层一段以降低为主,土层越深、降幅越大、降低越快。有辐射时的表层土壤温度明显高于无辐射时;无辐射时受到低温水入渗的影响,土体表层 15 cm 以下将受到低温水影响,辐射温度 40 ℃ 时土体表层 20

cm 以下将受到低温水影响。由图 8 可知,有无辐射热流,低温水的入渗均会对土体内部水分产生影响,湿润体覆盖于土体表层 10 cm 以下。

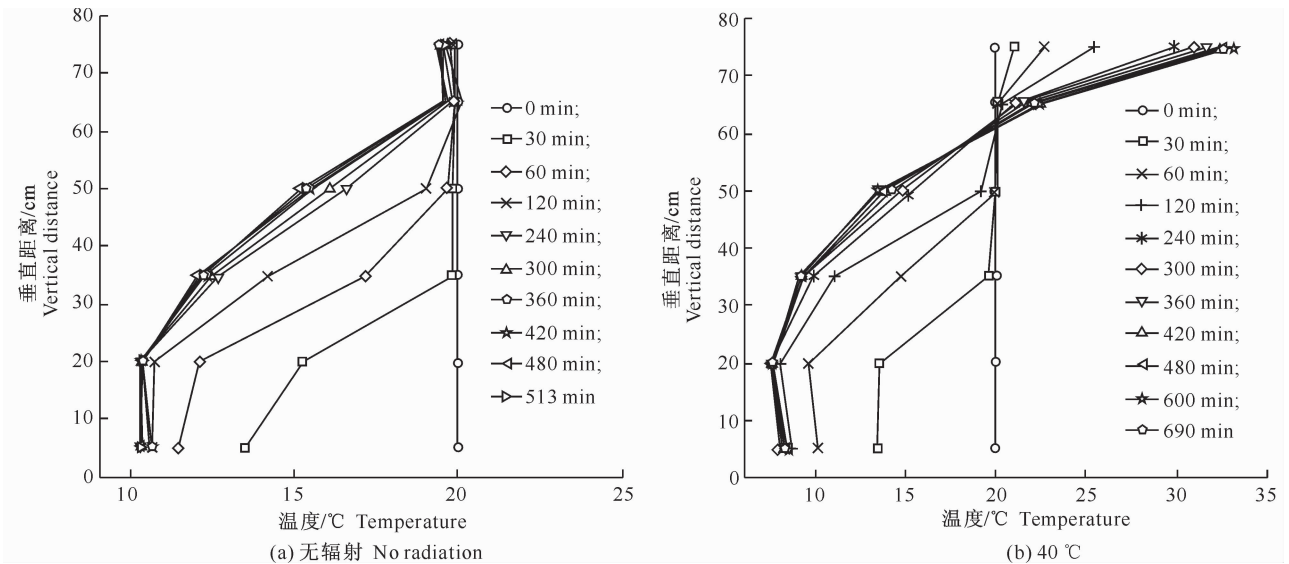


图 7 不同辐射温度下土体纵剖面(水平距离 30 cm)经历不同时间后的温度分布
Fig. 7 Temperature distribution at the abscissas (horizontal distance 30 cm) after different times at different radiation temperatures

