

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221826

# 不同热源温度下水蒸气对土壤热湿迁移影响的数值模拟

郭 磊, 晋 华, 张雨露, 陈思青, 郭换芳

(太原理工大学水利科学与工程学院, 山西 太原 030024)

**摘要:** 研究不同热源温度下水蒸气对土壤热湿迁移规律的影响,对土壤储热和地源热泵技术的应用具有重要意义。为此,利用 Hydrus-1D 软件构建一维非饱和土壤水—汽—热耦合迁移数值模型,模拟研究了不同热源温度下砂土在水蒸气影响下的迁移变化规律。结果表明,对土壤热量迁移,考虑到水蒸气迁移可使热源影响半径由 60 cm 增大到 78 cm,提升 30%;对土壤水分迁移,则可使热源影响半径由 78 cm 增大到 100 cm,提升 28.21%。与不考虑水蒸气迁移相比,考虑到水蒸气迁移可减少土壤储热过程中温度的损耗,且其温度损耗减少增幅随热源温度的增大而增大。当热源温度高于 70 °C 时,土壤的温度场和湿度场变化不稳定,且热源附近可能会出现干枯现象。

**关键词:** 水—汽—热耦合迁移;热源温度;水蒸气;Hydrus-1D;数值模拟

**中图分类号:** TK124 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)07-0175-05

## 1 引言

土壤具有较好的热稳定性和储热性能,可提供丰富的可再生能源,是一种绿色经济的储能介质,可用于空调和空间供暖<sup>[1]</sup>。地源热泵系统以土壤作为冷热源,充分利用浅层土壤中的地热能来实现夏季供冷和冬季供暖<sup>[2]</sup>。在我国北方严寒地区,地源热泵系统由于供暖时间大于其制冷时间,导致土壤冷热供取不平衡,从而造成了区域土壤的冷堆积现象<sup>[3]</sup>,严重影响了该系统的运行效率。土壤储热技术作为一种环保利用可再生能源的有效方式,成为解决地源热泵冷堆积的主要技术<sup>[4]</sup>。土壤低温储热(0~40 °C)为纯导热过程<sup>[5]</sup>。与之相比,高温储热(40~90 °C)条件下的土壤温湿度场耦合强烈,其时空分布变化差异性极大,且土壤中水蒸气的扩散运动亦更强烈<sup>[6]</sup>。因此,研究土壤储热过程中的热湿迁移变化规律较多<sup>[7,8]</sup>,但所研究的热源温度大都集中在 60、80 °C,其温度范围不够广泛,且很少说明水蒸气对该过程的影响。鉴此,本文在已有研究的基础上,将热源温度进一步扩大为 30、40、50、60、70、80 °C,

并将水蒸气对土壤热湿迁移的影响引入模型,构建一维非饱和土壤水—汽—热耦合迁移数值模型,以探究不同热源温度下砂土在水蒸气影响下的热湿迁移变化规律。

## 2 理论模型

### 2.1 物理模型

数值模拟土柱长 100 cm,热源位于土柱的左端(图 1),共布设 8 个数据测点,测点与热源间的距离分别为 3、8、18、28、43、58、78、100 cm<sup>[9,10]</sup>。模型假设如下:①试验土壤为均质、各向同性的多孔介质;②土壤在高温影响下仍为刚性介质,不发生形变;③土壤中的水分和热量仅沿水平方向迁移;④土壤的传热方式为热传导和热对流,水分传递方式为液态和气态传输方式。

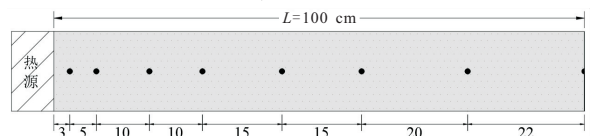


图 1 一维土柱水—汽—热耦合迁移模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the water-steam-thermal coupling migration model

