

DOI: 10.11766/trxb202107090356

万华, 高晓东, 赵西宁, 杨敏, 何娜娜, 杨博. 黄土区苹果园土壤剖面水、汽通量模拟研究[J]. 土壤学报, 2023, 60(3): 787–799.
WAN Hua, GAO Xiaodong, ZHAO Xining, YANG Min, HE Nana, YANG Bo. Simulation of Water and Vapor Fluxes in Soil Profile of Apple Orchard in Loess Area[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(3): 787–799.

黄土区苹果园土壤剖面水、汽通量模拟研究*

万 华^{1, 3}, 高晓东^{2, 3†}, 赵西宁^{2, 3}, 杨 敏¹, 何娜娜^{1, 2}, 杨 博¹

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨陵 712100; 2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨陵 712100; 3. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨陵 712100)

摘 要: 黄土疏松多孔且黄土区干旱少雨, 汽态水可能在剖面水分运移中扮演重要角色。因此, 了解非饱和带土壤水汽通量的循环运移规律, 对实现干旱区水资源的可持续发展具有重要意义。基于黄土高原旱地苹果园剖面(0~200 cm)高频定位监测试验, 采用水-汽-热-气耦合的 STEMMUS (Simultaneous Transfer of Energy, Mass and Momentum in Unsaturated Soil) 模型, 探讨黄土剖面液态水和汽态水通量运移规律。结果表明: STEMMUS 模型准确地再现了旱地苹果园剖面土壤水分(d 介于 0.81~0.98, NRMSE 介于 5.5%~15%) 和土壤温度(d 介于 0.98~0.99, NRMSE 介于 1.4%~4.6%) 的动态变化, 对苹果树蒸发蒸腾量的模拟表现出良好的一致性(d 介于 0.92~0.96)。降雨对基质势梯度、温度梯度、液态水与汽态水通量均有显著影响, 液态水与汽态水运移分别主要由基质势梯度与温度梯度驱动, 且二者对土壤水分的最大补给深度在研究期内分别为 100 cm 和 160 cm, 表明土壤水通过向下的汽态水能够运移至更深层土壤。研究结果可增进对黄土剖面水分运移规律的认识。

关键词: 水汽通量; 土壤水运移机制; 土壤水分; 黄土; STEMMUS

中图分类号: S152 **文献标志码:** A

Simulation of Water and Vapor Fluxes in Soil Profile of Apple Orchard in Loess Area

WAN Hua^{1, 3}, GAO Xiaodong^{2, 3†}, ZHAO Xining^{2, 3}, YANG Min¹, HE Nana^{1, 2}, YANG Bo¹

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Ministry of Education Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】The loess area is arid with little rain and the soil is loose and porous. The water vapor in this area may play an important role in profiling water migration. Thus, it is important to study and understand the cyclic migration law of soil water vapor flux in unsaturated zone for realizing the sustainable development of water resources in arid regions. 【Method】To

* 国家自然科学基金项目(41771316)和中国科学院“西部青年学者”A类项目(XAB 2018A04)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41771316) and Class A Project of West Light Foundation of The Chinese Academy of Sciences (No. XAB 2018A04)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: gao_xiaodong@nwfufu.edu.cn

作者简介: 万 华 (1995—), 女, 硕士研究生, 主要从事旱区生态水文过程研究。E-mail: 1591501570@qq.com

收稿日期: 2021-07-09; 收到修改稿日期: 2022-02-28; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2022-04-24

explore the flux transfer rule of liquid water and steam water in loess profile, based on the high-frequency in-situ monitoring test of dryland apple orchard profile (0–200 cm) in Loess area, the simulation of water-vapour-heat-air coupling STEMMUS (Simultaneous Transfer of Energy, Mass and Momentum in Unsaturated Soil) model was adopted in this study. 【Result】 Results show: (1) STEMMUS model reliably reproduced the dynamic changes of soil moisture (d was between 0.81 and 0.98, NRMSE was between 5.5% and 15%) and soil temperature (d was between 0.98 and 0.99, NRMSE was 1.4% and 4.6%) in the profile of dryland apple orchard. This showed good agreement with the simulation of apple tree evapotranspiration (d was between 0.92 and 0.96). (2) Rainfall had significant effects on matrix potential gradient, temperature gradient, liquid water and water vapor flux. The transport of liquid water and vapor water was mainly driven by the matrix potential gradient and temperature gradient, respectively. During the study period, the maximum recharge depths of the soil moisture was 100 cm and 160 cm, respectively, which indicates that soil water could migrate to deeper soil through downward vapor water. 【Conclusion】 STEMMUS model considering soil spatial heterogeneity significantly improves the simulation accuracy and reveals the migration law of water vapor flux in loess profile. The research results can deepen the understanding of water migration in the loess profile.

Key words: Water vapor flux; Soil water transport mechanism; Soil moisture; Loess; STEMMUS

黄土在全球广泛分布, 以我国的黄土高原最具代表性, 具有点楞支架式疏松多孔土壤结构, 孔隙发育好。一般而言, 包气带中液态水和汽态水(或水汽)之间相互转换, 同时发生着蒸发、凝结等相变过程, 引起土壤中的质能变化^[1], 并且将降水、地表水、地下水联系在一起, 是影响地球陆面系统水文循环中水和能量交换和分配的关键参数^[2]。对于全球旱区而言, 土壤中的汽态水运动变化剧烈, 汽态水通量是包气带总水通量的一个重要的组成部分^[3-6]。因此, 研究黄土液态水和汽态水运移过程对深入了解黄土剖面水循环过程具有重要意义。

早在 20 世纪初, Richards^[7]根据土壤水势梯度及其组成, 提出了土壤的连续流动方程(以下简称为 Richards 方程), 但缺少水热耦合运移过程。在干燥条件下, 水汽在很大程度上影响着水热运移。当发生蒸发或凝结时, 水汽运移携带能量, 影响土壤含水率的变化^[8]。之后, Philip 和 de Vries^[9]开发了一个基于 Richards 方程的土壤水汽传输的数学耦合模型, 即 Pdv 模型。Milly^[3]对 Pdv 模型做了进一步修正, 用基质势梯度替换土壤含水量梯度来研究非均质土壤水和水汽的运移机理。也有试验研究发现在干旱地区, 白天太阳辐射使土壤温度升高, 从而使土壤形成温度梯度, 土壤水向地表运移, 蒸发进入大气; 而在夜晚, 土壤温度降低, 土壤水向深层土壤运动^[10]。然而, 曾亦键等^[1]在沙漠发现白天土壤水汽向土壤深层运移, 在晚上向表层土壤运移。可以看到类似试验结果并不一致, 水汽运移规律还需要进一步厘清。事实上, 土壤中的水汽热耦合运

移是一种二相流问题, 并且土壤干空气显著影响着土壤水汽运移^[11]。二相流质热传输模型 STEMMUS 的建立使得传统土壤水汽热耦合运移中的水汽运移机制从简单扩散运移, 发展到对流和弥散运移, 并已得到初步应用^[12-15]。但是考虑土壤干空气对土壤水汽运移影响的黄土剖面土壤液态水和汽态水运移规律的研究鲜有报道。

我国黄土高原不仅是世界上最大的黄土堆积区, 也是全球最大的苹果集中连片栽植区, 栽植面积达 130 万 hm^2 , 占全球的 25%, 其中 80% 为旱作果园^[16]。与刺槐等生态林不同, 苹果树在营养生长和生殖生长阶段表现出显著不同的耗水特征, 特别是在幼果膨大期蒸腾耗水强烈, 通过根系吸水影响土壤水分运移与分布。近 20 年黄土高原苹果栽植面积的迅猛增加不仅改变了果园土壤水文过程, 也深刻影响着区域关键带水循环^[17-18]。因此, 本文基于旱作苹果园的剖面(0~200 cm)土壤水热高频监测数据, 对 STEMMUS 模型进行参数率定和验证; 并采用率定好的模型研究黄土剖面液态水和汽态水通量的运移规律, 为揭示黄土剖面及整个关键带水循环过程提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

