

基于温度示踪法的典型农渠渠道渗漏模拟研究

潘维艳^{1,2} 普薇如^{1,2} 黄权中^{1,2} 黄冠华^{1,2}

(1. 中国农业大学中国-以色列国际农业研究培训中心, 北京 100083;

2. 中国农业大学中国农业水问题研究中心, 北京 100083)

摘要:以渠道渗漏土壤水动态及热伴生机理为理论基础,利用热示踪技术,选取内蒙古河套灌区典型农渠开展野外监测、原位热示踪试验,利用温度示踪结果定性分析渠系渗漏过程。利用二维水热运移数值模型 VS2D 对渠道渗漏条件下饱和/非饱和土壤的水热迁移过程进行模拟,反演出试验区粉砂壤土和砂壤土的饱和水力传导度分别为 0.025 m/d 和 0.6 m/d。通过静水试验数据对模型进行验证,结果表明,温度模拟值和实测值的平均均方根差(RMSE)和平均相对误差(MRE)分别为 1.6℃ 和 2.5%,累积入渗量实测值与模拟值的相对误差为 2.4%,模拟结果与实际监测数据吻合较好。研究结果表明,温度信号可用来对渠系的渗漏状况进行示踪和监测,VS2D 模型模拟土壤水热运移的结果能够为灌区的渠道渗漏问题提供科学依据,可为我国北方旱区灌区水资源的管理以及渠系节水改造工程提供一定的理论和技术支持。

关键词:渠系渗漏; 温度示踪; VS2D 模型; 数值模拟

中图分类号: S27; S-03 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)05-0251-07

Simulation of Typical Canal Seepage Based on Temperature Tracer Method

PAN Weiyan^{1,2} PU Weiru^{1,2} HUANG Quanzhong^{1,2} HUANG Guanhua^{1,2}

(1. Chinese - Israeli International Center for Research and Training in Agriculture, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Center for Agricultural Water Research, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Canal seepage is of great concern because of the water shortage and efficient use of irrigation water resource in many irrigation districts. To investigate the infiltration loss, heat was used as a natural tracer to characterize the canal seepage during irrigation channels conveyance. The field experiment was carried out in a typical canal located in Hetao Irrigation District. Time-domain reflectometer and thermal sensors were used to monitor the soil moisture content and temperature around the typical channel. The tracer experiment indicated that temperature changes in the shallow sediments characterized canal seepage properties. Based on the interactions between groundwater and surface water temperature, temperature changes can derive the river flow even without water level data. Two-dimensional water and heat model, VS2D, was applied to simulate the dynamic process of water and heat in the saturated and unsaturated soils. And the soil hydraulic parameters, including saturated water content and hydraulic conductivity were inversely solved by the VS2D model. The hydraulic conductivity was 0.025 m/d for the silt loam and 0.6 m/d for the loamy sand soil in the experiment area, respectively. The simulation results were verified based on the results of the observation experiment. The values of root mean square error (RMSE) and mean relative error (MRE) between simulated and measured temperatures were 1.6℃ and 2.5%, respectively, indicating an accurate simulation. The relative mean error between predicted accumulative infiltration amount and actual value was 2.4% and the accuracy could meet the requirement. The results suggested that heat as a tracer was reliable for monitoring of water transport during canal seepage. Heat as a tracer provided a convenient and accurate way to monitor the infiltration loss during irrigation channels conveyance, which would be beneficial to irrigation management in the arid irrigation district in North China.

Key words: canal seepage; temperature tracer; VS2D model; numerical simulation

收稿日期: 2016-11-02 修回日期: 2016-12-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51379209, 51079149)

作者简介: 潘维艳(1987—),女,博士生,主要从事水环境保护与治理研究,E-mail: weiyanpan@126.com

通信作者: 黄权中(1974—),男,副教授,博士,主要从事水土环境响应和水分溶质迁移模拟研究,E-mail: huangqzh@cau.edu.cn

其中 $C_s = f_m(c_m p_m) + f_o(c_o p_o) + f_a(c_a p_a)$ (2)

$$D_h = \alpha_T |V| \delta_{i,j} + \frac{(\alpha_L - \alpha_T) v_i v_j}{|V|} \tag{3}$$