**收稿日期:** 2022-08-03, **修回日期:** 2022-09-26

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41372247);山西省回国留学人员科研项目(2017-045);山西省水利科学技术研究与推广项目(2022GM001)

**作者简介:** 郭磊(1997-),男,硕士研究生,研究方向为水文水资源,E-mail:1005854162@qq.com

**通讯作者:** 晋华(1969-),女,博士、教授,研究方向为水文水资源及环境地质,E-mail:jinhua@tyut.edu.cn

## 2.2 数值模型

### 2.2.1 控制方程

(1)水分迁移方程。考虑到水蒸气迁移,土壤一维水分流动的控制方程<sup>[11]</sup>为:

$$\frac{\partial \theta_T(h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ (K_{Lh} + K_{vh}) \frac{\partial h}{\partial x} + (K_{LT} + K_{vT}) \frac{\partial T}{\partial x} \right] - S(h) \quad (1)$$

其中  $\theta_T = \theta_l + \theta_v$

式中,  $\theta_T$  为总积含水率;  $h$  为负压水头;  $K_{Lh}$  为液态水的等温水力传导率,可由 Van Genuchten 模型(VG 模型)得到;  $K_{vh}$  为水蒸气的等温水力传导率;  $K_{LT}$  为液态水的非等温水力传导率;  $K_{vT}$  为水蒸气的非等温水力传导率;  $T$  为温度;  $S(h)$  为土壤水的源汇项;  $\theta_l$  为液态水体积含水率;  $\theta_v$  为水蒸气体积含水率。

(2)热量传递方程。非饱和土壤的热量传递方程为:

$$C_P(\theta) \frac{\partial T}{\partial t} + L_0 \frac{\partial \theta_v}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda(\theta) \frac{\partial T}{\partial x} \right] - C_w q \frac{\partial T}{\partial x} - C_v \frac{\partial q_v T}{\partial x} - L_0 \frac{\partial q_v}{\partial x} \quad (2)$$

式中,  $C_P(\theta)$  为土壤表观比热容;  $L_0$  为液态水汽化体积潜热;  $\lambda(\theta)$  为土壤表观导热系数;  $C_w$  为液相的体积比热容;  $C_v$  为水蒸气的体积比热容;  $q$  为水分通量;  $q_v$  为水蒸气的通量密度。

### 2.2.2 初始边界与边界条件

(1)初始条件。在初始时刻  $t=0$ , 当  $x=0$  时土柱温度等于热源温度  $T_H$ ; 当  $x>0$  时土柱的温度等于环境温度  $T_0$ ; 在试验开始前, 土柱的含水率为初始含水率  $\theta_0$ , 即:

$$x=0, T=T_H \quad (3)$$

$$0 < x < 60, T=T_0 \quad (4)$$

$$t=0, \theta=\theta_0 \quad (5)$$

式中,  $\theta$  为土壤体积含水率;  $t$  为时间;  $x$  为距热源端的距离。

(2)边界条件。当  $x=0$  和  $x=L$  时, 假设土柱和外部环境无水分和热量的交换, 即:

$$x=0, T(x, t) = T_H, \partial \theta / \partial x = 0 \quad (6)$$

$$x=L, T(x, t) = T_0, \partial \theta / \partial x = 0 \quad (7)$$

控制方程、初始条件和边界条件一起构成了一维非饱和土壤高温储热水—汽—热耦合迁移数值模型。

### 2.3 数值计算

采用 Hydrus-1D 软件中的水分迁移和热量传递两个模块进行模拟研究。具体模拟如下: ①

空间离散。将 100 cm 长的模拟土柱以 1 cm 为步长进行空间离散, 分成 100 个相连的单元, 101 个计算节点; ②时间离散。初始时刻为 0 min, 终止时间输入 1 440 min, 初始时间步长 1 min, 最小时间步长 0.01 min, 最大时间步长为 60 min; ③非饱和土壤水力模型采用 VG 模型来进行模拟, 并在计算过程中不考虑滞后; 导热系数采用 Campbell 模型来进行模拟求解。

