

基于叶面积指数耦合 STEMMUS 模型的果园土壤水热特征

杨雨萌^{1,2,3}, 高晓东^{1,2,4}, 邵晓亚^{1,2,3}, 杨敏⁵

(1.中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 陕西 杨凌 712100;

2.中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3.中国科学院大学, 北京 100049;

4.西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 5.西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的]叶面积指数(leaf area index, LAI)作为生态系统水循环过程模拟研究的关键参数,其快速动态模拟可解决土壤水-汽-热-气耦合模型 STEMMUS(simultaneous transfer of energy, mass and momentum in unsaturated soil)只能使用固定或实测 LAI 作为输入参数的局限性。[方法]将 EPIC 模型中的“植物叶面积发育子模块”与 STEMMUS 模型耦合,采用 2019 年和 2020 年子洲县山地苹果试验示范基地苹果生长条件下实测的果树蒸腾、土壤水分和土壤温度数据对模型进行率定与验证,以评估耦合模型在黄土高原的适用性。[结果]通过优化植物生长参数,耦合叶面积发育子模块后的 STEMMUS 模型对苹果树蒸腾耗水过程的模拟精度显著提高,率定年和验证年的归一化均方根误差(NRMSE)和平均绝对误差(MAE)分别从原模型的 40.2%、61.9%和 0.52、0.64 mm/d 降低到耦合模型的 30.0%、33.2%和 0.42、0.38 mm/d。同时,耦合模型可较好地模拟苹果园的土壤水热动态过程,在率定期和验证期模拟土壤水分体积分数和土壤温度的 NRMSE 分别为 1.4%~32.9%和 2.9%~9.5%,MAE 分别为 0.13~4.26 cm³/cm³、0.34~1.49 °C。[结论]模拟值与实测值吻合度较高,表明耦合模型可准确描述黄土高原苹果园果树叶面积动态生长和生态水文过程,研究结果可为黄土区果园生态水文过程的研究提供技术支撑。

关键词: 叶面积指数; STEMMUS; 果树蒸腾; 土壤水热; 黄土高原

中图分类号: S152.7; S661.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242-(2025)01-0316-10

Soil Hydrothermal Characteristics of Orchard Based on Leaf Area Index Coupled with STEMMUS Model

YANG Yumeng^{1,2,3}, GAO Xiaodong^{1,2,4}, SHAO Xiaoya^{1,2,3}, YANG Min⁵

(1.The Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 5.College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] As a key parameter in the simulation study of ecosystem water cycle process, rapid dynamic simulation of leaf area index (LAI) can solve the limitation that the coupled soil water-vapor-heat-air model STEMMUS (simultaneous transfer of energy, mass and momentum in unsaturated soil) can only use fixed or measured LAI as an input parameter. [Methods] In this study, the “plant leaf area development sub-module” in EPIC model was coupled with the STEMMUS model, and the model was calibrated and validated using the measured transpiration of apple trees, soil moisture and soil temperature data under the growth conditions of apple trees in the mountain apple experimental demonstration base of Zizhou County in 2019 and 2020, so as to evaluate the applicability of the coupled model on the Loess Plateau. [Results] By

optimizing the plant growth parameters, the coupled leaf area development sub-module of the STEMMUS model significantly improved the simulation accuracy of the transpiration and water consumption process of apple trees, with the normalized root mean square error (NRMSE) of the calibration and validation years decreasing from 40.2% and 61.9% in the Original model to 30.0% and 33.2% in the coupled model, respectively, and the mean absolute error (MAE) decreasing from 0.52 and 0.64 mm/d to 0.42 and 0.38 mm/d, respectively. Meanwhile, the coupled model could better simulate the soil hydrothermal dynamic processes in apple orchards, and the NRMSE of simulated soil water content and soil temperature during the calibrated period and validation period ranged from 1.4% to 32.9% and 2.9% to 9.5%, respectively, and the MAE ranged from 0.13 to 4.26 cm³/cm³ and 0.34 to 1.49 °C, respectively. [Conclusion] The high agreement between the simulated and measured values indicates that the coupled model can accurately describe the dynamic growth process of apple tree leaf area and the ecohydrological process of orchard on the Loess Plateau, and this study can provide technical support for the research of the ecohydrological process of orchard in loess area.

