

蓄水坑灌下果园土壤水-热-氧三维分布数值模拟

苏媛媛¹, 郭向红^{1,2*}, 胡飞鹏¹, 孙西欢¹, 马娟娟¹, 郑利剑¹, 雷涛¹

(1.太原理工大学, 太原 030024;

2.中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要:【目的】构建蓄水坑灌条件下的土壤水-热-氧三维分布耦合模型, 探究蓄水坑灌对土壤水、热、氧分布的影响, 揭示蓄水坑灌下的土壤水、热、氧空间分布特征。【方法】基于土壤水分运动方程, 土壤热量传输方程和土壤氧传输方程, 建立蓄水坑灌下的土壤水-热-氧三维耦合模型, 利用 COMSOL Multiphysics 软件进行数值求解, 采用田间实测数据对模型进行验证, 基于验证后的模型模拟增设蓄水坑和灌水对果园土壤水、热、氧分布的影响。【结果】三维耦合模型具有较高的精度, 模型模拟土壤含水率、土壤温度和土壤氧浓度的 RMSE 分别为 0.036 7、1.609 9 和 0.013 8。增设蓄水坑后, 坑壁土壤水、热、氧分布发生较大改变; 随着时间的推移, 蓄水坑周围的土壤含水率降低, 土壤含氧量升高, 坑壁与地表土壤温度呈相同的变化规律, 均随着气温的降低而降低。蓄水坑灌水后, 水分通过坑壁渗入土壤, 形成以坑底为中心的椭球状含水率高值区和土壤温度、含氧量低值区, 三者分布随着时间推移趋于均匀, 但灌水对土壤温度的影响时间远低于对土壤含水率和含氧量的影响时间。灌水对土壤氧浓度影响较小, 氧浓度在地表和坑壁处较高; 距地表和坑壁处越远, 土壤氧浓度越低。【结论】蓄水坑增大了坑壁处的土壤水、热、氧交换界面, 坑壁处土壤水、热、氧状况受蒸发、降水、大气温度和氧浓度的影响, 与地表具有相似的变化; 蓄水坑灌下的土壤水、热、氧状况更有利于作物根系的生长。

关键词: 蓄水坑灌; 水-热-氧耦合; COMSOL; 数值模拟

中图分类号: S626.5

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022451

OSID: 

苏媛媛, 郭向红, 胡飞鹏, 等. 蓄水坑灌下果园土壤水-热-氧三维分布数值模拟[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(5): 67-74.

SU Yuanyuan, GUO Xianghong, HU Feipeng, et al. Three-dimensional Numerical Simulation of Water, Heat and Oxygen Distribution in Soil in Orchard Irrigated by Water Storage Pit[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(5): 67-74.

0 引言

【研究意义】水、肥、气、热是保障土壤肥力和作物生长的重要因素。适宜的根际氧浓度可以改善根区土壤环境^[1], 促进作物根系生长, 提高作物光合速率和产量^[2], 改善作物品质^[3]。【研究进展】以往研究对于土壤水、热、肥的关注度远高于对土壤氧浓度的关注。在农业节水的基础上, 研究者针对水、肥、热开展了大量研究, 通过灌溉、肥料改良、覆膜等措施调节农田水、肥、热环境。对于土壤氧浓度, 以往研究主要基于试验手段探究了不同灌溉方式^[4]和不同增氧方式(如钻孔增氧、化学增氧、加气增氧)对土壤氧浓度、作物生长和产量的影响^[1,3,5]。灌溉会对土壤水、肥、气、热环境造成一定影响^[4]。蓄水坑灌作为一种节水灌溉新方法, 通过在树冠以下 1/2 处的圆周上均匀布设蓄水坑, 能

够达到蓄滞水分的目的, 同时在田间利用管道或沟道对蓄水坑进行灌水, 使水分由坑壁渗入周围土壤, 达到中深层立体灌溉的效果^[4]。蓄水坑的布设增加了土壤与大气的交换界面, 改变了中深层土壤的水、热、氧环境, 在蓄水坑中灌水会进一步影响土壤中的水、热、氧环境。目前, 相关学者针对蓄水坑灌下的土壤水热状况建立了蓄水坑灌下的土壤水热运动机理模型^[6-7], 分析了田间复杂条件下和冻融期蓄水坑灌下土壤的水热运动状况, 为蓄水坑灌的研究提供了理论支撑。然而, 以往研究对蓄水坑灌下土壤氧浓度的研究主要停留在试验研究阶段, 且局限于空间分布特征分析^[4]。与试验研究相比, 数值模拟可以突破时空局限性, 定量分析土壤水、热、氧的空间分布特征。在土壤水热方面, 研究者先后构建了一维、二维、三维的土壤水热耦合模型, 如 HYDRUS 模型^[8], 考虑的因素也逐渐全面。任荣^[9]在考虑根系吸水、温差作用的条件下建立了非等温一、二、三维土壤水热耦合模型。然而, 以往对土壤氧运移模型的研究较少, 且建立的氧运移模型多是一维和二维^[10-11], 少有三维模型的建立。COMSOL 是一款基于偏微分方程的多物理场有限元

收稿日期: 2022-08-13

基金项目: 国家重点实验室开放研究基金项目(IWHR-SKL-202110); 山西省水利科学技术研究与推广项目(2022GM012)

作者简介: 苏媛媛(1997-), 女。硕士研究生, 主要从事土壤水动力学研究。E-mail: suyuan0541@link.tyut.edu.cn

通信作者: 郭向红(1979-), 男。教授, 主要从事节水灌溉理论与技术、水土资源多过程模拟等方面研究。E-mail: guoxianghong@tyut.edu.cn