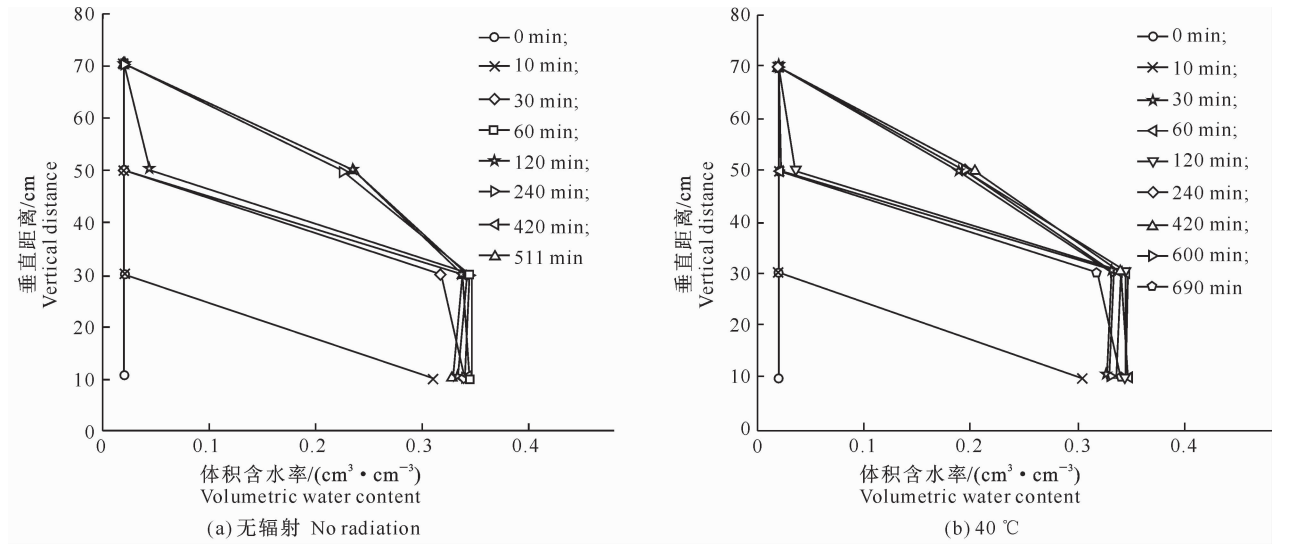


图 8 不同辐射温度下土体纵剖面(水平距离 30 cm)经历不同时间后的水分分布
Fig. 8 Moisture distribution at the abscissas (horizontal distance 30 cm) after different times at different radiation temperatures

3 结 论

1)湿润锋垂直运移距离随着入渗时间的延长而逐渐增大;在低温水入渗前 150 min,辐射温度增加对湿润锋垂直运移距离的影响不明显,曲线几乎重叠,之后湿润锋垂直运移距离随着辐射温度的升高而增加;入渗后期(200~700 min),湿润锋的垂直势

运移距离增加幅度变慢,表明土壤的基质势与重力势达到平衡。

2)初渗阶段,入渗率较大,随着入渗时间的延长,入渗率迅速下降,并于 50 min 左右达到基本稳定状态。入渗率与时间的关系曲线呈现较好的幂函数关系,稳定入渗率值随着辐射温度的增加而增大。

3)土壤温度呈明显的阶梯式变化,土壤内部的

平均温度随土层深度增加而递减;辐射温度为 40 ℃ 时土壤内部温度梯度大,且整体温度都较无辐射时高;土壤中的水分变化也呈明显的阶梯式,土壤内部的体积含水率随土层深度的增加而增大。

4)有无辐射热流,低温水入渗均会对土体内部温度产生影响,尤其在底层一段土体温度以降低为主,土层越深、降幅越大、降低越快。有辐射时的表层温度明显高于无辐射。有无辐射热流,低温水的入渗均会对土体内部水分产生影响。

志谢:在进行低温水入渗室内试验时,得到河海大学水利水电学院陈孝兵、邓春生、王伟、张鑫、张慧、马小刚的指导和帮助,在此一并表示感谢。

[参考文献]

[1] 柳海涛,孙双科,王晓松,等.大型深水库分层取水水温模型试验研究[J].水力发电学报,2012,31(1):129-134.
Liu H T,Sun S K,Wang X S,et al. Water temperature model test for a multi-level power intake of large deep reservoir [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2012,31(1):129-134. (in Chinese)

[2] 冯宝平,张展羽,张建丰,等.温度对土壤水分运动影响的研究进展[J].水科学进展,2002,13(5):643-648.
Feng B P,Zhang Z Y,Zhang J F,et al. Review of effect of temperature on soil water movement [J]. Advances in Water Science,2002,13(5):643-648. (in Chinese)

[3] 任杰,沈振中,赵坚,等.低温水入渗条件下土壤水分温度动态变化研究[J].水科学进展,2013,24(1):136-142.
Ren J,Shen Z Z,Zhao J,et al. Dynamic variation of soil moisture and temperature under infiltration of low-temperature water [J]. Advances in Water Science,2013,24(1):136-142. (in Chinese)

[4] Flerchinger G N,Caldwell T G,Cho J,et al. Simultaneous heat and water (SHAW) model:Model use,calibration,and validation [J]. Transactions of the Asabe,2012,55(4):1395-1411.