Keywords: leaf area index; STEMMUS; fruit tree transpiration; soil hydrothermal characteristics; Loess Plateau

Received: 2024-08-16

Revised: 2024-10-01

Accepted: 2024-11-11

Online(www.cnki.net): 2024-12-25

退耕还林(草)工程实施以来,黄土高原生态建设已经取得重大成效,苹果因具备良好的生态和经济效益在该地区被广泛种植。然而,苹果树通过叶片蒸腾耗水强烈,但黄土高原气候干旱,有限的降水难以满足果树强烈的耗水需求,深层土壤水被长期过度消耗,果树生长受到严重威胁^[1]。同时,果树生长变化又直接影响果园生态系统的水循环过程,而叶面积指数作为反映植被生长状况的主要指标,其显著影响着植被的蒸腾作用、光合作用、土壤蒸发、降水截留等过程^[2]。因此,准确刻画植被生长动态对深入了解黄土高原干旱、半干旱区的生态水文过程具有重要意义。

为全面了解苹果园果树生长的生态水文效应,需要明确生态系统水循环过程中包括蒸散发、深层土壤水分等的动态变化。但田间试验的干扰因素多、试验周期长,难以实现水文变量的长期连续监测,尤其是在土层深厚的黄土区^[3]。数值模拟是再现植被生态水文效应的经济可行的方法,可实现对土壤水分平衡、植物生长发育过程的长周期动态描述,是水资源评估、生态水文过程建模的重要方法和手段^[4]。目前,学者们基于不同的原理建立许多土壤水文模型,如 YU 等^[5]模型是假定土壤气压与大气压始终持平,土壤中只有水相运移,忽略实际中干燥气流对土壤水热输送的影响。尤其是在以黄土为主的黄土高原地区,黄土作为点楞支架式疏松多孔的土壤,气相占比较高,土壤干空气显著影响着该区土壤水热运移过程^[6]。而 STEMMUS 模型(非饱和土壤中能量、质量和动量的同时传递)是模拟非饱和土壤液态水、水蒸汽、干空气和热量耦合传递的模型^[7]。相较于传统

的二相水热耦合模型,STEMMUS 模型创新性地考虑干空气对土壤水热运移过程的驱动作用,使水汽运移机制从简单扩散发展到对流和弥散运移,更适合刻画土壤水热变化动态。该模型已被证明可精确地模拟黄土高原果园土壤水热变化的动态过程^[8]。然而,植物生理生长变化影响土壤的生物、物理和水文过程,在土壤水文和生态系统建模中发挥着关键作用^[9]。SHAO 等^[10]考虑到 STEMMUS 模型在模拟植物生理生长动态方面的局限性,耦合一个结合光合气孔导度和蒸腾作用的生理生态过程模型。此外,叶面积指数是植物生理生态的主要控制因子,指单位面积土地上的绿叶面积。作为生态系统的重要参数,LAI 对光合作用、呼吸作用和降水截留等过程起着关键作用^[2]。植物主要通过叶片气孔导度来调节蒸腾耗水过程;同时,通过冠层拦截降水影响降水对土壤水分的补给。在生态水文模型中,常被用作输入参数或初始条件以优化模型,使其运行更加符合实际情况^[11]。然而,多年生落叶植被的叶面积指数在生长季内动态变化,与植物物候发育密切相关,显著影响着陆地系统的生态水文过程^[12]。在 STEMMUS 模型中,需要 LAI 和冠层高度来确定冠层阻力和空气动力学阻力,从而计算植物的潜在蒸腾。但是,目前,STEMMUS 模型的 LAI 只能通过输入田间实测数据或设置固定值以模拟蒸散发,缺乏对 LAI 季节动态的连续模拟。由于长期连续监测叶面积指数存在困难,将限制 STEMMUS 模型在长时间尺度上的应用。因此,增强 LAI 动态表征可提高 STEMMUS 模型的预测能力。

为此,本研究拟在土壤水-汽-热耦合模型 STEMMUS

基础上考虑植物物候生长,将植物叶面积指数发育子模块与其相耦合,使该模型可模拟植被生长和土壤水文动态过程。同时,结合在黄土高原苹果园进行野外观测试验得到的果树蒸腾和土壤水热数据对模型进行校准和验证,定量评估耦合模型在黄土高原地区的适用性,为黄土高原人工经济苹果林生态水文的研究提供技术支持。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

子洲县位于陕西省榆林市南部,地处黄土丘陵沟壑区腹地,平均海拔 1 050 m,是典型的温带半干旱气候;年平均降水量 450 mm(1960—2021 年),且主要集中在 7—9 月;年平均气温 9.1 °C,年平均日照时间 2 633 h,平均无霜期 170 d。本研究田间试验于 2019—2020 年在子洲县山地苹果试验示范基地进行,试验地土壤为黄绵土,土层疏松,质地均一。0~1 m 土层平均土壤体积质量 1.41 g/cm³,田间持水量 22%,凋萎湿度 7%。