分析软件,研究者可自由定义并耦合任意数量的偏微分方程,进而实现多个物理场的耦合建模。由于强大的可用性和极高的自由度,COMSOL 软件在研究湿热传递^[12]、水盐运移^[13]和热空气流动^[14]等方面被广泛运用。

【切入点】目前,蓄水坑灌下的土壤水-热-氧耦合模型的构建尚属空白,且蓄水坑灌下的土壤水、热、氧分布是一个典型的三维问题,不能简化为一维或者二维问题。鉴于此,构建蓄水坑灌下的土壤水-热-氧三维耦合模型对于研究蓄水坑的布置和蓄水坑灌对土壤水、热、氧的影响至关重要。【拟解决的关键问题】鉴于此,本研究旨在建立适用于蓄水坑灌条件下的土壤水-热-氧三维耦合运移模型,探究增设蓄水坑和灌水对土壤含水率、土壤温度、含氧量和土壤氧浓度的影响,揭示蓄水坑灌条件下的土壤水-热-氧空间分布特征。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验在山西省农业科学院果树研究所进行,该地位于太谷县西南部,气候类型为温带大陆性季风气候,年平均气温为 9.8 ℃,平均海拔高度为 781.9 m,年平均降水量为 460 mm,无霜期为 175 d。试验区土壤类型以粉(砂)壤土为主,灌溉水源为地下水。

1.2 试验设计和数据测定

1.2.1 试验设计

供试果树为矮砧密植红富士苹果树,株行距 2 m×4 m。为探究增设蓄水坑和蓄水坑灌下灌水过程对土壤水、热、氧的影响,对蓄水坑布置前后和蓄水坑灌灌水前后的土壤水、热、氧状况进行测定。试验于 2020 年 7 月 14—24 日进行,在 7 月 14 日,在未设蓄水坑的区域测定土壤含水率和土壤氧浓度,然后以果树为中心,在距离果树 75 cm 处开挖 4 个直径为 30 cm 的蓄水坑,并使蓄水坑均匀地分布在果树周围,每个坑深度为 40 cm,坑底均采用不透水处理。7 月 16 日再次进行水、氧分布测定,并灌水 113 L,灌水后分别于 7 月 17、24 日进行土壤含水率和土壤氧浓度的测定。

1.2.2 数据测定

1) 土壤含水率:采用 TDR 仪对土壤体积含水率进行测定,取样点 1~6 的布置如图 1(a)所示。自土面垂直向下每隔 20 cm 进行取样测定,取样深度纵向达 100 cm。

2) 土壤氧浓度:采用 OXYTEM 土壤氧测定仪测定土壤氧浓度(土壤氧气占土壤空气体积的比例,

单位为 cm^3/cm^3 或%),测点 1~6 的布置如图 1(a)所示。引入土壤含氧量来表征土壤氧气在土体中的绝对量,计算方法如式(1)所示:

$$V_{O_2} = C_{O_2} \cdot (n - \theta) \cdot \rho, \quad (1)$$

式中: V_{O_2} 为土壤含氧量 (g/cm^3); C_{O_2} 为土壤氧浓度 (cm^3/cm^3); n 为土壤孔隙度 (cm^3/cm^3); θ 为土壤含水率 (cm^3/cm^3); ρ 为氧密度 (g/cm^3)。

3) 土壤温度:采用土壤温度测试仪进行测定,观测期间每 30 min 记录 1 次数据。温度测点 7~11 和探头布置如图 1(b)所示。

4) 气象资料:气象资料从试验地的 ADCON 无线自动气象监测站收集,主要为降水量和大气温度。

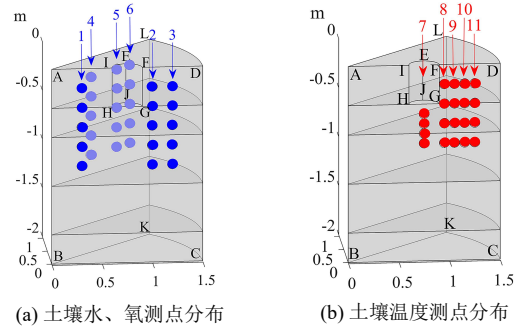


图 1 土壤水、热、氧测点布置

Fig.1 Distribution of soil moisture content, temperature and oxygen concentration measurement points

2 蓄水坑灌土壤水-热-氧三维耦合模型

考虑蓄水坑灌下土壤水、热、氧分布的对称性,在距果树 75 cm 位置处布设蓄水坑,坑半径为 15 cm,深度为 40 cm。

2.1 控制方程

蓄水坑灌下的土壤水-热-氧耦合模型由土壤水分运动方程、土壤热量传输方程和土壤氧传输方程构成,其中土壤水分运动方程和土壤热量传输方程采用 Su 等^[7]建立的蓄水坑灌下土壤水热耦合模型,土壤氧传输方程在忽略根系和微生物的呼吸作用下,将 Ouyang 等^[11]建立的一维土壤氧传输方程拓展为三维土壤氧传输方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}[(n-\theta) + \theta H_{O_2} + (1-n)\omega_{O_2}]C_{O_2} = \frac{\partial}{\partial x} \left[(n-\theta)D_{O_2} \frac{\partial C_{O_2}}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(n-\theta)D_{O_2} \frac{\partial C_{O_2}}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[(n-\theta)D_{O_2} \frac{\partial C_{O_2}}{\partial z} \right] + ReC_{O_2}, \quad (2)$$