### 2.4 数值模拟方案

基于一维非饱和土壤高温储热水—汽—热耦合迁移数值模型, 设置了 12 种模拟工况, 模拟研究不同热源温度下水蒸气对土壤热湿迁移变化的影响, 模拟工况见表 1。所选择的土壤类型为砂土, 具体参数见表 2。

表 1 模拟工况

Tab. 1 Test conditions

热源温度/°C	水蒸气	初始含水率/(cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> )	热源温度/°C	水蒸气	初始含水率/(cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> )
30	有	0.15	60	有	0.15
	无			无	
40	有	0.15	70	有	0.15
	无			无	
50	有	0.15	80	有	0.15
	无			无	

表 2 砂土参数

Tab. 2 The sand soil parameters

参数	取值	参数	取值
$\theta_r$ /(cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> )	0.045	$n$	2.680
$\theta_s$ /(cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> )	0.430	$K_s$ /(cm <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> )	0.495
$\alpha$ /cm <sup>-1</sup>	0.145	$l$	0.500

注:  $\theta_r$  为残余含水率;  $\theta_s$  为饱和含水率;  $\alpha$  为空气进气值的倒数;  $n$  为形状系数;  $K_s$  为饱和导水率;  $l$  为经验参数。

## 3 模拟结果与分析

### 3.1 热迁移变化规律

分析不同热源温度下土壤温度随时间的变化曲线和土壤温度变化速率随热源温度的变化曲线发现是否考虑水蒸气迁移均有如下变化规律: ①土壤温度变化均呈现出先快速增长、后缓慢增长及趋于稳定的变化趋势。在测点 1(距离热源 3 cm)处, 当热源温度为 70、80 °C 时, 考虑水蒸气迁移后土壤温度变化出现略微波动, 这与 IVAN V NIKOLAEV 等<sup>[12]</sup>研究一致, 当热源温度为 70~90 °C 时, 土壤温度变化有些不稳定。②当热源温度一定, 测点与热源之间距离越大, 土壤温度变化越慢, 达到稳定状态需要的时间越长。③当与热源间的距离一定, 随热源温度的增加, 土壤温度变化越快, 但达到稳定状态需要的时间越长。

不同热源温度下土壤最终温度随热源距离的

变化曲线有如下变化规律:①无论是否考虑水蒸气迁移,不同热源温度下的土壤最终温度随热源距离的变化趋势均表现为倒“L”曲线,即先快速减小、后缓慢减小及趋于稳定三个阶段,且随热源温度的增大,其温度变幅也增大。②当无水蒸气迁移时,热源影响半径大致为 60 cm;考虑到水蒸气迁移后,热源影响半径大致为 78 cm,水蒸气迁移使热源影响半径提升 30%。由此可知,水蒸气迁移对土壤中热量传递起到了重要作用(热源影响半径为土样在热源加热下,土壤的温度/含水率变化较明显的区域到热源之间的距离)。

图 2 为在 1 440 min 时刻有无水蒸气迁移下土壤最终温度差值与温度增加增幅随热源温度的变化曲线。由图 2 可看出:①对同一测点,随热源温度的增加,土壤最终温度差值增大,温度增加的增幅也变大。以测点 3(距热源 18 cm 处)为例,当热源温度为 80 °C 时,土壤最终温度差值增大到 14.689 °C,温度增加的增幅为 61.39%。对测点 1,当热源温度增加到 80 °C,土壤最终温度差值和温度增加的增幅反而减小,这主要是因为热源温度过高和测点距离热源过近,使土壤温度变化不稳定。②对同一热源温度,随与热源间距离的增大,土壤最终温度差值增大,温度增加的增幅也变大。以 70 °C 为例,测点 1、2、3 处的土壤最终温度差值分别为 3.585、7.777、10.274 °C,温度增幅分别为 8.15%、22.35%、51.06%。由此可知,水蒸气迁移对土壤中热量传递起到了重要作用。