式中 θ ——土壤含水率, cm^3/cm^3
 φ ——土壤孔隙率, % t ——时间, s
 K_i ——介质热导率, $\text{W}/(\text{K}\cdot\text{m})$
 q ——孔隙流速, m/s
 T ——温度, $^{\circ}\text{C}$ V ——速度, m/s
 $C_w、C_s$ ——土壤水、固相比热容, $\text{J}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$
 $f_m、f_o、f_a$ ——矿物、有机质、空气所占的质量
 比率, kg/kg
 $c_m、c_o、c_a$ ——矿物、有机质、空气的比热容,
 $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
 $p_m、p_o、p_a$ ——矿物、有机质、空气密度, kg/m^3
 D_h ——热动力弥散系数, m^2/s
 $\alpha_L、\alpha_T$ ——纵向、横向弥散度, m
 v_i ——第 i 个速度, m/s
 v_j ——第 j 个速度, m/s
 $\delta_{i,j}$ ——克罗内克函数

式(1)中,方程左边表示时段前、后储存热量的变化值,右边分别表示热传导、热弥散、热对流及热量源汇项;热对流、热弥散与溶质运移的对流弥散相似,其中弥散具有尺度效应,而热源汇项出现在注入井或抽水井。从控制方程中可以看出,热量伴随水分在多孔介质中的迁移过程与孔隙介质中水力传导机制类似。在热传导控制方程中,实际热导率 K_i 随含水率呈非线性变化,为了模拟方便,VS2DH 模型中假设热导率在残余含水率及饱和含水率之间随含水率增加呈线性变化。

由达西方程与连续性方程联合求解得到 Richards 方程,方程 $C(\varphi)$ 的表达方式适用于饱和-非饱和流动问题,也适用于分层土壤水分的运动计算,表达式为

$$C(\varphi) \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot [k(\varphi) \nabla h + 1] \tag{4}$$

式中 $C(\varphi)$ ——容水度,数值上等于土壤水分特征曲线斜率的倒数
 φ ——压力水头, m h ——总水头, m
 k ——水力传导度, m/s

1.3 模型构建

采用 VS2D 软件模拟水热运移过程。如图 2 所示,首先建立渠道模拟区域,模拟区域宽 8.5 m,深 3 m。模型模拟中设定时间单位为 d,水头单位为 m,热量单位为 J。根据设定的模拟区域(图 2),水流和温度模拟的边界条件设置如表 1 所示。

在 VS2D 模型初始条件的输入形式选项中,水

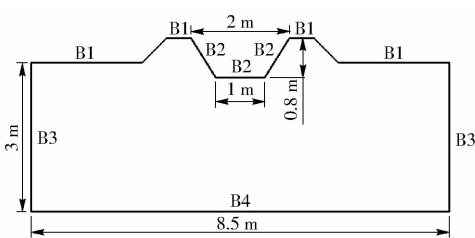


图 2 模拟区域

Fig. 2 Schematic of simulation domain

表 1 模拟区域边界条件

Tab. 1 Boundary conditions for simulation domain

边界区域	水流边界	温度边界	区域位置
B1	零通量边界	变温度边界(实测温度)	渠道两边地面
B2	变水头边界(实测河水水位)	变温度边界(实测温度)	渠道底面与坡面
B3	零通量边界	零通量边界	区域左右两侧垂向边界
B4	变水头边界(实测地下水水位)	变温度边界(实测温度)	区域出流下边界

分的初始变量可选择含水率、压力水头或平衡剖面,本研究采用试验初始时刻各土层的土壤含水率及温度的实测值作为初始条件。

1.4 模型参数设置

根据土壤机械组成及土壤质地分析,将模拟区域分层。由于土壤水力传导度受土壤质地的影响明显,而热导率 K_i 随土壤质地变化较小^[20],因此对模拟区域的热参数取值进行统一设定(表 2)。其中,土壤、水比热容分别取 20℃ 和标准大气压下的体积比热容经验值(2.18×10^6 、 $4.18 \times 10^6 \text{ J}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$)。热弥散具有空间尺度效应,CONSTANTZ 等^[20] 建议野外试验纵向热弥散度的范围为 0.01 ~ 0.5 m,且纵向扩散度为横向扩散度的 10 倍,NISWONGER 等^[21] 推荐的地下水纵向弥散度为 0.01 ~ 1 m,经模型反复模拟调试,模型中纵向弥散度取 1 m,横向弥散度取 0.1 m。热传导机制与孔隙介质中水力传导机制类似,热传导依赖含水率而变化,实际热传导随含水率变化呈非线性变化,而在 VS2DH 模型中假设热导率在残余含水率与饱和含水率之间呈线性变化,ANDERSON^[14] 通过对河床沉积物的试验得到由干燥到饱和过程中热导率取值范围为 0.2 ~ 2.2 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。本研究在借鉴经验值的基础上,经反复调试后的残余和饱和含水率条件下热导率取值分别为 1.5 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 和 2.5 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