[5] Wang Z L,Fu Q,Jiang Q X,et al. Numerical simulation of water-heat coupled movements in seasonal frozen soil [J]. Mathematical and Computer Modeling,2011(54):970-975.

[6] Li Z Z,Ma L W,Flerchinger G N,et al. Simulation of overwinter soil water and soil temperature with SHAW and RZ-SHAW [J]. Soil Science Society of America Journal,2012,76(5):1548-1563.

[7] 李瑞平,史海滨,赤江刚夫,等.基于水热耦合模型的干旱寒冷地区冻融土壤水热盐运移规律研究[J].水利学报,2009,40(4):403-412.
Li R P,Shi H B,Takeo Akae,et al. Study on water-heat-salt transfer in soil freezing-thawing based on simultaneous heat

and water model [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2009,40(4):403-412. (in Chinese)

[8] Ji X B,Kang E S,Zhao W Z,et al. Simulation of heat and water transfer in a surface irrigated,cropped sandy soil [J]. Agricultural Water Management,2009,96:1010-1020.

[9] 胡宏昌,王根绪,王一博,等.江河源区典型多年冻土和季节冻土区水热过程对植被盖度的响应[J].科学通报,2009,54(2):242-250.
Hu H C,Wang G X,Wang Y B,et al. Response of soil heat-water processes to vegetation cover on the typical permafrost and seasonally frozen soil in the headwaters of the Yangtze and Yellow Rivers [J]. Chinese Science Bulletin,2009,54(2):242-250. (in Chinese)

[10] Bittelli M,Ventura F,Campbell G S,et al. Coupling of heat, water vapor,and liquid water fluxes to compute evaporation in bare soils [J]. Journal of Hydrology,2008,362(3/4):191-205.

[11] 杨更社,周春华,田应国,等.软岩类材料冻融过程水热迁移的实验研究初探[J].岩石力学与工程学报,2006,25(9):1765-1770.
Yang G S,Zhou C H,Tian Y G,et al. Primary experimental study on moisture and heat transfer of soft rock material during its freezing and thawing [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2006,25(9):1765-1770. (in Chinese)

[12] 李毅,任鑫,司炳成.覆膜开孔条件下层状土壤蒸发的水热运移[J].排灌机械工程学报,2012,30(6):738-744.
Li Y,Ren X,Si B C. Water and heat movement in layered soils during evaporation under perforated plastic mulch [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2012,30(6):738-744. (in Chinese)

[13] 刘伟,范爱武,黄晓明.多孔介质传热传质理论与应用[M].北京:科学出版社,2006.
Liu W,Fan A W,Huang X M. The theory and application of heat and mass transfer in porous media [M]. Beijing:Science Press,2006. (in Chinese)

[14] 刘德仁,赖远明,董元宏,等.冻土区块石夹层路基防冻胀翻浆效果试验研究[J].岩土力学,2012,33(3):753-756.
Liu D R,Lai Y M,Dong Y H,et al. Experimental study of anti-frost-heave and frost boil effect of block-stone-interlayer embankment in permafrost regions [J]. Rock and Soil Mechanics,2012,33(3):753-756. (in Chinese)

[15] 李雪转,樊贵盛.非充分供水与充分供水入渗模型参数间关系试验[J].农业机械学报,2010,41(9):44-49.
Li X Z,Fan G S. Experiment on relations of infiltration model parameter in non-sufficient and sufficient water supplies [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(9):44-49. (in Chinese)