田间试验在陕西省子洲县清水沟村现代农业苹果园(37°27' N, 110°20' E)进行。研究区属温带大陆性季风气候, 季节分明。年平均气温 9.1℃, 年平

均降水量 427.5 mm, 季节分布不均, 70%以上集中在 7—9 月, 年平均日照时数 2 633 h (日照百分率高达 60%)。该区土壤以黄绵土为主, 土质疏松。浅层 1 m 处土壤容重平均值为 $1.41 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 田间持水量约 22% (体积含水量)。

1.2 数据来源

实验观测时间为 2018 年 7 月 1 日至 2019 年 10 月 31 日, 在苹果园随机选择长势相当的 3 株果树作为 3 个重复, 对 200 cm 深度的土壤水分和温度进行了原位监测。土壤水分和温度监测采用 ECH₂O-5TM 传感器 (Decagon Devices Inc., USA)。将传感器分别垂直插入土壤剖面 20 cm、60 cm、200 cm 深, 完成后将土壤回填至原地面。采用 EM50 自动记录传感器测量的数据, 监测频率每 10 min 记录一次。同时, 利用烘干法转化的体积含水量 (体积含水量由质量含水量与土壤容重相乘得到) 校正仪器数据。

采用 FLGS-TDP 插针式茎流计 (Dynamax Co., USA) 测量液流速率, 其中包括 12 个带有两个针 (长 10 mm, 直径 2 mm) 的散热探针 (TDP) 和一个

CR1000 数据记录器。TDP 探头安装在距离地面 30 cm 的树主干上, 仪器 30 min 记录一次读数。结合边材液流速率和边材横截面积来计算苹果树的蒸腾量。

土壤蒸发采用自制微型蒸渗仪进行监测。每株果树分别在树下、株间、行间布设 3 个蒸渗仪, 每天下午 6:00~7:00 采用高精度称重仪 (0.01 g) 对微型蒸渗仪内筒进行称重。次日按相同顺序测量, 得出质量差, 结合内桶底面积计算得出逐日蒸发量。微型蒸渗仪内桶换土周期为 3~5 d, 降雨后立即换土。

在苹果树的生育期初和生育期末时分别用环刀采集土壤样品, 其中一部分样品用以测定土壤容重、土壤孔隙度与土壤饱和导水率; 另一部分样品将其风干、研磨, 然后过 2 mm 筛网, 最后采用 MS2000 激光粒度仪 (马尔文法) 测定苹果园的土壤颗粒组成。按土壤学分类标准, 土壤分为砂粒 (0.5~2 mm)、粉粒 (0.02~0.5 mm) 和黏粒 (< 0.02 mm)。果园剖面土壤的理化性质如表 1 所示。

表 1 果园剖面土壤的基本理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of the orchard soil profile

土壤层次 Soil layer/cm	颗粒组成 Particle composition /%			土壤容重 Bulk density/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
	黏粒 Clay ($< 0.02 \text{ mm}$)	粉粒 Silt ($0.02\sim 0.5 \text{ mm}$)	砂粒 Sand ($0.5\sim 2 \text{ mm}$)	
0~20	14.07	53.46	32.47	1.40
20~60	14.10	55.75	30.15	1.43
60~200	12.38	49.09	38.53	1.38

每半小时监测一次设在试验场附近的自动气象站气象资料。实测气象变量包括逐日大气温度 (T)、相对湿度 (RH)、降水量 (P)、太阳辐射 (PAR) 和距地面 2 m 处风速 (D)。采用 LAI-2200C 冠层分析仪 (Li-Cor, USA) 对果树叶面积指数 (LAI) 进行测量, 选择 90°的镜头在果树的 4 个不同方向各测量一次, 冠层分析仪自动计算叶面积指数, 测量间隔为 7~10 d 一次。

在苹果树生育期末, 采用根钻法采集果树的根系, 利用根系扫描仪扫描根系图像, 使用 Delta-t scan 软件 (Delta-T Devices Company, UK) 分析根系图像。根长密度为各土层细根长除以对应层取样土体

积; 细根扫描后用烘箱 80℃烘干, 并用电子天平称重, 获得细根干重; 将各土层细根干重除以对应层取样土体积获得根干重密度; 各土层细根长度与细根干重的比值即为比根长, 取 3 次重复。

1.3 数学模型

STEMMUS (Simultaneous Transfer of Energy, Mass and Momentum in Unsaturated Soil) 模型^[15]是在非饱和土壤水、汽、热耦合运移理论基础上, 耦合了土壤空气运动方程^[19], 使之成功描述了非饱和土壤水-汽-热-气耦合运移过程, 并利用 MATLAB 软件实现数值求解过程^[20]。之后, 在该模型基础上, 研发人员又考虑了植株蒸散发模块, 使之能同时模

拟土壤水分、土壤温度、植物蒸腾及土壤蒸发。

1.3.1 基本方程 在STEMMUS中,考虑到大气与土壤的垂直互动作用过程,采用的是Milly^[3]对Richards方程的修正形式,修正后的土壤水分运动方程表示为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_L \theta_L + \rho_V \theta_V) = -\frac{\partial q_L}{\partial Z} - \frac{\partial q_V}{\partial Z} - S \quad (1)$$

式中, ρ_L 、 ρ_V 分别为液态水和水汽的密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; θ_L 、 θ_V 分别为土壤液态水和气态水体积含水量, $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$; Z 为垂直坐标, 向上为正方向; q_L 、 q_V 分别为土壤液态水和气态水通量, $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$, 向上为正方向; S 为根系吸水的源汇项, s^{-1} 。其中, 液态水通量包括等温液态水通量 (q_{Lh}) 与非等温液态水通量 (q_{LT}), 气态水通量包括等温气态水通量 (q_{Vh}) 与非等温气态水通量 (q_{VT}):

$$q_L = q_{Lh} + q_{LT} = -\rho_L K_{Lh} \left(\frac{\partial h}{\partial Z} + 1 \right) - \rho_L K_{LT} \frac{\partial T}{\partial Z} \quad (2)$$

$$q_V = q_{Vh} + q_{VT} = -D_{Vh} \frac{\partial h}{\partial Z} - D_{VT} \frac{\partial T}{\partial Z} \quad (3)$$

式(2)和式(3)中, h 为土壤水势, m ; T 为土壤温度, $^{\circ}\text{C}$; K_{Lh} 为等温渗透系数, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; K_{LT} 为土壤温度梯度下的水分渗透系数, $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$, D_{Vh} 为土壤基质势梯度下的水汽传导度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; D_{VT} 为土壤中水汽扩散系数, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。

以上为STEMMUS模型的核心数学方程, 蒸发蒸腾模型采用的是FAO推荐的PM公式, 以气象条件为模型输入, 计算参考作物蒸散发, 再利用作物系数间接计算果树蒸腾与土壤蒸发。关于考虑了土壤水-汽-热-气耦合的STEMMUS模型的详细描述, 请参考Zeng等^[15]的文章。

1.3.2 边界条件 本研究以每次模拟开始时测定的土壤湿度和温度为初始条件, 初始土壤空气压力设为大气压力。土壤水分运动上边界设定为大气边界, 包括降雨与土壤蒸发。下边界条件设定为自由排水面。将在土壤剖面上下边界测定的温度作为相应的热传递边界条件。对于干空气运移, 采用实测大气压力作为地面上层条件, 设置土壤-空气压力梯度为零作为底层条件。区域的垂直两侧无通量边界。

1.3.3 模型参数输入 模型参数率定是在实测参数的基础上, 采用试错法对实测的土壤水分特征参数 θ_s 、 θ_r 、 α 、 n 、 K_s 以及作物参数 LAI、 τ 、 $K_{cb_{max}}$ 、 σ 进行优化, 以率定期土壤水分和温度及果树蒸散发的模拟结果确定最优参数。其中, 考虑到土壤垂向变异性, 本研究将每一土层实测土壤水力特性参数输入STEMMUS模型中, 并对每一层土壤水力特性参数进行优化。土壤热性能参数参考Yu等^[13]测定值, 取值见表2。