式中: t 为时间 (min); H_{O_2} 为氧气溶于水的亨利常数 (cm^3/cm^3); ω_{O_2} 为氧气在土壤颗粒胶体表面的吸附系数 (cm^3/cm^3); D_{O_2} 为扩散系数 (cm^2/min); Re 为土壤充气孔隙度随时间的变化率 ($\text{cm}^3/(\text{cm}^3 \cdot \text{min})$),孔隙度降低时 Re 为负值,反之为正值。 Re 和 D_{O_2} 的计算参考 Ouyang 等^[11]的研究方法确定。

2.2 定解条件

土壤水分运动和热量传输的定解条件与文献[11]一致。土壤氧传输方程的初始条件为实测初始土壤剖面的氧分布。

2.3 模型参数

土壤表面热通量计算参考文献[15]，其他水热参数的取值参见文献[7]。氧气溶于水的亨利常数 H_{O_2} 取为 $6.56 \times 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ；根据 Molz 等^[16]研究结果，氧气在土壤颗粒胶体表面的吸附系数 ω_{O_2} 为 $3.4 \times 10^{-8} \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。

2.4 仿真实现

考虑到蓄水坑灌下的土壤水-热-氧三维耦合模型的复杂性，利用 COMSOL Multiphysics 软件进行多物理场的耦合建模。土壤水分运动建模使用“理查兹方程”接口，同时添加全局方程模拟入渗过程中坑内水量的变化；土壤热量传输建模使用“多孔介

质传热”接口；土壤氧传输建模使用“对流-扩散方程”接口，并根据土壤氧传输方程进行修改。在 COMSOL 中构建几何模型，并进行“较细化”网格剖分，针对坑内和地表边界进行网格细化，输入模型参数并定义定解条件，最后进行模型计算。

3 结果与分析

3.1 模型验证

选取 2 号和 5 号 2 个土壤含水率和氧浓度监测点位，7 号和 9 号 2 个土壤温度监测点位，取灌水后 1 d 和 8 d 的土壤含水率、温度和氧浓度的模拟值和实测值进行对比分析，如图 2 所示。除 2 号点位灌水后 1 d 土壤含水率模拟值较实测值偏大外，其他各点位上的土壤含水率、氧浓度和温度的模拟值与实测值的拟合情况较好。

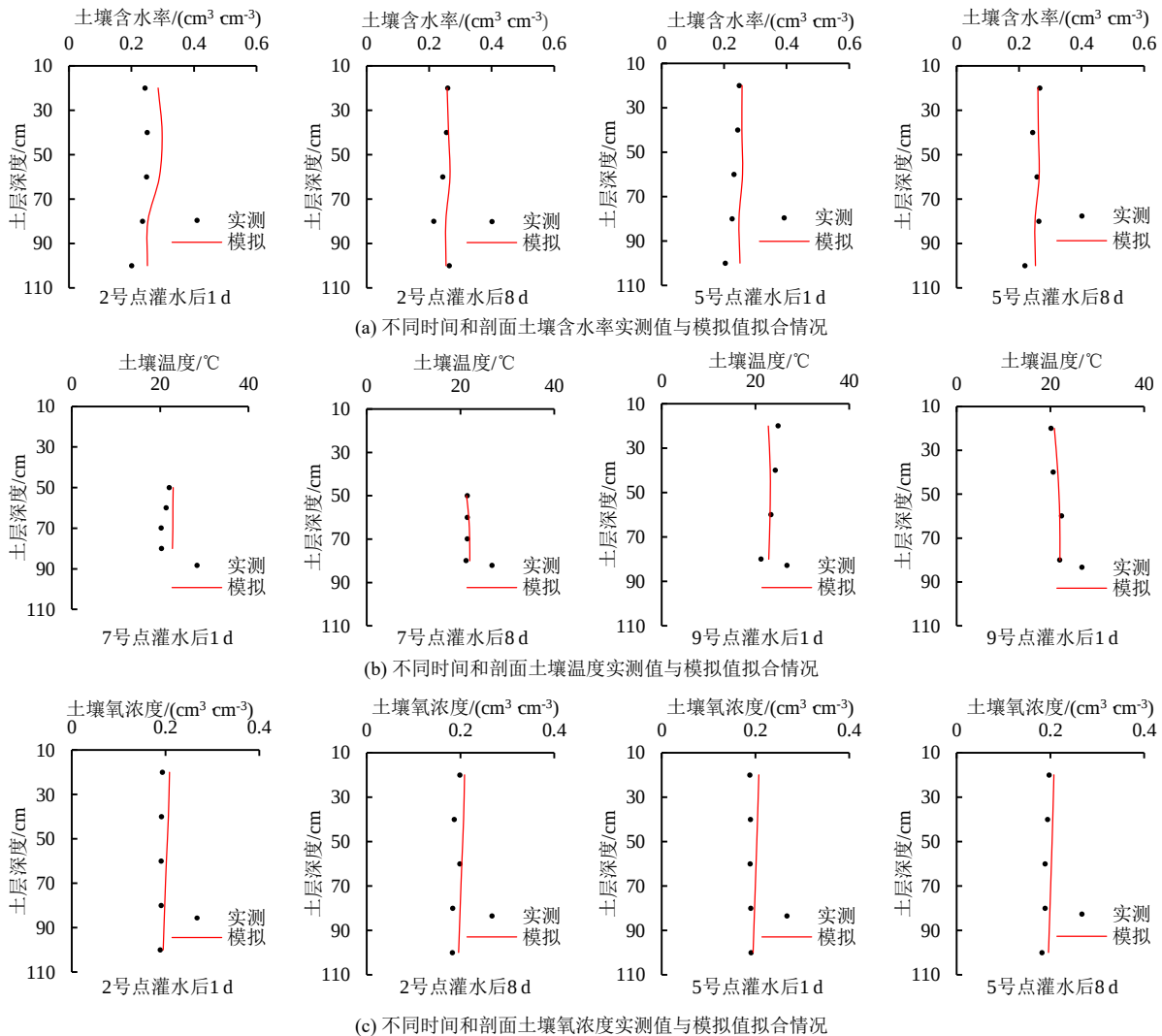


图 2 不同时间和剖面土壤含水率、温度和氧浓度的实测值与模拟值拟合情况

Fig.2 Measured and simulated values of soil moisture content, temperature and oxygen concentration at different times and profiles