1.2 试验布置及数据采集

2019 年 4 月 14 日至 2020 年 10 月 15 日在子洲县清水沟村山地苹果试验示范基地开展田间观测试验。试验期间果树树龄为 11~12 龄,在果园内建立 3 个正方形小区,各小区包含 16 株果树,在每个小区随机选取 3 株长势相似的果树,共 9 株试验果树,分别监测其土壤水分、温度、叶面积指数、细根根长等指标。

气象资料通过安装在试验地附近的自动气象站(Dynamax Co.,美国)获得,每 30 min 测量 1 次,包含逐日降水、气温、气压、地温、太阳辐射、相对湿度和 2 m 处风速。

土壤水分和温度采用 ECH20-EM-50 传感器(Decagon Devices Inc.,美国)进行高频率监测,将传感器分别水平安装在 20、60、200、300、450 cm 土层,安装时不同土层传感器需要保持 2~3 cm 的水平距离,以避免上层传感器扰动入渗对下层土壤水热测量精度的影响,安装完成后,将土壤回填到与原地面齐平^[13]。传感器安装前,利用烘干法测得的土壤水分体积质量对仪器进行校正,之后监测频率设为每 15 min 1 次。其他土壤性质参数采用环刀法在果树生育期初和生育期末采集不同土层原状土带回实验室进行测定,主要包含土壤体积质量、土壤导水率、土壤孔隙度和土壤颗粒组成。

根据 TAO 等^[14]研究结果,苹果树液流采用插针式 FLGS-TDP XM1 000 茎流计(Dynamax Co.,美国)进行监测,茎流计包括 12 个散热探头和 1 个数据记录器,每个探头有 2 根探针,安装在果树主干距离地面 30 cm 处,监测频率为每 30 min 1 次。根据测得的边材液流速

率,再结合边材面积即可获得果树的蒸腾量。果树生育期内的叶面积指数采用 LAI-2 200 C 冠层分析仪(Li-Cor,美国)测定。在测量时,选择晴朗的傍晚或阴天,用 90°的镜头分别绕果树的 4 个不同方向各测 1 次,取 4 次测量的平均值作为最终叶面积指数,测量频率为 7~10 d/次。果树根系采用根钻法($d=75$ mm)在生育期末对每株试验果树进行取样,以果树树干为中心,在距离树干 50 cm 处,以 120°为夹角,从 3 个方向分别进行根系取样(图 1)。果树取样土层深度以 20 cm 为间隔,总取样深度为 0~1 000 cm,每个处理取 3 个重复^[13]。取样完成后将样品带回实验室放置在 0.25 mm 标准土壤筛上,用清水冲洗土壤,再人工挑拣根系,果树根系为红褐色。然后,分别利用扫描仪和 DELTA-T SCAN 软件(Delta-T Devices Company,英国)扫描和分析根系图像,再根据图像剔除直径>2 mm 的粗根,获得细根根长。不同土层总细根根长与对应土壤体积的比值即为细根根长密度。