表2 试验地土壤热特征参数

Table 2 Soil thermal characteristics parameters of the experimental site

参数 Parameters	单位 Unit	参数意义 Meaning	取值 Value
C_w	$\text{Jg}^{-1}\cdot\text{k}^{-1}$	水的比热容	4.18
C_a	$\text{Jg}^{-1}\cdot\text{k}^{-1}$	空气的比热容	1.01
C_q	$\text{Jg}^{-1}\cdot\text{k}^{-1}$	石英的比热容	0.80
C_c	$\text{Jg}^{-1}\cdot\text{k}^{-1}$	其他矿物质的 比热容	0.90
C_o	$\text{Jg}^{-1}\cdot\text{k}^{-1}$	有机质的比热容	1.92

叶面积指数是通过实测苹果树叶面积指数来确定的。为了反映模拟期间苹果 LAI 的连续动态变化, 将实测数据拟合成二次函数进行描述。由于2018年实测 LAI 较少, 在参数优化下取值为 $2\text{ m}^2\cdot\text{m}^{-2}$ 。2019年拟合结果如图1所示。采用Feddes^[21]根系吸水模

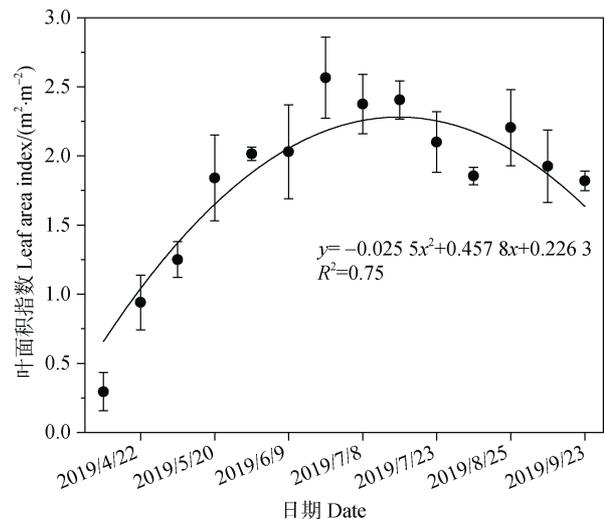


图1 2019年模拟期内苹果树叶面积指数

Fig. 1 Apple leaf area index in the simulation period of 2019

型对植物根系密度分布进行描述, 根据各土层中细根 ($\varphi < 2 \text{ mm}$) 长度的实测数据计算得到苹果树各节点的根长密度数据输入模型中。

1.3.4 空间与时间离散 基于水分、能量和干空气的控制方程, 采用 Galerkin 有限元空间离散方法和全隐式后向差分时间离散方法同时求解三个耦合的偏微分方程。最大迭代次数为 30, 时间步长设定为 1 h。模型模拟为 5 m 深剖面, 将剖面划分为 48 个单元, 3 个观测点。模型率定期为 2018 年 7 月 1 日至 9 月 28 日 (90 d), 验证期为 2019 年 4 月 14 日至 10 月 30 日 (200 d)。

1.3.5 模型评价 为了定量描述 STEMMUS 模型的性能, 采用归一化均方根误差 (normalized root mean square error, NRMSE) 和一致性指数 (agreement of index, d) 来评估实测值与模拟值的差异。

$$\text{NRMSE} = \frac{1}{O_m} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (4)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - O_m| + |O_i - O_m|)^2} \quad (5)$$

式 (4) 和式 (5) 中, P_i 和 O_i 分别为模拟值和实测值; O_m 为实测值均值; i 为测量次数。NRMSE 越小, 表明模型模拟偏差越小; d 越接近 1, 表明模拟结果吻合度越高。

1.4 敏感性分析

基于 OTA 灵敏度分析方法^[22], 评估土壤水力参数和作物参数中不确定性对土壤水分和果树蒸腾模拟的影响。在模型运行时对某一输入参数值增加 10% 和减小 10%, 并采用相对敏感度表示敏感性大小:

$$RS = \frac{[y(x + \Delta x) - y(x)] / y(x)}{\Delta x / x} \quad (6)$$

式中, RS 为相对敏感度, x 为模型某一参数值, Δx 为其改变量, $y(x)$ 为参数改变前模型输出量, $y(x + \Delta x)$ 为参数改变后模型输出量, RS 愈大表示该参数愈敏感, 且假设 $RS > 0.2$ 时, 输出值对输入参

数敏感。

2 结 果

2.1 敏感性特征

土壤水力参数 (θ_s 、 θ_r 、 α 、 n 、 K_s) 和作物参数 (LAI、 τ 、 $K_{cb_{max}}$ 、 σ) 敏感性分析结果如表 3 所示。对于各土层含水量而言, n 和 α 表现为高度敏感, θ_s 只有在 200 cm 土层处的敏感度略微大于 0.2, 表现为轻度敏感。而 θ_r 和 K_s 的相对敏感度均低于 0.2, 敏感性较低。可见 n 和 α 是影响土壤水分运移的主要参数。作物参数中, 除 σ 敏感性较低外, 其余参数对模拟结果均有影响, 其中 LAI 和 $K_{cb_{max}}$ 对土壤含水量的输出最为敏感, 表明植物生长对土壤水分运移影响剧烈。对于苹果树蒸腾而言, θ_s 、 θ_r 、 α 、 n 和 K_s 变化对蒸腾输出没有影响 (表 3), 但是 n 对蒸腾输出敏感性较高。作物参数中, 除 τ 之外, 影响最大的是 $K_{cb_{max}}$, 其次是 LAI 和 σ , 且敏感度均高于土壤水力参数。

2.2 土壤水分的率定与验证

基于 STEMMUS 模型对旱地苹果园剖面不同埋深的土壤含水量进行了模拟计算, 并将其模拟值与苹果树根区不同土层深度 (20 cm、60 cm、200 cm) 的实测值进行了比较 (如图 2 所示)。由图 2 可以发现, 无论在率定期还是验证期, STEMMUS 模型均能较好地捕捉各层土壤水分动态变化过程, NRMSE 值在 5.5%~15% 之间, 一致性指数 d 在 0.81~0.98 之间, 并且随土层深度增加, 模拟误差显著降低。

2.3 土壤温度的率定与验证

不同土层的土壤温度模拟值与实测值如图 3 所示, 0~20 cm 的土壤温度最高, 变化剧烈, 表现出明显的日变化和季节性变化规律。随着土层深度增加, 土壤温度及其波动幅度逐渐降低。无论是在率定期还是验证期, 在测量深度 20、60 以及 200 cm 处, STEMMUS 模型模拟的土壤温度与对应实测的土壤温度结果几乎一致, STEMMUS 模型完美地再现了这些变化规律。在率定期, 不同土层深度的温度模拟值与实测值之间的 NRMSE 和 d 分别介于 1.4%~3.0% 和 0.98~0.99; 验证期内的 NRMSE 介于 3.2%~4.6%, d 均为 0.99。

表 3 模型参数对各土层土壤含水量和果树蒸腾量的相对敏感度

参数 Parameters	意义描述 Meaning	参数对各土层土壤含水量的相对敏感度 Relative sensitivity of parameters to the soil moisture content of each soil layer			参数对苹果树蒸腾的相对敏感度 Relative sensitivity of parameters to apple tree transpiration
		20 cm	60 cm	200 cm	
θ_s	饱和导水率	0.150 4	0.156 1	0.249 2*	0
θ_r	残余含水量	0.184 4	0.166 5	0.137 2	0
α	经验参数	0.341 2*	0.337 3*	0.377 7*	0
n	曲线形状	0.217 8*	0.253 1*	0.972 1*	0.280 2*
K_s	饱和导水率	0.175 9	0.186 1	0.021 9	0
LAI	叶面积指数	0.227 3*	0.275 4*	0.369 5*	0.817 8*
τ	消光系数	0.275 5*	0.243 1*	0.143 2	0
$K_{cb_{max}}$	最大作物系数	0.218 2*	0.232 2*	0.291 7*	1.000*
σ	拟合系数	0.151 4	0.154 2	0.153 4	0.577 3*

注：*表示相对敏感度大于 0.2。Note: *represents the relative sensitivity is greater than 0.2.