1.5 模型评价标准

模拟值与实测值的吻合程度采用均方根误差(RMSE)和平均相对误差(MRE)进行评价。

表 2 模型中的热参数

Tab.2 Thermal parameters for VS2DH model

参数	数值
土壤固相比热容 $C_s/(J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1})$	2.18×10^6
水比热容 $C_w/(J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1})$	4.18×10^6
纵向弥散度 α_L/m	1.0
横向弥散度 α_T/m	0.1
热导率(在残余水分条件下) $K_{tr}/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	1.5
热导率(在饱和水分条件下) $K_{hs}/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	2.5

2 结果与分析

2.1 温度示踪定性分析渠系渗漏过程

在渠道自然渗漏监测阶段(6月21日—7月5日,灌区引黄灌溉第3次灌水),渠底 R1 各深度处实测温度数据随时间的变化曲线如图3所示。从图3可以看出,温度受太阳辐射的影响以正弦或余弦的形式呈现周期性波动。试验期间河水温度在14~34℃范围内波动,而地下水温度在5~8℃范围内波动,河水温度以及浅层土壤中温度波动振幅均较大,而浅层地下水温度波动振幅较小。由于地表水与地下水存在温度差异,河渠水向地下渗漏过程中伴随着热量的交换、对流和传导作用,在传播过程中对天然地热梯度产生干扰,形成温度信号,使温度的变化幅度随渗流距离的增加呈指数降低,地表水与地下水的相互作用不仅会引起温度在空间上的动态变化,还会使温度随时间及深度的变化产生显著变化,由此温度信号揭示渠系渗漏过程及其动态变化。随着地下水和地表水相互作用强度的变化,热量在传播过程中,对天然地热梯度产生的干扰也不同,监测的温度曲线信号也随之变化^[14,22]。河套灌区地下水埋深较浅,试验区在试验期间地下水平均埋深为1.8 m,由图3可以看出,地下水位以下温度波动相对稳定,表明受渗漏过程的影响不明显。

对于具有季节性过水的河渠,渠底明显的温度

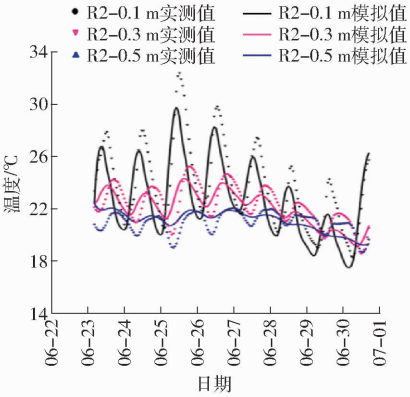


图 4 第3次灌水试验 R2 和 R3 不同深度处温度的模拟值与实测值比较

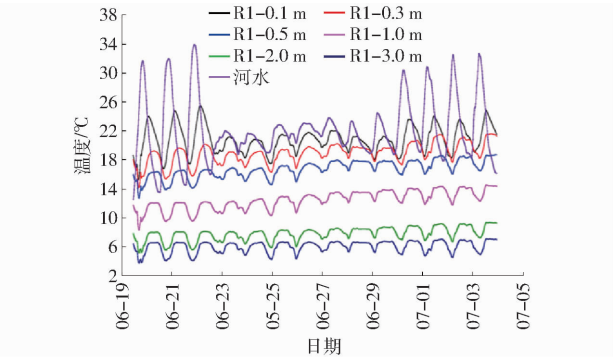


图 3 R1 不同深度处温度随时间的变化

Fig.3 Temporal variations of temperature at different depths of monitoring position R1