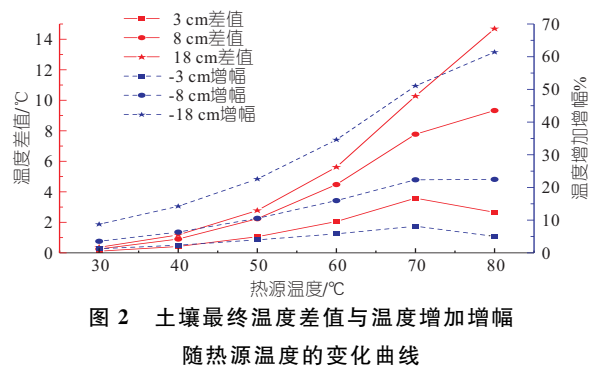


图 2 土壤最终温度差值与温度增加增幅随热源温度的变化曲线

图 3 分别为 1 440 min 时刻土壤最终温度损耗随热源温度的变化曲线和土壤温度损耗减少增幅随热源温度的变化曲线。由图 3 可看出:①无论是否考虑水蒸气迁移,土壤温度损耗随热源温度的增大而增大。②与仅考虑液态水相比,考虑到水蒸气迁移后,会减少土壤储热过程中温度的损耗,其中,对同一测点土壤温度损耗减少增幅随热源温度的增大而增大;而对同一热源温度,土壤

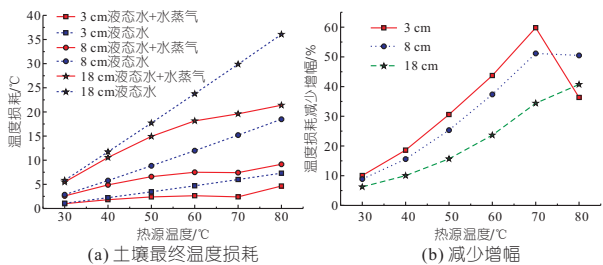


图 3 土壤最终温度损耗及减少增幅随热源温度的变化曲线  
Fig. 3 The change curve of soil final temperature loss and decreases increases with heat source temperature

温度损耗减少增幅随着与热源间距离的增加而减少。当热源温度为 70~80 °C 时,其变化规律不一致,这再次说明了当热源温度过高时,土壤温度变化会出现不稳定的情况。③仅考虑液态水迁移的 3 条曲线具有一定的线性关系,以式  $y = a + bx$  拟合,测点 1、2、3 对应的  $a$  值依次为 -2.715、-6.693、-12.432,对应的  $b$  值依次为 0.124、0.313、0.605,所得的相关系数  $R^2$  均大于 0.999,拟合精度高。

### 3.2 水分迁移变化规律

图 4、5 分别为在不同热源温度下土壤含水率随时间的变化曲线和在有无水蒸气条件下土壤含水率峰值随热源温度的变化曲线。由图 4、5 可看出:①无论是否考虑水蒸气迁移,距离热源附近的土壤均会产生含水率峰值,且随与热源之间距离的增大,土壤含水率峰值变大和出现的时间变长。这主要是因为热源作用下会产生温度梯度,使土壤水分向远离热源的方向迁移(即 Soret 效应),与此同时也就产生了水力梯度,使土壤水分向热源方向迁移,在二者共同作用下,会使土壤含