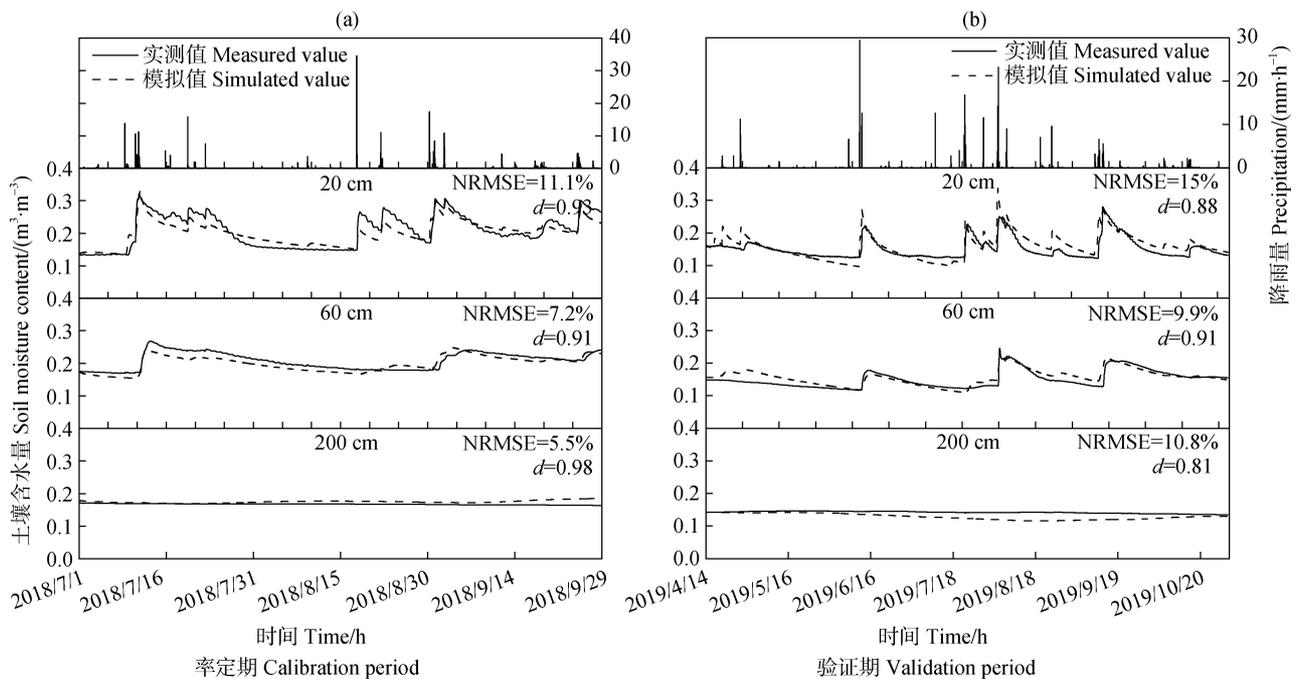


图 2 试验期土壤剖面不同埋深的含水量实测值与模拟值对比

Fig. 2 Comparison of measured and simulated soil profile moisture content at different depths in the experimental period

2.4 苹果树蒸发蒸腾量的率定与验证

试验期内不同生长阶段果树蒸发蒸腾量的模拟值与实测值的变化动态如图 4 所示。由于果树的蒸发蒸腾对气象条件、冠层等因素较为敏感，如发生降雨时果树的蒸发蒸腾量会迅速减小，因此果树蒸

发蒸腾量随时间的变化较为剧烈，波动频繁。2018 年、2019 年试验期间实测总蒸发蒸腾量分别为 225.2 mm 和 456.8 mm，该时期内测定的降雨量分别为 404.8 mm 和 526.2 mm。因为天气等原因，试验期间土壤蒸发未能连续测定，使得蒸发蒸腾量的模

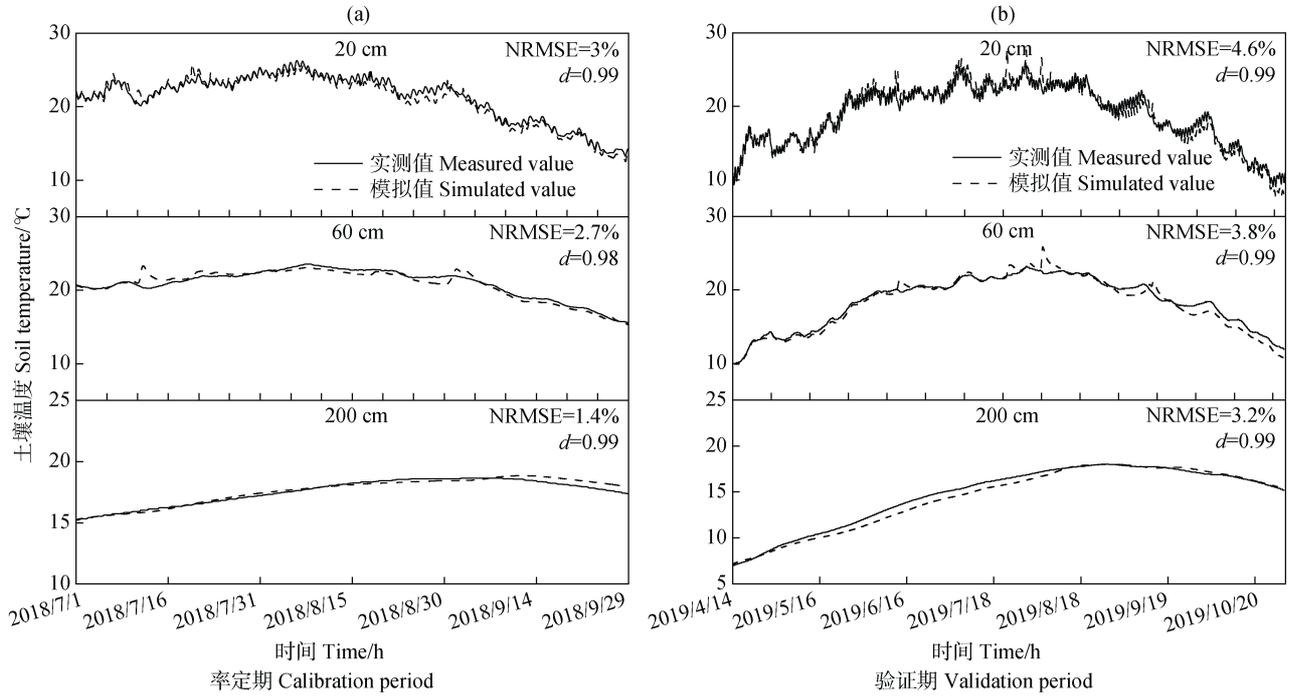


图 3 试验期不同深度土壤剖面温度的实测值与模拟值对比

Fig. 3 Comparison of measured and simulated soil profile temperature at different depths in the experimental period