信号可以指示水流的流经过程。如图3所示,6月23日—7月1日为河渠过水阶段,温度波动振幅较小;6月20日—6月23日、7月1日—7月5日为无过水阶段,温度波动振幅较大,这是由于干枯河床的温度通常具有较高的日变异性^[15],而在季节性过水开始时,高速率入渗的河水会导致迅速的地热反应,引起河床沉积物中温度曲线骤然到达的信号,通过分析河水与地下水作用带(主要是河床沉积物)的温度变化,即使在无水位数据的情况下,也能够识别出河渠的失水或得水情况^[15]。随着地表水与地下水相互作用强度的变化,热干扰随之变化,从而影响浅层沉积物的温度信号曲线,ANDERSON^[14]研究发现若综合河渠上多个点的温度剖面,则可估测河渠上不同点的得水或失水强度,从而反映渗漏情况的空间差异,甚至可以评估整条河渠。

2.2 温度示踪定量分析渠系渗漏过程

2.2.1 渠道自然渗漏监测阶段模拟与水力传导度反演

利用 VS2D 模型对渠道自然渗漏监测试验期间的渠边 R2 和 R3 位置处不同深度的热运移变化过程进行模拟,图4是 R2 与 R3 不同深度处的温度随时间变化的模拟值及实测值的比较(模型率定)。

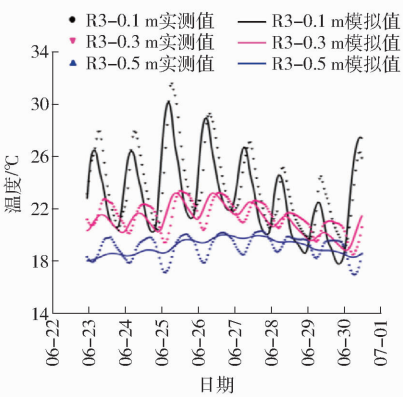


Fig.4 Comparisons of simulated and measured temperatures at different soil depths of monitoring positions R2 and R3 during the third irrigation test

从图 4 可以看出,实测和模拟的温度均随时间的推移呈周期性波动,而且随着深度增加,温度波动振幅减小。温度的 RMSE 和 MRE 计算结果见表 3。其 RMSE 最大值为 1.9℃,平均值为 1.2℃;MRE 最大值为 3.7%,平均值为 1.6%,模拟值与实测值拟合结果在可接受范围内。由于实际土壤的空间变异性,在模拟时对土壤质地结构进行了概化,造成了部分误差。在模型模拟中,温度数据也可以进一步约

束和校正水流和热运移的耦合模型,提高模拟模型的校正精度,降低模型的不确定性,从而可以更好地反演含水层的水力学性质,提高渠系渗漏量的模型计算精度。

在模拟过程中,各分区土壤水力特性参数利用实测资料及 VS2DH 模型推荐值调试得到,并进一步反演得到土壤饱和和水力传导度 k ,粉砂壤土层 k 为 0.025 m/d,砂壤土层 k 为 0.6 m/d。

表 3 模型率定过程中各土层温度的 RMSE 和 MRE 值

统计检验指标	R2-0.1 m	R2-0.3 m	R2-0.5 m	R3-0.1 m	R3-0.3 m	R3-0.5 m
RMSE/℃	1.8	0.9	0.7	1.9	0.9	0.7
MRE/%	3.7	0.9	0.7	2.7	1.3	0.3