为了进一步对模型进行验证，采用均方根误差 RMSE、平均相对误差 MAPE 和平均绝对误差 MAD 对模型的模拟精度进行评价^[7]。选取各测点灌水前、

后 1 d 和 8 d (7 月 16、17、24 日) 的土壤含水率、温度和氧浓度进行精度计算，结果如表 1 所示。蓄水坑灌条件下的土壤水-热-氧三维耦合模型在模拟土

壤含水率、温度和氧浓度方面具有较高的精度, *MAPE* 均低于 15%, 可用于蓄水坑灌果园土壤水、热、氧的分布模拟。

表 1 性能评价

Table 1 Model performance evaluation

指标	<i>RMSE</i>	<i>MAPE</i> /%	<i>MAD</i>
土壤含水率	0.036 7	14.02	0.030 7
土壤温度	1.609 9	6.31	1.374 9
土壤氧浓度	0.013 8	6.76	0.013 0

3.2 蓄水坑布置对土壤水-热-氧的影响

为探究蓄水坑的布置对土壤含水率、温度和氧浓度的影响, 对增设蓄水坑后的土壤水、热、氧分布状况进行模拟, 并选取 $t=0$ 、 $t=0.5$ d 和 $t=1.5$ d 的水、热、氧分布状况进行分析。

图 3 为增设蓄水坑后, 不同时刻的三维土壤含水率、温度、含氧量和氧浓度的分布。未布置蓄水坑时 ($t=0$ d), 土壤含水率随土层深度的增加呈先减少后增大的趋势。土壤温度、含氧量和氧浓度在地表处达到最大, 土壤温度和氧浓度表现为距地表越

远, 值越低。蓄水坑开挖后, 土壤水、热、氧条件在蓄水坑周围发生了明显变化。土壤含水率在坑壁处降低, 且随着时间的推移, 其降低范围逐渐扩大, 在坑壁与地面的交界处 (IEF), 含水率变化速率最快, 而坑底变化缓慢。土壤温度在坑内和地表呈相同的变化趋势, 且土壤温度随大气温度的降低而降低。在 1.5 d 时, 地表和坑壁附近有较明显的温度低值区, 厚度约为 5 cm, 其他区域土壤温度分布同蓄水坑未开挖时相同。蓄水坑增设后, 坑壁和地表处的土壤含氧量增大, 随着时间的推移, 土壤含氧量呈上升趋势, 在 3 个模拟时刻, 最大值分别为 7.89×10^{-5} 、 7.98×10^{-5} 、 8.03×10^{-5} g/cm³。蓄水坑增设后, 坑壁处的土壤氧浓度增大, 整体表现为距离地表和坑壁越远, 土壤氧浓度越低, 且随时间的推移, 氧浓度高值所在区域向下拓展。在模拟时间内, 蓄水坑的布设对土壤含氧量和土壤氧浓度的影响主要发生在地表以下 0~70 cm 土层。