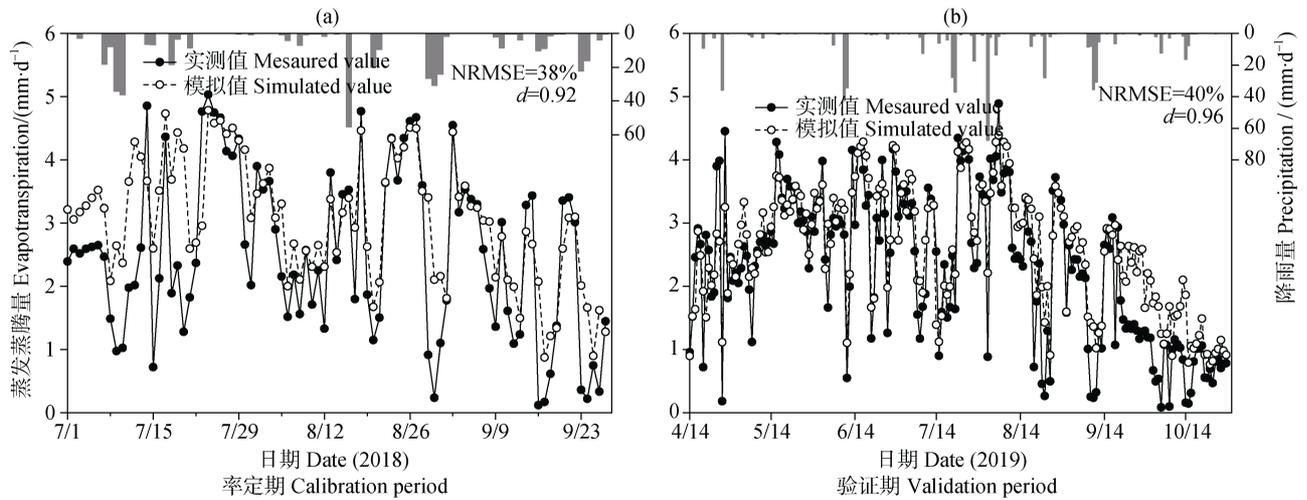


图 4 试验期苹果树蒸发蒸腾量的实测值与模拟值对比

Fig. 4 Comparison of measured and simulated evapotranspiration of apple trees in the experimental period

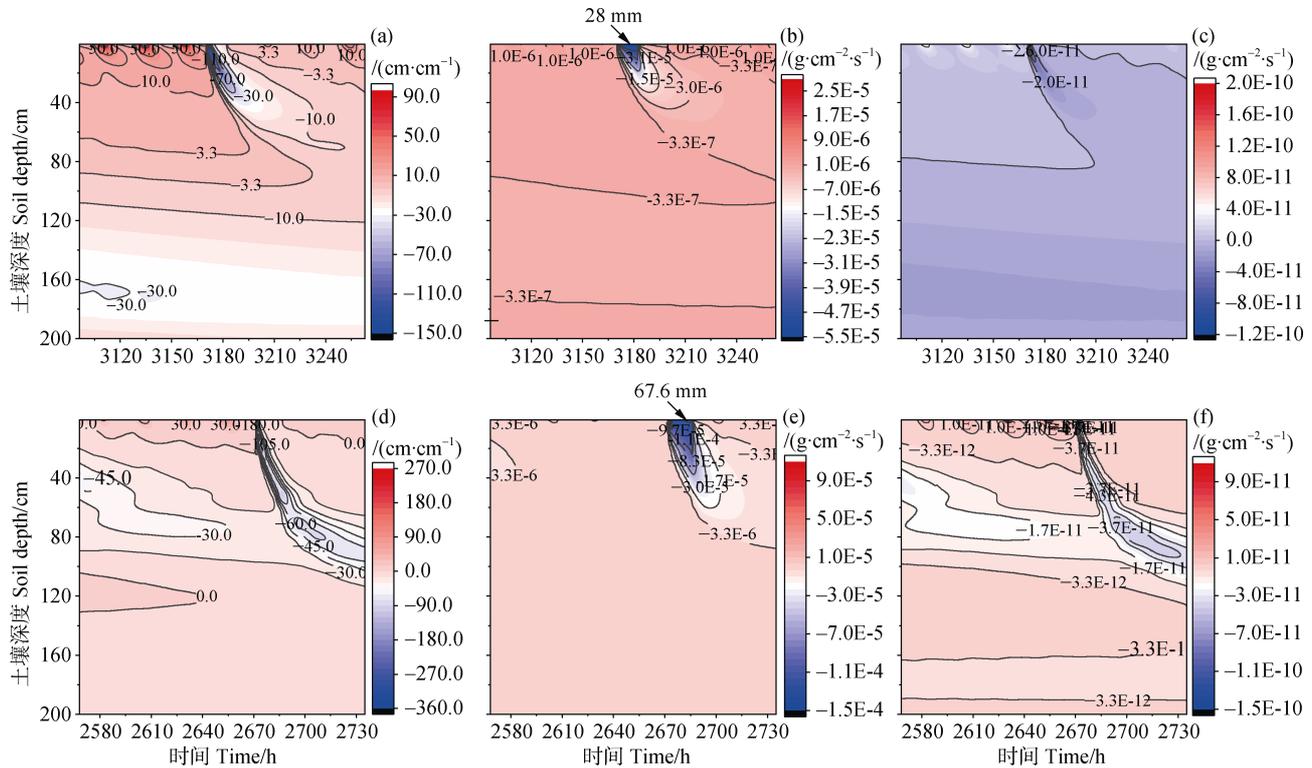
拟存在误差。整体上，蒸发蒸腾量的模拟值与实测值之间偏差不大，2018 年和 2019 年的 NRMSE 分别为 38%和 40%，*d* 值分别达到 0.92 和 0.96，结果表明模型模拟的日蒸发蒸腾量与实测值的吻合度较高，表现出良好的一致性。

2.5 不同降雨梯度下土壤液态水和汽态水通量模拟

剖面土壤水分和温度的良好模拟结果为土壤液

态水和汽态水通量模拟提供了重要保障。选择验证期不同降雨梯度下连续 168 h 的数据来分析不同驱动机制下土壤水分和水汽通量时空变化规律。其中，不同降雨梯度为 28 mm·d⁻¹ 和 67.6 mm·d⁻¹，对应时间段分为模拟期的第 3 096 至 3 263 h 和第 2 568 至 2 735 h。

2.5.1 基质势梯度下等温液态水与汽态水通量 图 5 展示了 28 mm·d⁻¹ 和 67.6 mm·d⁻¹ 降雨梯度下的基质



注: (a)(b)(c) 分别为 $28 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 降雨梯度下基质势梯度、等温液态水通量和等温气态水通量的时空变化; (d)(e)(f) 分别为 $67.6 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 降雨梯度下基质势梯度、等温液态水通量和等温气态水通量的时空变化。Note: (a)(b)(c) are the spatiotemporal variations of matrix potential gradient, isothermal liquid water flux and isothermal vapor water flux under rainfall gradient of $28 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$, respectively. (d)(e)(f) are the spatiotemporal variations of matrix potential gradient, isothermal liquid water flux and isothermal vapor water flux under rainfall gradient of $67.6 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$, respectively.

图5 不同降雨梯度下基质势梯度及其影响下的液态和气态水通量的时空变化

Fig. 5 The spatiotemporal changes of matrix potential gradient under different rainfall gradients and liquid water flux and vapor water flux under the influence of matrix potential gradient

势梯度及等温液态水与气态水通量的时空变化。由图 5 a 和 图 5d 可见, 降雨前, 土壤基质势梯度在地表变化最为剧烈, 存在明显的日变化规律, 但随着深度增加, 变化迅速变缓。0~20 cm 土层, 两个降雨梯度下的基质势梯度分别在 $5.949 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-1} \sim 115.5 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-1}$ 和 $0.956 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-1} \sim 84.87 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-1}$ 之间变化; 20 cm~80 cm 土层, 其变化范围分别缩小至 $-1.05 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-1} \sim 13.15 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-1}$ 和 $-50.31 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-1} \sim 0.772 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-1}$ (负号代表方向向下, 下同); 80 cm 土层以下, 基质势梯度均趋于稳定, 变化平缓。降雨时短时间内 0~80 cm 土层梯度急剧降为负值。且随着降雨梯度的增加, 降雨对基质势梯度的影响也逐渐加深, 分别为 80 cm 和 120 cm, 所产生的最小基质势梯度分别为 $-147.3 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-1}$ 和 $-358.5 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。