2.2.2 静水试验对模型的验证

利用静水试验观测数据对模拟结果进行验证,将模拟得到的水力传导度输入模型进行静水试验模

拟。静水试验模拟得到的渠道 R2 和 R3 位置不同深度处的温度模拟值和实测值如图 5 所示,模拟与实测温度 RMSE 和 MRE 见表 4。

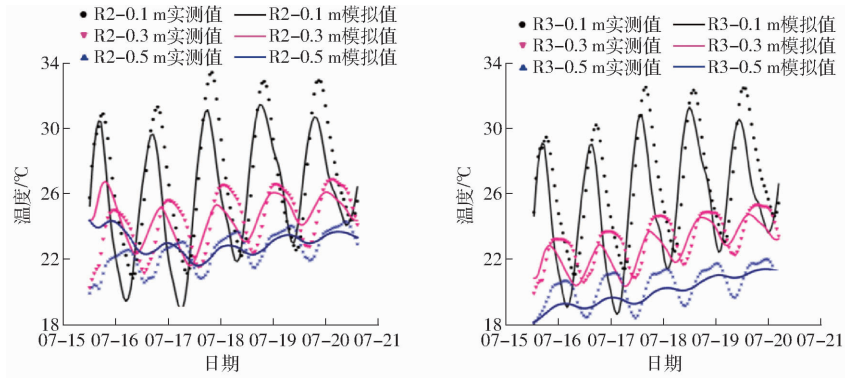


图 5 静水试验 R2 和 R3 不同深度处土壤温度的模拟值与实测值比较

Fig. 5 Comparisons of simulated and measured temperatures at different soil depths of monitoring positions R2 and R3 during hydrostatic test

表 4 模型验证过程中各土层温度的 RMSE 和 MRE 值

统计检验指标	R2-0.1 m	R2-0.3 m	R2-0.5 m	R3-0.1 m	R3-0.3 m	R3-0.5 m
RMSE/℃	2.2	1.5	1.2	2.6	1.2	0.9
MRE/%	3.6	0.6	2.3	4.6	2.2	1.9

图 5 中土壤温度模拟值与实测值均随时间呈周期性波动变化,温度波动振幅随深度增大而减小,温度模拟值与实测值 RMSE 最大值为 2.6℃,平均值为 1.6℃;MRE 最大值为 4.6%,平均值为 2.5%,温

度模拟值与实测值的拟合效果较好,在可接受范围内。

静水试验期间入渗强度的模拟值与实测值的比较如图 6 所示,在试验初期实测的入渗强度略小于

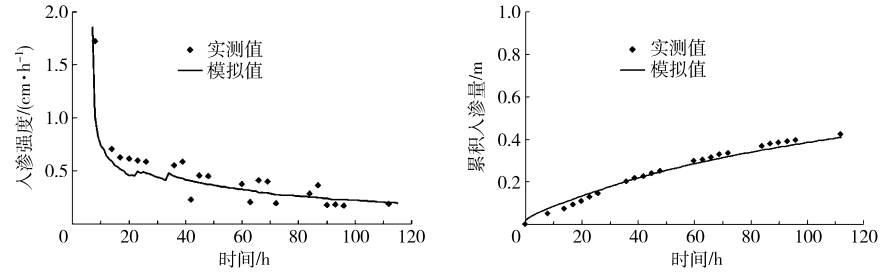


图 6 静水试验渠道入渗强度和单位长度累积入渗量的模拟值与实测值比较

Fig. 6 Comparisons of simulated and measured cumulative infiltrations per unit length during hydrostatic test

模拟值,可能是由于模拟所采用的初始含水率比实际含水率小,相应的模拟累积入渗量在试验初期高于实测值(图6)。在静水试验的中后期模拟值与实测值接近。静水试验结束时,最终累积入渗量模拟值为0.41 m,实测值为0.42 m,绝对误差为0.01 m,相对误差为2.4%,小于3%,在可接受范围内,由此表明温度示踪模拟结果与静水法实测结果拟合较好。这与 CONSTANTZ 等^[20]和 COX 等^[23]所采用的同位素和溴离子野外示踪试验结果高度一致,同时采用温度数据反求得到入渗强度、饱和水力传导度等参数,可为渠道渗漏问题的研究提供依据。

3 结论

(1)原位监测试验可以准确获取渠道渗漏过程中渠底温度的动态变化过程,渠底温度变化信号可以用于渠道渗漏的示踪。

(2)温度示踪试验数据与 VS2D 模型结合可反演得到试验区土壤的饱和水力传导度,粉砂壤土层为0.025 m/d,砂壤土层为0.6 m/d。通过静水试验对模拟结果进行了验证,温度模拟值与实测值的 RMSE 和 MRE 分别为1.6℃和2.5%,累积入渗量模拟值与实测值的相对误差小于3%,结果表明温度示踪技术可用于渠道渗漏的监测中。