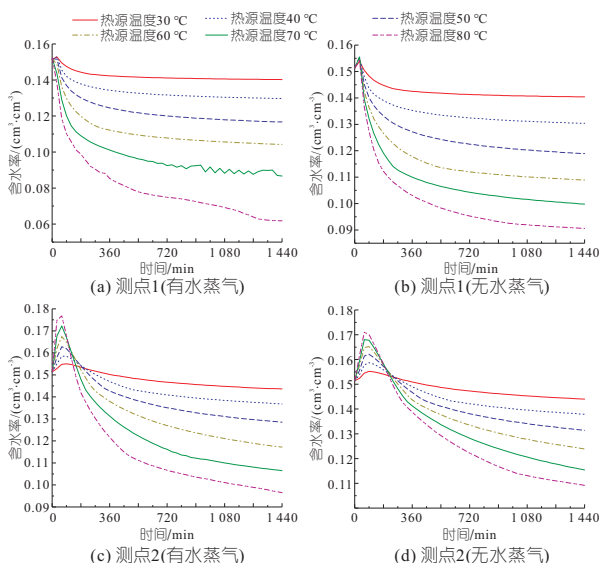


图 4 不同热源温度土壤含水率随时间的变化曲线  
Fig. 4 The curve of soilmoisture content over time at different heat source temperatures

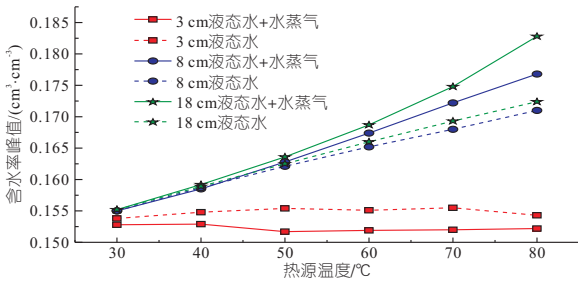


图5 土壤含水率峰值随热源温度变化曲线

Fig. 5 The curve of soil temperature change rate with heat source temperature under conditions with or without water vapor

水率在短期内出现一个含水率峰值。测点1由于距离热源过近,其变化规律不稳定。②随热源温度的增大,土壤水分迁移量(变化幅度)不断增大,最终含水率不断降低,这与YAN GAO等<sup>[1]</sup>的研究结果相一致,土壤水分迁移量与热源温度呈正相关。当热源温度达到80 °C时,在考虑水蒸气迁移时土壤最终含水率减小至0.0618 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>, (该类土壤残余含水率为0.057 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>),可能会导致热源周围土壤会出现干涸情况,从而会影响其传热效率和储热效果。

图6为在不同热源温度下土壤最终含水率随热源距离的变化曲线。由图6可看出:①无论是否考虑水蒸气迁移,不同热源温度下的土壤最终含水率随热源距离的变化曲线均表现为“S”曲线,即先减小后增大再减小的变化趋势,且随热源温度的增大,其土壤含水率变幅增大。②当无水蒸气迁移时,热源影响半径大致为78 cm;考虑到水蒸气迁移后,热源影响半径大致为100 cm。由此可知,水蒸气迁移使热源影响半径提升28.21%。由此可知,水蒸气迁移对土壤中水分传递起到了重要作用。

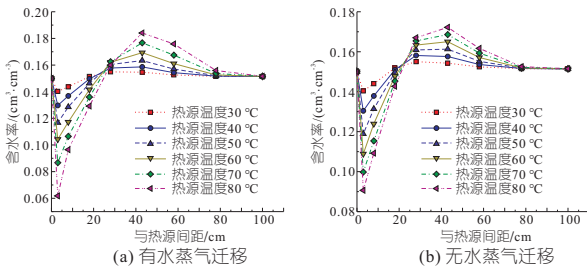


图6 不同热源温度下“含水率-距离”变化曲线  
Fig. 6 The change curve of "water content-distance" at different heat source temperatures

图7、8分别为1440 min时刻在有/无水蒸气条件下土壤含水率随热源温度变化曲线和土壤含水率差值与含水率减少增幅随热源温度变化曲线。由图7、8可看出:①对同一测点,随热源温度的增大,土壤最终含水率差值增大,含水率减少增