两个降雨梯度下的等温液态水通量时空变化如

图 5b 和图 5e 所示。降雨前, 两个降雨梯度下 0~200 cm 土层内存在正向的等温液态水通量, 由土壤深层向表层运移, 但其值变化较小甚至接近于零通量。说明无降雨时土层内几乎不存在液态水运移过程。降雨时, 可明显看到不同降雨梯度下 0~60 cm 土层内等温液态水通量急剧增加, 其中 $67.6 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 降雨梯度下的液态水通量最小, 为 $-2.04 \times 10^{-4} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。随着降雨梯度的增加, 等温液态水通量最大运移深度也从 60 cm 增加至 100 cm。

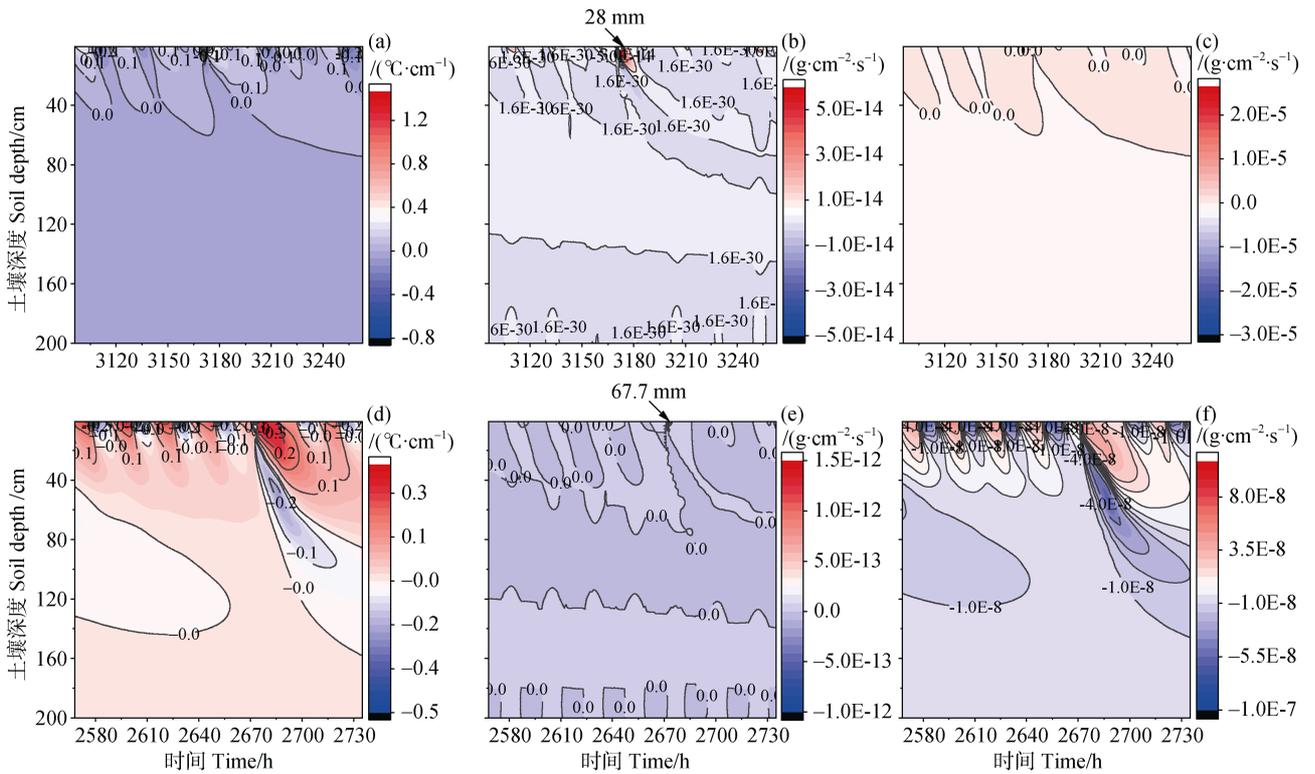
图 5c 和图 5f 为两个降雨梯度下的等温气态水通量等值线图。由图可见, 不同降雨梯度下的基质势梯度对包气带的蒸汽运移有显著影响。降雨前, 表层通量波动较为频繁, 且在 0~20 cm 土层中存在与基质势梯度相似的日变化规律。降雨发生时, 气态水通量变化剧烈, 在 0~60 cm 土层尤为明显, 并

且产生了向下运移的等温汽态水通量,但其值较小,不同降雨梯度下最小通量值分别为 $-7.88 \times 10^{-9} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $-1.56 \times 10^{-10} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。然而 $67.6 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 降雨梯度下的等温汽态水通量向下运移的深度可达到 120 cm 左右,超过液态水通量的 100 cm。对比两者数量大小,等温液态水通量较等温汽态水通量差不多高出 5 个数量级,说明受基质势梯度驱动运移的通量主要以等温液态水通量为主。

2.5.2 温度梯度下非等温液态水与汽态水通量 不同降雨梯度下土壤温度梯度的时空变化规律如图 6a 和图 6d 所示。降雨前,0~40 cm 土层的温度梯度存在明显的日变化规律,白天上升梯度约为 $0.2 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{cm}^{-1}$,夜晚下降梯度约为 $-0.2 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。

因此,0~40 cm 是最活跃的热交换层。降雨时,不同降雨梯度下的土壤温度均在短时间迅速降低,最小的温度梯度分别为 $-1.6 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{cm}^{-1}$ 和 $-0.5 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{cm}^{-1}$;热交换层深度随着降雨量的增大也分别延展至 80 cm 和 160 cm,表明降雨量对土壤温度时空变化的影响显著。

图 6b 和图 6e 为两个降雨梯度下的非等温液态水通量等值线图,可见降雨前非等温液态水通量在整个剖面很小,几乎为 0,可以忽略不计。在发生降雨时产生了负向的非等温液态水通量,不同降雨梯度下的通量值分别为 $-5 \times 10^{-14} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $-1.43 \times 10^{-13} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,可发现在强降雨的情况下非等温液态水通量依然很小,可忽略不计。



注：(a)(b)(c)分别为 $28 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 降雨梯度下温度梯度、非等温液态水通量和非等温汽态水通量的时空变化；(d)(e)(f)分别为 $67.6 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 降雨梯度下温度梯度、非等温液态水通量和非等温汽态水通量的时空变化。Note, (a)(b)(c) are the spatiotemporal variations of the soil temperature gradient, thermal liquid water flux and thermal vapor water flux under rainfall gradient of $28 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$, respectively. (d)(e)(f) are the spatiotemporal variations of the soil temperature gradient, thermal liquid water flux and thermal vapor water flux under rainfall gradient of $67.6 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$, respectively.

图 6 不同降雨梯度下温度梯度及其影响下的液态和汽态水通量的时空变化

Fig. 6 The spatiotemporal changes of soil temperature gradient under different rainfall gradients and liquid water flux and vapor water flux under the influence of soil temperature gradient.