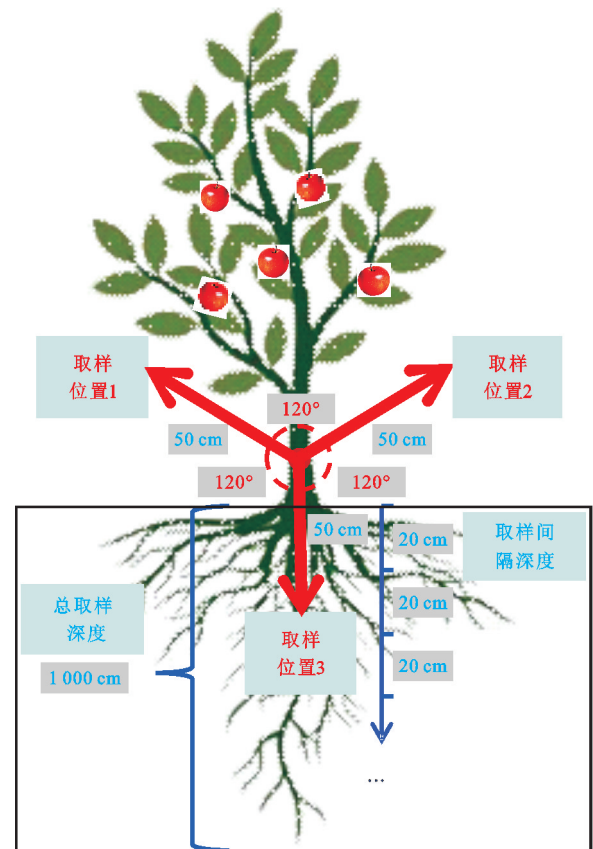


图 1 苹果树根系取样示意

Fig.1 Schematic diagram of root sampling for apple trees

1.3 模型耦合

1.3.1 STEMMUS 模型简介 STEMMUS 模型是非饱和土壤水、汽、热、气耦合运移模型^[7],本文主要考虑土壤水分动态和植物蒸腾,因此,主要介绍该模

型土壤水分运移和蒸散发部分。

1) 土壤水分运移模拟。STEMMUS 模型考虑土壤与大气的垂直互动作用,其土壤水分运动采用 MILLY^[15]对 Richards 方程的修正形式描述:

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

式中: ρ_L 和 ρ_V 分别为液态水和水蒸汽的密度, kg/m^3 ; θ_L 和 θ_V 分别为土壤液态水和土壤水蒸汽体积分数, m^3/m^3 ; z 为垂直坐标, m , 向上为正方向; q_L 和 q_V 分别为土壤液态水和土壤水蒸汽通量, $\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$, 向上为正方向; S 为根系吸水源汇项, s^{-1} 。

2) 蒸散发模拟。在 SHAO 等^[10]改进的 STEMMUS 模型中,苹果树冠层叶片的蒸腾速率采用 Penman-Monteith 方程进行计算:

$$T_p = \frac{sR_n + Dg_Bc_pM_a}{\lambda \left(s + \gamma \frac{g_B}{g_V} \right)} \quad (2)$$

式中: T_p 为潜在蒸腾速率, $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; s 为饱和水汽压与温度曲线的斜率, Pa/K ; R_n 为植物表面的净辐射, W/M^2 ; D 为水汽压差, Pa ; g_B 为总边界层导度, $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; c_p 为干空气比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; M_a 为空气摩尔质量, kg/mol ; λ 为水的汽化潜热, J/mol ; γ 为湿度计常数, Pa/K ; g_V 为总水汽导度, $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

土壤表面蒸发量根据土壤空气空间水汽压与地面空气水汽压之差估计得到,计算公式为:

$$E_s = G_{s,t}k_l(e_s - e_a) \quad (3)$$

式中: E_s 为土壤表面的水分蒸发量, mm/s ; $G_{s,t}$ 为从土壤空气空间到土壤边界层以上空气的总电导, m/s ; e_s 为土壤空气空间的部分水汽压, kPa ; e_a 为地面空气的部分水汽压, kPa ; k_l 为换算系数。

1.3.2 叶面积指数生长模块 叶面积发育子模块的构建参考 SWAT 2 012 版本^[16]中的理想叶面积发育模型,其为“环境政策影响气候”(EPIC)模型作物生长模块的改编版本。该叶面积发育模型所需输入参数少,计算简便高效,前人^[11]研究已证明,其对叶面积指数的模拟具有较高的精度。具体而言,苹果树的叶面积指数(LAI)的计算使用 EPIC 的物候植物发育概念,基于累积热量单位模拟果树的物候发育,以天为时间步长计算果树叶面积指数日增长量(衰减量),进而模拟果树在整个生长季节的叶面积指数动态。

1) 热量单位及潜在热量单位分数。在模型中,果树的生长发育以每日累计热量单位为基础。热量单位是由温度需求(即生长所需的最低、最高和最适温度)衍生

而来,是衡量植物热量获取的指标,其计算公式为:

$$HU = \overline{T}_{av} - T_{base}, \overline{T}_{av} > T_{base} \quad (4)$$

式中: HU 为日累积热量单位值, $^{\circ}\text{C}$; \overline{T}_{av} 为日平均温度, $^{\circ}\text{C}$; T_{base} 为作物特有的基准温度, $^{\circ}\text{C}$ 。其中,日平均温度计算为日最高温度和最低温度的平均值。

果树从发芽到成熟所需的总热量单位计算公式为:

$$PHU = \sum_{d=1}^m HU \quad (5)$$

式中: PHU 为潜在热量单位累积量, $^{\circ}\text{C}$; d 为天数 ($d=1$ 为果树开始发芽的天数); m 是果树达到成熟期所需的天数。