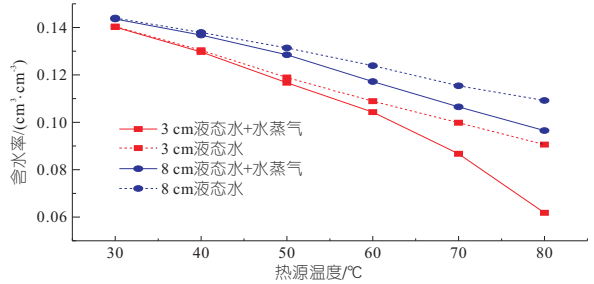


图7 在有/无水蒸气条件下土壤含水率随热源温度变化曲线

Fig. 7 The curve of soilmoisture content with heat source temperature under conditions with or without water vapor

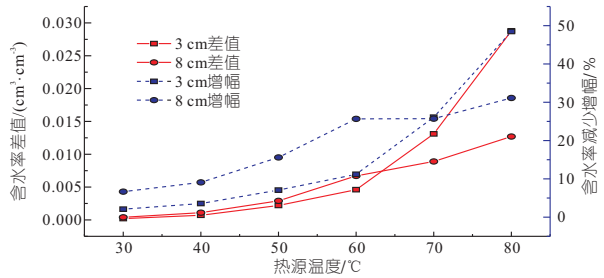


图8 在有/无水蒸气条件下土壤含水率差值与含水率减少增幅随热源温度变化曲线

Fig. 8 The curve of soilmoisture content difference and moisture content decrease with heat source temperature under conditions with or without water vapor

幅也变大。以测点1为例,当热源温度增加到80 °C,土壤最终含水率差值增大到0.0288 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>,含水率减少增幅为48.48%。②在热源温度小于60~70 °C的情况下,对同一热源温度,随与热源间距离的增大,土壤最终含水率差值增大,含水率减少增幅变大;在热源温度大于60~70 °C的情况下,其变化规律正好相反,说明当热源温度为70~80 °C时,其土壤含水率变化不稳定。

### 4 结论

a. 当热源温度为70~80 °C时,土壤的温度场和湿度场变化不稳定,且在热源附近会出现干枯现象。

b. 不同热源温度下,土壤温度随热源距离的变化趋势表现为倒“L”曲线,土壤水分则表现为“S”曲线,并且二者的变幅均随热源温度的增大而增大。

c. 水蒸气强化作用可使土壤温度的热源影响半径由60 cm增大到78 cm,相比于无水蒸气迁移时提升了30%;使土壤水分的热源影响半径由78 cm增大到100 cm,提升了28.21%。

d. 水蒸气迁移可减少土壤传热过程中温度的损耗,对同一测点,土壤温度损耗减少的增幅随热源温度的增大而增大;而对同一热源温度,土壤温度损耗减少的增幅随与热源间距离的增加而减少。

## 参考文献:

- [1] YAN GAO, SHUYUE DONG, CHUANG WANG, et al. Effect of thermal intensity and initial moisture content on heat and moisture transfer in unsaturated soil[J]. *Sustainable cities and society*, 2020, 55: 102069.
- [2] 刘雨, 谢艳萍, 余晓平, 等. 基于运行数据的地源热泵系统性能分析[J]. *制冷与空调(四川)*, 2021, 35(4): 503-508.
- [3] 朱林, 张贺, 杨金刚. 严寒地区土壤源热泵系统土壤温度变化分析研究[J]. *吉林师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(1): 89-92.
- [4] ABBAS ZULKARNAIN, YONG LI, ABBAS SAQLAIN. Performance analysis of seasonal soil heat storage system based on numerical simulation and experimental investigation[J]. *Renewable energy*, 2021, 178: 66-78.
- [5] 齐承英, 王华军. 土壤高温储热技术研究现状与进展[J]. *河北工业大学学报*, 2013, 42(1): 94-99.
- [6] 王华军, 齐承英, 杜红普, 等. 土壤高温储热过程中的温/湿度峰值现象[J]. *太阳能学报*, 2011, 32(4): 490-495.
- [7] 王恩宇, 韩永, 冀海燕, 等. 初始含水率对土壤储/取热特性影响的试验研究[J]. *河北工业大学学报*, 2012, 41(5): 38-43.
- [8] 陈红兵, 丁翰婉, 刘松雨, 等. 不同土质条件下土壤高温蓄热中热湿传递的实验研究[J]. *太阳能学报*, 2015, 36(9): 2314-2318.
- [9] 王华军, 齐承英. 土壤高温储热热湿迁移过程的初步研究[J]. *太阳能学报*, 2009, 30(12): 1683-1687.
- [10] 郭毅, 晋华, 桂金鹏. 不同初始含水率砂土水-汽-热耦合迁移数值模拟[J]. *节水灌溉*, 2019(8): 102-107.
- [11] HIROTAKA SAITO, JIRI ŠIMNEK, BINAYAK P MOHANTY. Numerical analysis of coupled water, vapor, and heat transport in the vadose zone[J]. *Vadose zone journal*, 2006, 5(2): 784-800.
- [12] IVAN V NIKOLAEV, WEY H LEONG, MARC A ROSEN. Experimental investigation of soil thermal conductivity over a wide temperature range[J]. *International journal of thermophysics*, 2013, 34(6): 1110-1129.