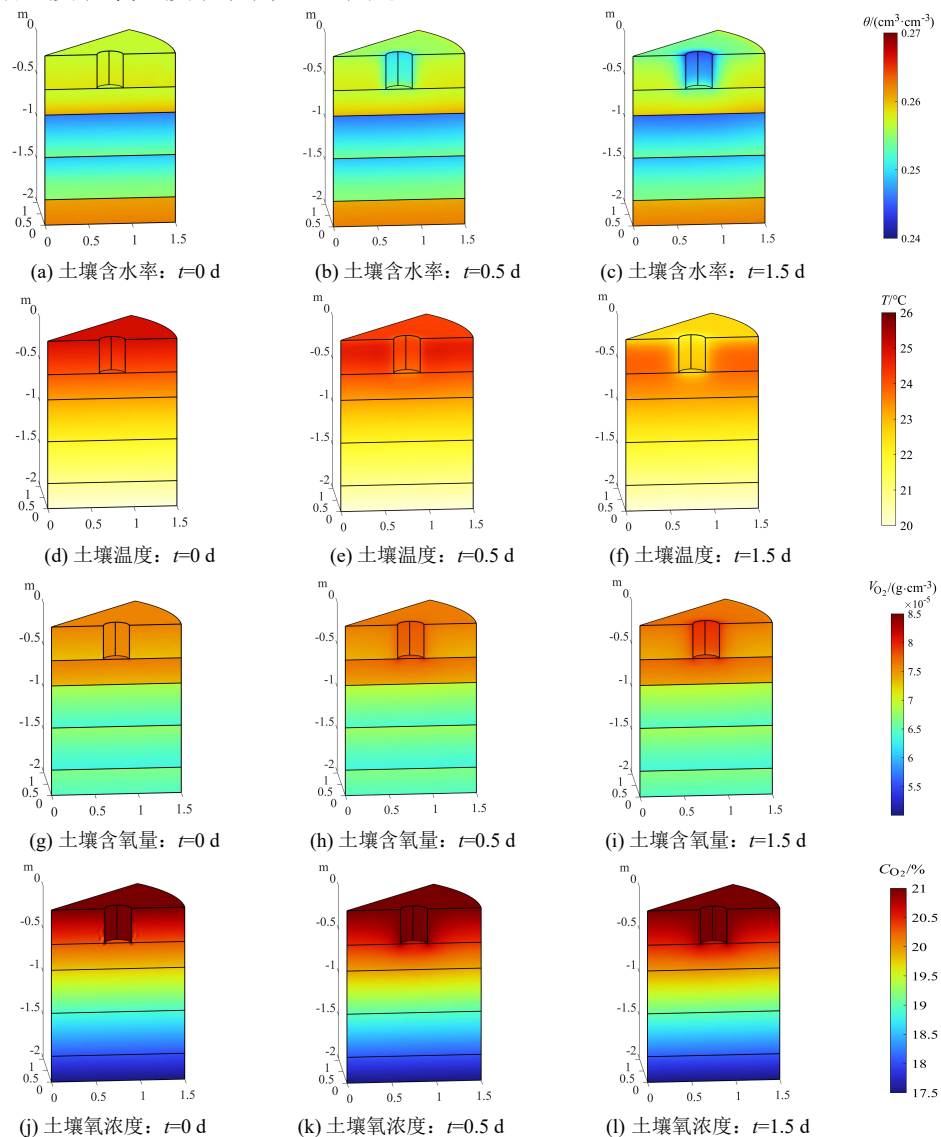


图 3 蓄水坑增设后土壤含水率、温度、含氧量和氧浓度的变化情况

Fig.3 Variation of soil moisture content, temperature, oxygen content and concentration after the addition of water storage pits

3.3 蓄水坑灌水对土壤水-热-氧的影响

为探究蓄水坑灌水对土壤含水率、温度和土壤氧浓度的影响，在 2 d 时灌水 113 L，并对灌水后的土壤水、热、氧分布进行模拟，选取灌水后 0、4、12 h 和 3 d 的水、热、氧空间分布进行模拟分析。

图 4 为灌水后的土壤水分运动情况。灌水后，由于坑底的隔水处理，水分由坑壁进行水平入渗，在灌水后 4 h，土壤含水率逐渐形成以坑底为中心的

椭球状分布。距坑底越远，土壤含水率越低。随着土壤水再分布的进行，含水率最高值逐渐降低，4 个模拟时刻的含水率最高值分别为 0.52、0.43、0.35、0.28 cm^3/cm^3 ，含水率最低值逐渐升高，表明随着土壤水的再分布，土壤含水率趋于均匀。灌水后 3 d，土壤含水率最高值为 0.28 cm^3/cm^3 ，而最低值为 0.25 cm^3/cm^3 。

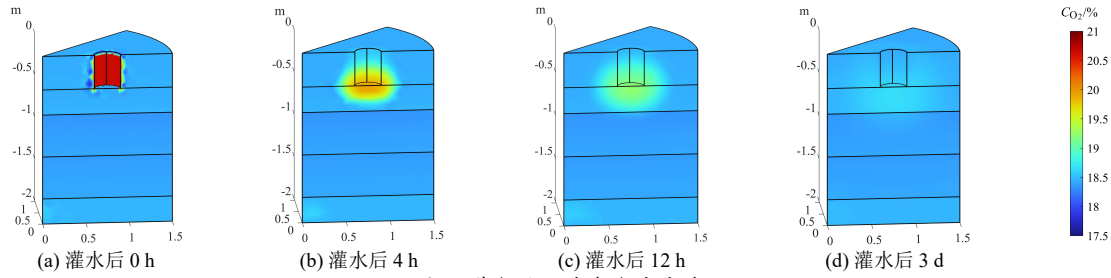


图 4 灌水后土壤含水率分布
Fig.4 Soil moisture movement after irrigation

图 5 为灌水后的土壤温度分布情况。灌水时，坑周围出现了 5 cm 左右的温度低值区。随着时间的推移，温度低值区向下移动，在坑底形成椭球状区域，低值区的范围逐渐扩大，但土壤温度最低值逐渐升高。灌水后 12 h，椭球状区域已消失，表明灌水对土壤温度的影响在灌水后 12 h 时已几乎消失，随后地表和坑周围区域的土壤温度变化主要受大气温度的影响。这是因为灌溉水的温度较低，水的大

量涌入导致坑壁和坑底土壤温度迅速下降，而后随着水分入渗的进行，水温的影响区域不断扩大。相比土壤含水率，灌水对土壤温度影响的持续时间较短，一方面大气温度通过坑壁与土壤温度不断进行热交换，另一方面土壤中水分与土壤骨架不断进行热交换，迅速达到热平衡，因此灌水导致的土壤温度变化很快消失，灌水对土壤温度的影响时长相比含水率更短。

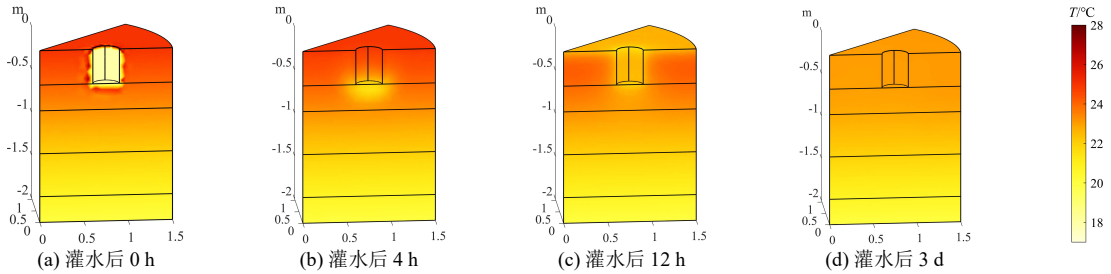


图 5 灌水后土壤温度空间分布
Fig.5 Soil temperature distribution after irrigation

图 6 为灌水后的土壤含氧量变化情况。灌水后土壤含氧量呈与土壤含水率相反的变化趋势，即逐渐在坑底附近形成椭球状的含氧量低值区，且越靠近坑底，含氧量越低。在灌水后 12 h 内，随着时间的推移，土壤含氧量的低值区范围不断扩大，但土壤含氧量的最小值不断增加，从灌水后 4 h 的 $2.61 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^3$ 增加至灌水后 12 h 的 $5.04 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^3$ 。