因此,计算 LAI 的基本变量潜在热量单位分数计算公式为:

$$fr_{PHU} = \frac{\sum_{i=1}^d HU_i}{PHU} \quad (6)$$

式中: fr_{PHU} 为生长季节某一时期的潜在热量单位的分数,当果树到达成熟期时, fr_{PHU} 为 1。

2) 叶面积指数。在模型中,从果树发芽到叶面积开始衰减的时期内,果树的日总叶面积指数计算为:

$$LAI_i = LAI_{i-1} + \Delta LAI_i \quad (7)$$

式中: LAI_i 和 LAI_{i-1} 分别为第 i 天和第 $i-1$ 天的叶面积指数; ΔLAI_i 为第 i 天的 LAI 变化量。

第 i 天 LAI 的增加量计算公式为:

$$\Delta LAI_i = (fr_{LAI_{mx},i} - fr_{LAI_{mx},i-1}) \left(\frac{yr_{cur}}{yr_{full}} \right) LAI_{mx} \{1 - \exp[5(LAI_{i-1} - LAI_{mx})]\} f_{min} \quad (8)$$

式中: $fr_{LAI_{mx},i}$ 和 $fr_{LAI_{mx},i-1}$ 分别为第 i 天和第 $i-1$ 天果树最大叶面积指数的分数; LAI_{mx} 为果树的极大叶面积指数; yr_{cur} 为树木积累的发育年数, a ; yr_{full} 为树种达到完全发育的年数, a ; f_{min} 为最小果树胁迫系数值。其中,果树最大叶面积指数的分数是潜在热量单位分数的函数,计算公式为:

$$fr_{LAI_{mx}} = \frac{fr_{PHU}}{fr_{PHU} + \exp(l_1 - l_2 fr_{PHU})} \quad (9)$$

式中: $fr_{LAI_{mx}}$ 为果树最大叶面积指数的分数; l_1 和 l_2 是形状系数。

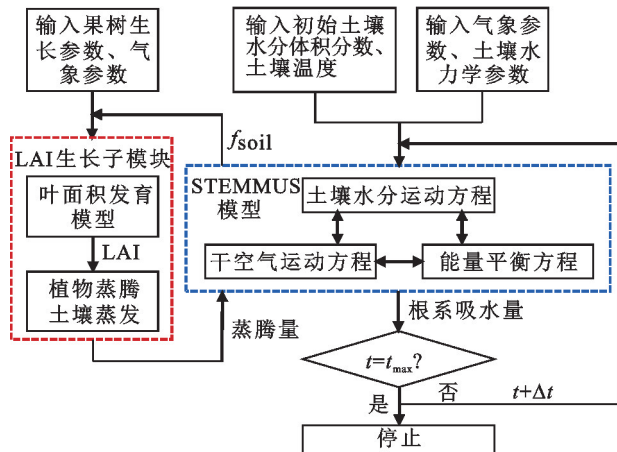
当叶片衰老开始超过叶片生长成为主要的生长过程时,从叶面积开始衰减到果树生长季节结束, LAI 计算公式为:

$$LAI = \left(\frac{yr_{cur}}{yr_{full}} \right) LAI_{mx} \frac{(1 - fr_{PHU})}{(1 - fr_{PHU, sen})} \quad (10)$$

式中: LAI 为给定一天的叶面积指数; $fr_{PHU, sen}$ 为衰老成为主要生长过程时对应的生长季节(PHU)的分数。

1.3.3 耦合过程 耦合叶面积指数动态发育子模块的 STEMMUS 模型数值计算的流程图见图 2。首

先,耦合模型通过 STEMMUS 模型输入的气象参数、土壤水力学参数、初始土壤水分体积分数和土壤温度计算土壤水热信息,再将得到的水分胁迫函数值传递到叶面积指数生长模块,结合输入的果树生长参数计算水分胁迫条件下的叶面积指数变化量。其次,根据叶面积指数和蒸散发模型进一步计算植物蒸腾量和土壤蒸发量,并将蒸腾量传回至 STEMMUS 模型用于计算果树的根系吸水量。最后,STEMMUS 模型根据得到的根系吸水量计算当前时间步长下每一层的土壤含水量,同时将其作为下一时间步长的初始土壤水分体积分数,再根据判断条件确定是否进入下一时间步长的模拟,以此循环计算土壤水分和果树蒸腾直至模拟期结束。耦合模型在叶面积指数生长模块所需的果树生长参数较少,有利于其推广使用。