## Numerical Simulation of the Effect of Water Vapour on Soil Heat and Moisture Migration at Different Heat Source Temperatures

GUO Lei, JIN Hua, ZHANG Yu-lu, CHEN Si-qing, GUO Huan-fang

(College of Water Resources Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** The study of the effect of water vapour on soil heat and moisture migration patterns at different heat source temperatures is of great significance for the application of soil heat storage and ground source heat pump technology. In this paper, a numerical model of one-dimensional unsaturated soil water-vapour-thermal coupling migration was constructed by Hydrus-1D software, and the numerical simulation study of sandy soils with and without water vapour migration at different heat source temperatures was carried out. The results show that for soil heat migration, taking into account water vapour migration increases the radius of influence of the heat source from 60 cm to 78 cm, an increase of 30%; For soil moisture migration, the radius of influence of the heat source increases from 78 cm to 100 cm, an increase of 28.21%. Compared with not considering water vapor migration, considering water vapor migration can reduce the temperature loss during soil heat storage, and the decrease of temperature loss increases with the increase of heat source temperature. When the temperature of the heat source is above 70 °C, the temperature and moisture fields of the soil change unsteadily and dryness may occur in the vicinity of the heat source.

**Key words:** water-vapor-thermal coupling migration; heat source temperature; water vapour; hydrus-1D; numerical simulation

(上接第 220 页)

## Application Research of a High Reliability Multi-signal Redundant Speed Relay

SHU Bing-fang<sup>1</sup>, ZHAO Wei-jun<sup>2</sup>, LAO Peng-fei<sup>2</sup>, GAN Bei-rong<sup>1</sup>, DONG Cheng-zhi<sup>1</sup>, ZHANG Liu-tong<sup>1</sup>

(1. Jinshuitan Hydropower Plant, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Lishui 323000, China;

2. Wuhan Sanlian Hydropower Control Equipment Co., Ltd., Wuhan 430200, China)

**Abstract:** At present, the existing speed relays on the market only collect single signal source, poor anti-interference. It is easy to disorder the signal of the speed node output caused by measurement signal distortion and measuring channel fault. In order to improve the reliability and accuracy of the speed relay, two channels of residual voltage signals and two channels of sprocket speed measurement signals were respectively connected. Then the dual-probe tooth sequential speed measurement method was combined with the logic of selecting one out of three speed signals. The judgment method selected one speed signal as the main signal. In the signal output process of the rotational speed node, the limiting average filtering method and the method of retrieval interference output blocking were applied to eliminate the distortion in the signal output process. Through the simulation test bench test and the application in the actual generator set, the anti-interference ability of the acquisition signal loop, the signal measurement accuracy, and the reliability of the output action of the speed node have been significantly improved.

**Key words:** double probe; signal redundancy; tooth sequence frequency measurement; choose one from three; speed relay