参 考 文 献

- 李红星,樊贵盛. 基于点入渗参数计算土质渠床自由渗漏损失的方法[J]. 水科学进展, 2010, 21(3): 321-326.
LI Hongxing, FAN Guisheng. Method for calculating seepage losses from earth-lined irrigation channels based on the point cumulative infiltration[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(3): 321-326. (in Chinese)
- 姚立强,毛晓敏,冯绍元,等. 不同防渗措施对渠道渗漏量及周边土壤水分的影响[J]. 水利学报, 2010, 41(11): 1360-1366.
YAO Liqiang, MAO Xiaomin, FENG Shaoyuan, et al. Effect of different anti-seepage measures and surrounding soil water on canal seepage[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(11): 1360-1366. (in Chinese)
- 杜军,杨培岭,任树梅,等. 河套灌区干渠衬砌对地下水及生态环境的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(1): 144-150.
DU Jun, YANG Peiling, REN Shumei, et al. Effect of canal lining project on groundwater and ecological environment in Hetao irrigation district of Inner Mongolia[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(1): 144-150. (in Chinese)
- ALAM M M, BHUTTA M N. Comparative evaluation of canal seepage investigation techniques [J]. Agricultural Water Management, 2004, 66(1): 65-76.
- 毛晓敏,姚立强,冯绍元,等. 层状土条件下混凝土衬砌渠道渗漏及土壤水分分布的数值模拟[J]. 水利学报, 2011, 42(8): 949-955.
MAO Xiaoming, YAO Liqiang, FENG Shaoyuan, et al. Numerical simulation on canal seepage and soil water distribution for concrete lining canal with layered soil structure[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(8): 949-955. (in Chinese)
- 张蔚榛. 地下水与土壤动力学[M]. 北京:中国水利电力出版社, 1996.
- 罗玉峰,崔远来,郑祖金. 河渠渗漏量计算方法研究进展[J]. 水科学进展, 2005, 16(3): 444-449.
LUO Yufeng, CUI Yuanlai, ZHENG Zujin. Research progress on methods of quantifying seepage from rivers and canals[J]. Advances in Water Science, 2005, 16(3): 444-449. (in Chinese)
- 贾宏伟,卞祖铭,赵晓波,等. 渠道渗漏的静水测试法[J]. 节水灌溉, 2007(8): 43-44.
- 韩文霆,乔军,许景辉. T-TDR 传感器土壤热场模拟与测温结点位置研究[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(8): 106-111. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20130819&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.08.019.
HAN Wenting, QIAO Jun, XU Jinghui. Soil thermal field simulation and temperature node positions research of T-TDR sensors [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8): 106-111. (in Chinese)
- 王卫华,李建波,王铄,等. 土壤热特性参数空间变异性与拟合方法研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 120-125. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150418&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.04.018.
WANG Weihua, LI Jianbo, WANG Shuo, et al. Spatial variability of soil thermal parameters and its fitting method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 120-125. (in Chinese)
- 王伟,赵坚,陈孝兵,等. 基于 VS2DH 的低温水入渗模型验证及热弥散研究[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(6): 296-300.
- 冯建国,李云峰,张新江,等. 变饱和带数值模拟软件 VS2DI 介绍[J]. 地下水, 2007, 29(1): 24-27.
- 吴志伟,宋汉周. 浅层地温场中热对流数值模拟[J]. 岩土力学, 2010, 31(4): 1303-1308.
WU Zhiwei, SONG Hanzhou. Numerical simulation of thermal convection in shallow ground temperature field[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(4): 1303-1308. (in Chinese)
- ANDERSON M P. Heat as a ground water tracer[J]. Ground Water, 2005, 43(6): 951-968.
- 马瑞,董启明,孙自永,等. 地表水与地下水相互作用的温度示踪与模拟研究进展[J]. 地质科技情报, 2013, 32(2): 131-137.
MA Rui, DONG Qiming, SUN Ziyong, et al. Using heat to trace and model the surface water-groundwater interactions; a review [J]. Geological Science and Technology Informance, 2013, 32(2): 131-137. (in Chinese)

16 李英玉,赵坚,吕辉,等. 河岸带潜流层温度示踪流速计算方法[J]. 水科学进展, 2016, 27(3): 423 – 429.
LI Yingyu, ZHAO Jian, LÜ Hui, et al. Investigation on temperature tracer method calculated flow rate of hyporheic layer in riparian zone[J]. Advances in Water Science, 2016, 27(3): 423 – 429. (in Chinese)