灌水后 3 d，灌水对土壤含氧量的影响降至最低，坑壁附近 4 cm 左右的土壤含氧量升高。灌水后的土壤含氧量变化与土壤含水率变化趋势相反，这是因为土壤孔隙中包含水和气体 2 部分，灌水过程中水分增加的同时会挤压气体空间，致使土壤含氧量降低，因此灌水后随着水分入渗和含水率高值区的形成，土壤含氧量低值区也相应形成。

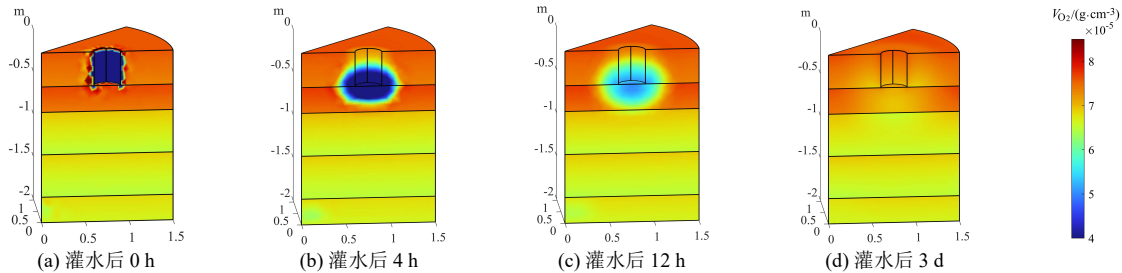


图 6 灌水后土壤含氧量空间分布
Fig.6 Variation in soil oxygen content after irrigation

图 7 为灌水后的土壤氧浓度变化情况。灌水时, 地表和坑壁处氧浓度较高, 其他区域的氧浓度随着土层深度的增加而降低。灌水后, 坑壁和地表土壤氧浓度较高, 其他部分距地表和坑壁越远, 土壤氧浓度越低。随着时间的推移, 土壤氧浓度分布变化不大, 但氧浓度高值区略向下移动。由此可见, 灌

水对土壤氧浓度分布的影响较小, 这是由于灌水后虽然土壤含水率增大, 土壤孔隙减小, 含氧量降低, 但蓄水坑放大了气体的交换界面, 大气中的氧气通过地表和坑壁与土壤氧气不断交换, 地表和坑壁附近的土壤氧浓度逐渐升高, 并不断向深层土壤拓展。

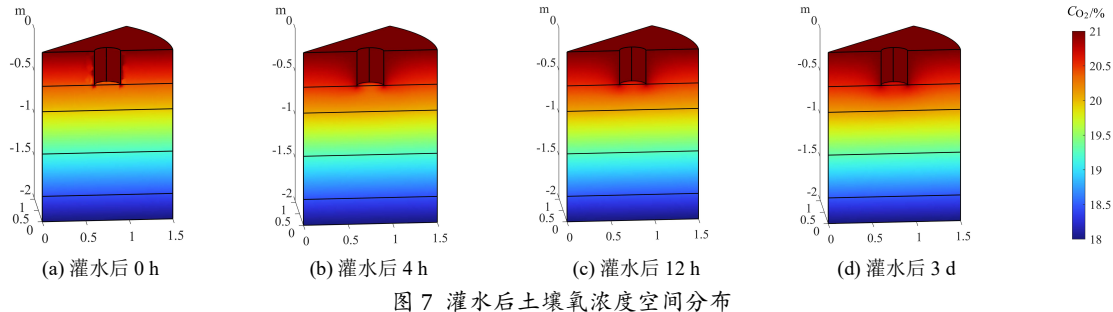


Fig.7 Variation in soil oxygen concentration after irrigation

4 讨论

本研究基于土壤水分运动方程、土壤热量传输方程和土壤氧传输方程, 建立了蓄水坑灌条件下土壤水-热-氧三维耦合模型, 在此基础上分析了增设蓄水坑和蓄水坑灌水对土壤水、热、氧的影响。增设蓄水坑后, 蓄水坑周围土壤水、热、氧发生明显变化。土壤含水率在坑壁处随着时间的推移逐渐降低, 且降低范围逐步扩大; 土壤温度在地表和坑壁附近 5 cm 处变化明显; 土壤含氧量在坑壁处随着时间推移逐渐升高; 土壤氧浓度在地表和坑壁达到最大, 距地表和坑壁越远, 土壤氧浓度越低; 随着时间的推移, 0~70 cm 土层的土壤氧浓度整体升高。增设蓄水坑后, 土壤水、热、氧状态发生变化的主要原因是蓄水坑增加了坑壁处的水、热、氧交换界面^[17]。土壤温度变化与 Su 等^[7]研究结果一致。宋长春等^[18]研究发现, 湿地土壤温度变化与气温变化呈极显著的相关性, 随着土层深度的增加, 相关程度减弱。增加蓄水坑后的土壤温度变化与本研究相符, 蓄水坑增加了热量交换界面, 但土壤温度变化主要受气温影响, 因此蓄水坑对土壤温度的影响有限。蓄水坑灌水后, 水分由坑壁渗入土壤, 土壤含水率形成以坑底为中心的椭球状分布, 距坑底越远, 土壤含水率越低。随着时间的推移, 含水率分布逐渐趋向均匀, 这与 Su 等^[7]研究结果一致。灌水后, 土壤含水率在水平方向上呈椭球状分布, 这是因为坑底隔水布的存在使得水分垂向入渗被抑制, 水平入渗占主导作用。张少文^[4]对果树细根生长的监测结果表明, 地表以下 20~60 cm 土层的果树细根生长最快, 蓄水坑灌有助于驱使土壤水分向作物根区运动, 提高根系吸水 and 水分利用效率。灌水后, 受水温的