非等温汽态水通量时空变化如图 6c 和图 6f 所示。0~40 cm 土层非等温汽态水通量存在与温度梯

度相似的日变化规律。此外降雨引起了向下的非等温汽态水通量显著增加, $28 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $67.6 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 降雨

梯度下的最小通量值分别为 $-2.34 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $-1.24 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在 $67.6 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 强降雨梯度下,非等温汽态水通量运移深度可达160 cm,远超出液态水的运移深度。由图6b和图6e可知不同降雨梯度下非等温汽态水通量较非等温液态水通量高6个数量级,表明土壤温度梯度驱动下的水汽通量主要以非等温汽态水通量为主。

3 讨论

3.1 STEMMUS模型对土壤水分和温度的模拟性能

土壤干空气对土壤水分运移会产生不可忽略的影响^[13]。因此,与传统水热耦合模型相比,考虑干空气机制的二相耦合模型STEMMUS的理论误差会显著降低。如杨博等^[20]研究表明相比较单相模型而言,考虑干空气机制的二相耦合模型的模拟值与实测值更为接近。对于存在有压入渗等现象的地区,二相耦合模型STEMMUS能更好反映实际的土壤水分运移过程。本研究采用STEMMUS模型对苹果园0~200 cm土层的水分与温度进行模拟,结果显示表明归一化均方根误差NRMSE分别介于5.5%~15%和1.4%~4.6%之间, RMSE分别介于 $0.003 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ~ $0.023 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 0.24°C ~ 0.87°C 之间。与Zeng等^[15]和杨博等^[20]的结果相比,模拟误差显著降低,比如Zeng等^[15]利用STEMMUS模型对西北沙漠地区0~50 cm土层的水分和温度进行模拟,均方根误差RMSE分别介于 $0.005 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ~ $0.026 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 1.532 ~ 4.135°C 之间;杨博等^[20]基于STEMMUS模型对黄土区苹果园0~80 cm土层的水分和温度进行模拟,归一化均方根误差NRMSE分别介于4.7%~30%和0.1%~9.9%。这主要是因为上述两位学者的模拟均基于土壤质地均一的假设,但实际上土壤并不均匀,土层间存在较大的垂向变异性。本研究考虑土层之间土壤水力特性的垂向变异性,对每一层土壤水力特性参数进行优化,土壤水分和温度的模拟效果得到了显著地提高,尤其是针对土壤深剖面的模拟(图2和图3)。值得注意的,在率定期间,降雨高峰时期0~20 cm土层实测土壤含水量的峰值被高估了。通常情况下,由于土壤具有较高的渗透能力和饱和导水性导致雨水快速运移,因此,

实测土壤含水量偏高^[23]。此外,由于石头和树根对土壤造成的一些干扰,以及测量误差,可能也导致了降雨事件期间测量值和模拟值之间的细微差异。总体而言,考虑土壤垂向变异性的STEMMUS模型在大部分监测时期内准确地再现观测的土壤水分和土壤温度,对黄土区苹果园深剖面水热动态变化具有较高的模拟精度,有助于充分理解苹果园深剖面土壤水分和温度时空变化规律。

3.2 土壤水分通量和水汽通量运移

包气带的水分和水汽输送对于干旱半干旱地区近地面环境的整体水和能量平衡起着关键作用^[24-27]。本研究发现土壤基质势梯度和温度梯度表现出明显的日变化规律,前者白天大于晚上,且均为正,而后者白天为正,晚上为负。因此,在基质势梯度的驱动下,土壤只存在正向的等温液态水通量(图5),表明0~20 cm以内的部分液态水可以转变为汽态水,然后向土壤表面移动。因而,液态水的实际蒸发(相变)很可能发生在0~20 cm的深度内。但非等温液态水通量非常小可忽略不计(图6),这可能是因为非等温液态水通量不仅受温度梯度驱动,还受到重力势的作用^[28]。由于汽态水通量的重力势可忽略不计,在基质势梯度和温度梯度的驱动下,等温和非等温汽态水通量在0~10 cm土层表现出与之相似的日变化规律,等温汽态水通量向表层运移,非等温汽态水通量白天向近地表运移而晚上向较深土层运移(图5和图6)。相对较高幅度的汽态水通量在0~10 cm之间,可能归因于干旱期间近地表的土壤含水量低且温度较高。这也解释了大气与土壤表面交界面的水汽浓度较高或急剧变化的温度梯度。此外,降雨在短时间内会导致各驱动梯度下的液态水和汽态水通量向下显著增加,其中等温液态水通量较等温汽态水通量平均高出5个数量级,而非等温汽态水通量平均高于非等温液态水通量6个数量级(图5和图6)。因此,液态水通量主要由基质势梯度驱动,而汽态水通量主要由温度梯度驱动,这与曾亦健等^[29]的研究结论一致。在降雨的影响下,各驱动力下的水通量由表层向土壤深层运移补给深层土壤水分,随着降雨量的增加其补给深度也增大。更值得注意的是汽态水通量的最大运移深度(160 cm)远大于液态水(100 cm),表明研究区深层土壤的水分补给可能主要由汽态水的运移实现。

一般而言,黄土高原地区降雨少且分布集中,多以蒸发等形式损失,入渗受到限制。李玉山^[30]研究发现降雨对土壤水分的作用十分强烈,例如,在 400~600 mm 降雨区,年降雨最大入渗深度为 100~300 cm,在丰水年份最大可达 500 cm;张义等^[31]认为长武塬面果园土壤水分下渗深度可达 260 cm 左右。其他研究也表明,一旦植被建立起来,降雨就极少能补给 2 m 以下的水分^[32-33]。在本研究中,无论是非等温汽态水通量还是等温汽态水通量,其运移深度均超过液态水通量,土壤水分最终通过向下的汽态水通量输送至更深层。Saito 等^[5]也发现,在干旱气候的沙质土壤中,汽态水通量对水通量动态的影响很大。Du 等^[26]也表明汽态水的运移是沙漠包气带总水通量系统中最重要的一部分,来自土壤温度梯度的非等温汽态水通量几乎包含了沙漠包气带的总水通量。以上研究表明汽态水通量对黄土区深层水的补给作用不容忽视。此外,果树根系也是影响土壤水分运移的重要因素,不同的土壤水分状况会刺激果树根系调整其形态、生理及代谢特征,促进根系发育,增加土壤孔隙度,提升土壤的入渗性能,促进土壤水下渗运移,调节土壤剖面的水量平衡^[34]。在干旱情况下,植物通过根系吸水改变土壤水向下运移的路径,甚至阻断土壤水分下渗运移过程^[35-36]。随着果树年龄增加,细根在深层土壤中所占的比例逐渐增加^[37],表明根系吸水深度逐渐加深,土壤水分入渗深度随之降低。可见,对于多年生深根系的苹果树而言,根系对土壤水通量运移的影响不可忽略,未来可进一步研究其影响的内在机制。

4 结 论

本研究采用土壤水-汽-热-气耦合的 STEMMUS 模型,以黄土区旱地苹果园为例,结合实测的剖面土壤水分、温度以及果树蒸发蒸腾数据,对黄土剖面水、汽通量的运移进行了模拟研究。发现考虑土壤垂向变异性的 STEMMUS 模型很好地再现了田间的黄土剖面土壤水分和温度的动态变化,果树蒸发蒸腾量的模拟也表现出良好的一致性,这表明该模型是分析黄土土壤水、汽通量的可靠工具。基于此模型,进一步发现土壤基质势梯度和土壤温度梯度及其等温和非等温汽态水通量存在明显的日变化规

律。且液态水通量主要由基质势梯度驱动,汽态水通量主要由温度梯度驱动;降雨对基质势梯度、温度梯度以及液态水、汽态水通量的运移均有显著影响,液态水通量和汽态水通量对深层土壤的最大补给深度分别为 100 cm 和 160 cm,表明汽态水可能是黄土深层土壤水补给的重要组成。

参考文献 (References)