17 吴志伟, 宋汉周. 地下水温度示踪理论与方法研究进展[J]. 水科学进展, 2011, 22(5): 733 – 740.
WU Zhiwei, SONG Hanzhou. Temperature as a groundwater tracer;advances in theory and methodology[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(5): 733 – 740. (in Chinese)

18 林晶晶, 马瑞, 孙自永, 等. 河水与地下水作用带内井中流对温度示踪结果影响的实验研究[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(5): 14 – 21.
LIN Jingjing, MA Rui, SUN Ziyong, et al. Laboratory investigation on the effect of the intraborehole flow in fully-screened well on the temperature change during tracing river and groundwater interaction [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2015, 42(5): 14 – 21. (in Chinese)

19 KIPP K L. HST3D: a computer code for simulation of heat and solute transport in three-dimensional ground water systems[R]. USGS Water Resources Investigations Report 86 – 4095, 1987.

20 CONSTANTZ J, COX M H, SU G W. Comparison of heat and bromide as ground water tracers near streams[J]. Ground Water, 2003, 41(5): 647 – 656.

21 NISWONGER R, RUPP J L. Monte Carlo analysis of streambed seepage rates[C] //Proceedings of the American Water Resources Association, International Conference on Riparian Ecology and Management in Multi-land Use Watersheds, 2000: 161 – 166.

22 CONSTANTZ J. Heat as a tracer to determine streambed water exchanges[J]. Water Resources Research, 2008, 44(4):117 – 128.

23 COX M H, SU G W, CONSTANTZ J. Heat, chloride, and specific conductance as ground water tracers near streams[J]. Ground Water, 2007, 45(2): 187 – 195.

~~~~~

(上接第 250 页)

38 邵光成, 刘娜, 陈磊. 温室辣椒时空亏缺灌溉需水特性与产量的试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(4): 117 – 121.  
SHAO Guangcheng, LIU Na, CHEN Lei. Character of water demand and yield of space time deficit irrigation for hot pepper in greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(4): 117 – 121. (in Chinese)

39 杨再强, 邱译堂, 刘朝霞, 等. 土壤水分胁迫对设施番茄根系及地上部生长的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(3): 748 – 757.  
YANG Zaiqiang, QIU Yixuan, LIU Zhaoxia, et al. The effects of soil moisture stress on the growth of root and above-ground parts of greenhouse tomato crops [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(3): 748 – 757. (in Chinese)

40 郝树荣, 郭相平, 王为木, 等. 水稻分蘖期水分胁迫及复水对根系生长的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(1): 149 – 152.  
HAO Shurong, GUO Xiangping, WANG Weimu, et al. Effects of water stress in tillering stage and re-watering on rice root growth [J]. Agricultural Research in Arid Areas, 2007, 25(1): 149 – 152. (in Chinese)

41 ROMERO P, BOTIA P, GARCIA F. Effects of regulated deficit irrigation under subsurface drip irrigation conditions on vegetative development and yield of mature almond trees [J]. Plant and Soil, 2004, 260(1 – 2): 169 – 181.

42 MCCULLY M. Roots in soil: unearthing the complexities of roots and their rhizospheres [J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1999, 50: 695 – 718.

43 HUANG B, FRY J D. Root anatomical, physiological and morphological responses to drought stress for tall Fescue cultivars [J]. Crop Science, 1998, 38(4): 1017 – 1022.

44 聂伟燕, 赵尊练, 夏云飞, 等. 水分胁迫对线辣椒根系生长及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(4): 30 – 32.  
NIE Weiyan, ZHAO Zunlian, XIA Yunfei, et al. Effects of water stress on root growth and yield of line pepper [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(4): 30 – 32. (in Chinese)

45 MORENO F, FERNÁNDEZ J E, CLOTHIER B E, et al. Transpiration and root water uptake by olive trees [J]. Plant and Soil, 1996, 184(1): 85 – 96.

46 汪妮娜, 黄敏, 陈德威, 等. 不同生育期水分胁迫对水稻根系生长及产量的影响[J]. 热带作物学报, 2013, 34(9): 1650 – 1656.  
WANG Ni'na, HUANG Min, CHEN Dewei, et al. Effects of water stress on root and yield of rice at different growth stages[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2013, 34(9): 1650 – 1656. (in Chinese)