影响, 土壤温度在坑底附近形成椭球状低值区, 随着时间的推移, 坑底附近土壤温度趋向均匀, 在灌水后 12 h 低值区已消失, 灌水对土壤温度的影响时长较土壤含水率更短, 表明水热传输过程主要以水分运动为主^[12]。灌水后的土壤含氧量与土壤含水率变化呈相反趋势, 随着水分的入渗, 土壤含氧量形成以坑底为中心的椭球状低值区, 且距坑底越远, 土壤含氧量越高。随着时间的推移, 土壤含氧量分布趋于均匀, 表明土壤含氧量与土壤含水率具有显著的负相关性, 这与朱艳等^[3]研究结果相同。灌水后, 蓄水坑坑壁和地表土壤氧浓度较高, 距地表和坑壁越远, 土壤氧浓度越低。随着时间的推移, 土壤氧浓度分布变化不大, 但氧浓度高值区向下延展。本研究对蓄水坑灌水后的土壤氧浓度分布的模拟结果与路明杰^[17]的研究结果一致; 后者研究表明, 蓄水坑灌水后, 土壤氧饱和度高值区域以蓄水坑为中心向四周递减, 在坑表面上呈“几”字形分布, 相比地面灌溉, 蓄水坑灌更有利于气体扩散, 对于根系的生长更加有利。

本研究所建立的模型是在 Su 等^[7]建立的蓄水坑灌条件下的土壤水、热三维耦合模型和 Ouyang 等^[11]建立的土壤氧一维传输模型的基础上进行拓展所得。相比目前的一维、二维土壤水-热-氧耦合模型, 本研究建立的模型可运用于更加复杂的三维模拟, 但模型中未考虑根系呼吸耗氧, 这与田间实际情况存在一定差异, 对短期土壤氧分布模拟影响不大, 但会对长期土壤氧分布模拟造成一定影响, 因此在后续的研究中应考虑根系呼吸耗氧。

5 结论

1) 基于土壤水分运动方程、土壤热量传输方程

和土壤氧传输方程建立了蓄水坑灌条件下的土壤水-热-氧三维耦合模型, 可用于模拟蓄水坑灌条件下的土壤水、热、氧分布。

2) 蓄水坑增加了土壤水、热、氧与大气的交换界面。增设蓄水坑后, 随着时间的推移, 坑壁处土壤含水率逐渐降低; 坑内和地表土壤温度受气温的影响较大; 增设蓄水坑使土壤含氧量升高, 并在坑壁处升高明显。

3) 蓄水坑灌水后, 土壤水形成以坑底为中心的椭球状含水率高值区, 随着时间的推移, 含水率的空间分布趋于均匀。蓄水坑灌水条件下的土壤温度和含氧量变化与含水率变化呈相反的趋势。蓄水坑灌水对土壤氧浓度的影响较小, 土壤氧浓度在地表和坑壁处较高, 距地表和坑壁越远, 土壤氧浓度越低。

参考文献:

- [1] 卢蕾. 土壤容重和根区增氧对苹果根区土壤环境及平邑甜茶幼苗根系的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2019.
LU Lei. Effects of soil bulk density and root zone aeration on the soil environment of apple root zone and seeding roots of *Malus Hupehensis* Rehd[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2019.
- [2] 朱练峰. 根际氧供应对水稻根系生长的影响及其与产量形成的关系[D]. 北京: 中国农业科学院, 2013.
ZHU Lianfeng. Effect of oxygen content in rhizosphere on root growth of rice(*Oryza sativa* L.) and its relation with yield formation[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2013.
- [3] 朱艳, 蔡焕杰, 宋利兵, 等. 加气灌溉对番茄植株生长、产量和果实品质的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 199-211.
ZHU Yan, CAI Huanjie, SONG Libing, et al. Impacts of oxygation on plant growth, yield and fruit quality of tomato[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 199-211.
- [4] 张少文. 蓄水坑灌条件下土壤氧气分布特征及苹果树细根生长动态研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2019.
ZHANG Shaowen. Study on characteristics of soil oxygen distribution and growth dynamics of fine roots of apple trees under water storage pit irrigation[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2019.
- [5] 崔冰晶, 牛文全, 杜娅丹, 等. 施氮和加气灌溉对黄瓜根区土壤环境及产量的影响[J]. 节水灌溉, 2020(4): 27-32.
CUI Bingjing, NIU Wenquan, DU Yadan, et al. Effects of nitrogen application and aerated irrigation on soil environment and yield in cucumber root area[J]. Water Saving Irrigation, 2020(4): 27-32.
- [6] 王晓磊. 蓄水坑灌条件下果园冻融期土壤水热耦合模拟研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2018.
WANG Xiaolei. Simulation of soil water-heat coupling during orchard freezing and thawing of water storage pit irrigation[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2018.
- [7] SU Y Y, GUO X H, LEI T, et al. Three-dimensional model of soil water and heat transfer in orchard root zone under water storage pit irrigation[J]. Water, 2022, 14(11): 1 813.
- [8] ŠIMŮNEK J, TH M, VAN GENUCHTEN, et al. The HYDRUS Software Package for Simulating Two- and Three Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Porous Media, Technical Manual, Version 3.0, PC Progress, Prague, Czech Republic, 2020.
- [9] 任荣. 非等温条件下土壤水热耦合迁移数值模拟研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2018.
REN Rong. Numerical simulation of coupled soil water and heat transfer under non-isothermal conditions[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2018.
- [10] 范爱武, 刘伟, 刘炳成. 作物生长的土壤中氧气浓度场的稳态数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2003, 24(1): 97-99.
FAN Aiwu, LIU Wei, LIU Bingcheng. Steady numerical simulation on the O₂ concentration field of a vegetation soil bed[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2003, 24(1): 97-99.
- [11] OUYANG Y, BOERSMA L. Dynamic oxygen and carbon dioxide exchange between soil and atmosphere: I. model development[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(6): 1 695-1 702.
- [12] 吴中华, 李凯, 高敏, 等. 稻谷籽粒内部热湿传递三维适体数学模型研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 329-334.
WU Zhonghua, LI Kai, GAO Min, et al. Three dimensional body-fitted mathematical model of rice kernel in hot air drying process[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 329-334.
- [13] 孙雪雁, 李品芳, 李保国, 等. 基于COMSOL的低渗性盐土内设砂柱洗盐定量模拟[J]. 农业机械学报, 2014, 45(7): 111-117, 124.
SUN Xueyan, LI Pinfang, LI Baoguo, et al. Simulation of salt leaching in coastal saline soil denoting sand columns based on COMSOL[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7): 111-117, 124.
- [14] 刘艳阳, 崔亮, 张晔, 等. 基于COMSOL的马铃薯原料库置换通风系统仿真与分析[J]. 中国农机化学报, 2018, 39(10): 65-70.
LIU Yanyang, CUI Liang, ZHANG Ye, et al. Simulation and analysis of displacement ventilation system for potato raw material storage based on COMSOL[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39(10): 65-70.
- [15] 江晴, 李骥洪, 梅建滨. 温室空气-土壤换热系统的数值模拟[J]. 太阳能学报, 2002, 23(2): 227-232.
JIANG Qing, LI Jianhong, MEI Jianbin. Transient simulation of the air-earth heat transfer in greenhouse[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2002, 23(2): 227-232.
- [16] MOLZ F J, WIDDOWSON M A, BENEFIELD L D. Simulation of microbial growth dynamics coupled to nutrient and oxygen transport in porous media[J]. Water Resources Research, 1986, 22(8): 1 207-1 216.
- [17] 路明杰. 蓄水坑灌条件下土壤水-热-气时空分布特征及耦合效应研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2021.
LU Mingjie. Spatial and temporal distribution characteristics and coupling effects of soil oxygen, water and temperature under water storage pit irrigation[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021.
- [18] 宋长春, 王毅勇. 湿地生态系统土壤温度对气温的响应特征及对CO₂排放的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(4): 4 625-4 629.
SONG Changchun, WANG Yiyong. Responses of soil temperature in wetland ecosystem to air temperature and their effects on CO₂ emission[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(4): 4 625-4 629.

Three-dimensional Numerical Simulation of Water, Heat and Oxygen Distribution in Soil in Orchard Irrigated by Water Storage Pit

SU Yuanyuan¹, GUO Xianghong^{1,2*}, HU Feipeng¹, SUN Xihuan¹, MA Juanjuan¹, ZHENG Lijian¹, LEI Tao¹

(1. Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: **【Objective】** Water storage pit is a technology used in arid regions in northwestern China to collect rainwater for irrigation. In this paper, we studied the three-dimensional distribution of water, heat and oxygen in soil in an orchard under water storage pit irrigation using numerical simulation. **【Method】** Water flow was based on the Richard equation and heat transfer and oxygen diffusion in soil were modelled by convection - diffusion equations. These coupled equations were solved using the COMSOL – a Multiphysics software. The model was verified against data measured from a field, and the validated model was then used to analyze the effect of the water storage pit on distribution of water, heat and oxygen in soils in the proximity of the pit. **【Result】** The three-dimensional coupled model is accurate and can reproduce the measured spatiotemporal changes in soil water, temperature and oxygen, with the *RMSE* for soil water, temperature and oxygen being 0.036 7, 1.609 9 and 0.013 8, respectively. The water storage pit changed the distribution of water, heat and oxygen in the pit wall greatly. As time elapsed, soil water content in the regions proximal to the pit decreased, while oxygen concentration increased. Temperatures in the pit and soil surface were mainly impacted by atmospheric temperature. Spatial water distribution was ellipsoidal around the pit. Soil water content was the highest in the proximity of the pit bottom, while oxygen concentration and temperature in this region were the lowest. The distribution of water, temperature and oxygen tended to uniformize as time elapsed, despite that temperature and oxygen are less sensitive to irrigation than soil water. Oxygen concentration decreased with the distance from the soil surface and pit wall. **【Conclusion】** Water storage pit irrigation increased the interface between soil and water, thereby affecting transport of water, heat and oxygen in the soil. Numerical simulations indicated that the dynamics of water, heat and oxygen in the soil was affected by evaporation, rainfall, atmospheric temperature, atmospheric oxygen concentration and other environmental factors.

Key words: water storage pit irrigation; water-heat-oxygen coupling; COMSOL; numerical simulation

责任编辑: 韩 洋