- [1] Zeng Y J, Wan L, Su Z B, et al. The diurnal pattern of soil water fluxes in subsurface zone and its simulation analysis[J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15 (5): 330—343. [曾亦键, 万力, 苏中波, 等. 浅层包气带水汽昼夜运移规律及其数值模拟研究[J]. *地学前缘*, 2008, 15 (5): 330—343.]
- [2] Chatterjee D, Nayak A K, Vijayakumar S, et al. Water vapor flux in tropical lowland rice[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2019, 191 (9): 550.
- [3] Milly P C D. Moisture and heat transport in hysteretic, inhomogeneous porous media: A matrix head-based formulation and a numerical model[J]. *Water Resources Research*, 1982, 18 (3): 489—498.
- [4] Huang J T, Hou R Z, Yang H B. Diurnal pattern of liquid water and water vapor movement affected by rainfall in a desert soil with a high water table[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 75 (1): 1—16.
- [5] Saito H, Šimůnek J, Mohanty B P. Numerical analysis of coupled water, vapor, and heat transport in the vadose zone[J]. *Vadose Zone Journal*, 2006, 5 (2): 784—800.
- [6] Garcia Gonzalez R, Verhoef A, Luigi Vidale P, et al. Incorporation of water vapor transfer in the JULES land surface model: Implications for key soil variables and land surface fluxes[J]. *Water Resources Research*, 2012, 48 (5) .
- [7] Richards L A. Capillary conduction of liquids through porous mediums[J]. *Physics*, 1931, 1 (5): 318—333.
- [8] 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.
- [9] Philip J R, de Vries D A. Moisture movement in porous materials under temperature gradients[J]. *Transactions, American Geophysical Union*, 1957, 38 (2): 222.
- [10] Liu B C, Liu W, Li Q L. Experimental studies on the influences of temperature on moisture transport in unsaturated porous soil[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition)*, 2006, 34 (4): 106—108. [刘炳成, 刘伟, 李庆领. 温度效应对非饱和土壤中湿分迁移影响的实验[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2006, 34(4): 106—108.]
- [11] Schrefler B A, Zhan X Y. A fully coupled model for water

- flow and airflow in deformable porous media[J]. *Water Resources Research*, 1993, 29 (1): 155—167.
- [12] Zeng Y J, Su Z B, Wan L, et al. Numerical analysis of air-water-heat flow in unsaturated soil: Is it necessary to consider airflow in land surface models? [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2011, 116 (D20): D20107.
- [13] Yu L Y, Zeng Y J, Su Z B, et al. The effect of different evapotranspiration methods on portraying soil water dynamics and ET partitioning in a semi-arid environment in Northwest China[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016, 20 (3): 975—990.
- [14] Yu L Y, Zeng Y J, Su Z B. Understanding the mass, momentum, and energy transfer in the frozen soil with three levels of model complexities[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2020, 24 (10): 4813—4830.
- [15] Zeng Y J, Su Z B, Wan L, et al. A simulation analysis of the advective effect on evaporation using a two-phase heat and mass flow model[J]. *Water Resources Research*, 2011, 47 (10) .
- [16] Gao X D, Zhao X N, Wu P T, et al. The economic-environmental trade-off of growing apple trees in the drylands of China: A conceptual framework for sustainable intensification[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 296: 126497.
- [17] Yang L, Zhang Z H, Li Z S. Effects of large-scale re-vegetation on soil desiccation in the Loess Plateau: Problems and perspectives[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39 (20): 7382—7388. [杨磊, 张子豪, 李宗善. 黄土高原植被建设与土壤干燥化: 问题与展望[J]. *生态学报*, 2019, 39 (20): 7382—7388.]
- [18] Zhang Z Q, Li M, Si B C, et al. Deep rooted apple trees decrease groundwater recharge in the highland region of the Loess Plateau, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 622/623: 584—593.
- [19] Thomas H R, Sansom M R. Fully coupled analysis of heat, moisture, and air transfer in unsaturated soil[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1995, 121 (3): 392—405.
- [20] Yang B, Zhao X N, Gao X D, et al. Simulation of water and heat process in loess by incorporating dry air-flow mechanism—A case study of an apple orchard on mountain[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58 (2): 401—411. [杨博, 赵西宁, 高晓东, 等. 耦合干空气机制的黄土水热运移过程模拟——以山地苹果园为例[J]. *土壤学报*, 2021, 58 (2): 401—411.]
- [21] Feddes R A, Kowalik P J, Zaradny H. *Simulation of field water use and crop yield*[J]. Centre for Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen, the Netherlands, 1978, 194—209.
- [22] Liu G, Xie Y, Gao X F, et al. Sensitivity analysis on parameters of ALMANAC crop model[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2008, 29 (3): 259—263. [刘刚, 谢云, 高晓飞, 等. ALMANAC 作物模型参数的敏感性分析[J]. *中国农业气象*, 2008, 29 (3): 259—263.]
- [23] Kassaye K T, Boulange J, Tu L H, et al. Soil water content and soil temperature modeling in a vadose zone of Andosol under temperate monsoon climate[J]. *Geoderma*, 2021, 384: 114797.
- [24] Zeng Y J, Wan L, Su Z B, et al. Diurnal soil water dynamics in the shallow vadose zone (field site of China University of Geosciences, China) [J]. *Environmental Geology*, 2009, 58 (1): 11—23.
- [25] Bai R Q, Lai Y M, Zhang M Y, et al. Study on the coupled heat-water-vapor-mechanics process of unsaturated soils[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 585: 124784.
- [26] Du C Y, Yu J J, Wang P, et al. Analysing the mechanisms of soil water and vapour transport in the desert vadose zone of the extremely arid region of Northern China[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 558: 592—606.
- [27] Ma Z T, Wang W K, Zhang Z Y, et al. Simulation study on diurnal distribution variation of soil water in shallow vadose zone[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2019, 30 (2): 245—251, 260. [马稚桐, 王文科, 张在勇, 等. 浅层包气带土壤水昼夜分布变化规律模拟研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2019, 30(2): 245—251, 260.]
- [28] Jury W A, Horton R. *Soil Physics*. John Wiley & Sons Inc., New York, 2004, 52—53.
- [29] Zeng Y J, Wan L, Wang X S, et al. An experimental study of day and night trends of soil temperature and moisture in the shallow unsaturated zone[J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13 (1): 52—57. [曾亦键, 万力, 王旭升, 等. 浅层包气带地温与含水量昼夜动态的实验研究[J]. *地学前缘*, 2006, 13 (1): 52—57.]
- [30] Li Y S. Effects of forest on water circle on the Loess Plateau[J]. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16 (5): 427—432. [李玉山. 黄土高原森林植被对陆地水循环影响的研究[J]. *自然资源学报*, 2001, 16 (5): 427—432.]
- [31] Zhang Y, Xie Y S, Hao M D. Limiting ecological factors evaluation of high-quality apple at Wangdonggou watershed in loess gully region[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44 (6): 1184—1190. [张义, 谢永生, 郝明德. 黄土沟壑区王东沟流域苹果品质限制性生态因子探析[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(6): 1184—1190.]
- [32] Cheng J M, Wan H E, Wang J, et al. Growth of *Caragana korshinskii* and depletion process of soil water in semi-arid region[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2005, 41 (2): 37—41. [程积民, 万惠娥, 王静, 等. 半干旱区柠条生长与土壤水分消耗过程研究[J]. *林业科学*, 2005, 41 (2): 37—41.]

- [33] Yang F, Zhang W J. Evapotranspiration process and water balance of different plant communities in lower Taihang mountainous areas[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2007, 38 (3): 434—438. [杨帆, 张万军. 太行山低山区不同植被群落蒸散与水量平衡研究[J]. 土壤通报, 2007, 38 (3): 434—438.]
- [34] Li Y R, Ma Y, Song X F, et al. Soil water potential dynamics and water utilization of typical planted forests in the mountain area of North China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41 (14): 5622—5631. [李奕然, 马英, 宋献方, 等. 华北山区典型人工林土壤水势动态和水分运移规律[J]. 生态学报, 2021, 41 (14): 5622—5631.]
- [35] Qu G M, Li X G, Zhao F, et al. Effect of water stress on microstructure of apple leaves and newborn roots[J]. Acta Horticulturae Sinica, 1999, 26 (3): 147. [曲桂敏, 李兴国, 赵飞, 等. 水分胁迫对苹果叶片和新根显微结构的影响[J]. 园艺学报, 1999, 26 (3): 147.]
- [36] Fan Y, Miguez-Macho G, Jobbágy E G, et al. Hydrologic regulation of plant rooting depth[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2017, 114 (40): 10572—10577.
- [37] Li H J, Si B C, Ma X J, et al. Deep soil water extraction by apple sequesters organic carbon via root biomass rather than altering soil organic carbon content[J]. Science of the Total Environment, 2019, 670: 662—671.

(责任编辑：檀满枝)