注: t 为时间; LAI 为叶面积指数; f_{soil} 为水分胁迫函数。

图 2 耦合叶面积指数动态发育子模块的 STEMMUS 模型程序流程

Fig.2 Flow chart of STEMMUS model coupled with dynamic leaf area index submodule

1.4 模型参数化

模型的模拟深度为 450 cm,模拟时期包含率定期和验证期。率定期为 2019 年 4 月 14 日至 10 月 30 日(200 d),验证期为 2020 年 5 月 12 日至 10 月 10 日(152 d),时间步长为 1 d。

土壤水分和温度的初始条件根据实测的土壤水热状况设定,土壤初始空气压力根据平均大气压力设定。土壤水分运移的上边界设定为大气边界,主要包含土壤蒸发和自然降雨,下边界条件设定为自由排水边界。土壤热运移的上边界设定为地温,下边界条件设定为模拟深度对应的实测值。土壤干空气运动的上边界设定为实测的大气压力,下边界条件设定为零。

在模型中,采用 Van Genuchten 模型来模拟土壤水分特征曲线。耦合模型所需的主要参数包括土壤水力特性参数 θ_s 、 θ_r 、 α 、 n 、 K_s 、 l 和果树生长参数 T_BASE、BLAI、DLAI、PHU 等。由于土壤的垂向

变异性,本文在实测各土层土壤水力参数的基础上,对参数进行优化后输入到耦合后的 STEMMUS 模型中。土壤水力特性参数参考 SHAO 等^[10]测定值,经模型率定后各土层土壤水力参数取值见表 1。果树生长参数由于观测难度较大,因此,本文参照文献[16]中原模型默认值,在其基础上采用试错法对参数进行优化,根据率定期实测的土壤水热和果树蒸腾数据确定最优参数取值。率定后耦合模型生长模块的主要参数取值见表 2。

表 1 各土层土壤水力参数率定值

Table 1 Calibration values of soil hydraulic parameters in each soil layer

参数	参数定义	取值
θ_s	饱和水分体积分数/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	0.44,0.43,0.37,0.40,0.38
θ_r	残余水分体积分数/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	0.036,0.040,0.040,0.049,0.037
α	进气吸力倒数/cm	0.008,0.005 7,0.008 1,0.008,0.004
n	形状参数	1.47,1.55,1.41,1.46,1.52
K_s	饱和导水率/($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$)	100.20,948.30,410.71,710.90
l	孔隙参数	0.48,0.52,0.38,0.42,0.48

表 2 苹果树主要生长参数率定值

Table 2 Calibration values of main growth parameters of apple trees

参数	参数定义	取值
T_BASE	植物生长最低温度/ $^{\circ}\text{C}$	5
BLAI	最大潜在叶面积指数/($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$)	3
DLAI	叶面积开始下降时占整个生长期的比率	0.45
PHU	植物成熟所需的总热量单位/ $^{\circ}\text{C}$	4555
FRGW ₁	最优叶面积发育曲线上第 1 个点对应的 PHU 分数	0.1
LAIMX ₁	最优叶面积发育曲线上第 1 点对应的 BLAI 分数	0.15
FRGW ₂	最优叶面积发育曲线上第 2 个点对应的 PHU 分数	0.5
LAIMX ₂	最优叶面积发育曲线上第 2 点对应的 BLAI 分数	0.75
ALAI_min	植物休眠期最小叶面积指数/($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$)	0

1.5 模型评价

本文采用归一化均方根误差(normalized root mean square error, NRMSE)和平均绝对误差(mean absolute error, MAE)评价耦合模型的模拟精度。NRMSE 和 MAE 的计算公式为:

$$\text{NRMSE} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (Q_j - P_j)^2}{n}}}{Q_k} \quad (11)$$

$$\text{MAE} = \frac{\sum_{j=1}^n |Q_j - P_j|}{n} \quad (12)$$

式中: n 为样本总量; Q_j 和 P_j 分别为第 j 个样本的测量值和模拟值; Q_k 为样本测量值的平均值。NRMSE、MAE 越小,表示模拟偏差越小。

2 结果与分析

2.1 苹果树蒸腾耗水量的率定与验证

试验地苹果树的生长开始于 4 月中旬,结束于 10 月下旬,最后进入休眠期。本文分别基于原 STEMMUS 模型和耦合叶面积指数发育子模块的 STEMMUS 模型对旱地苹果园果树生长季内日蒸腾耗水量进行模拟计算,并将其原模型模拟值、耦合模型模拟值与实测的果树日蒸腾量进行对比。由图 3 可知,耦合模型对苹果树

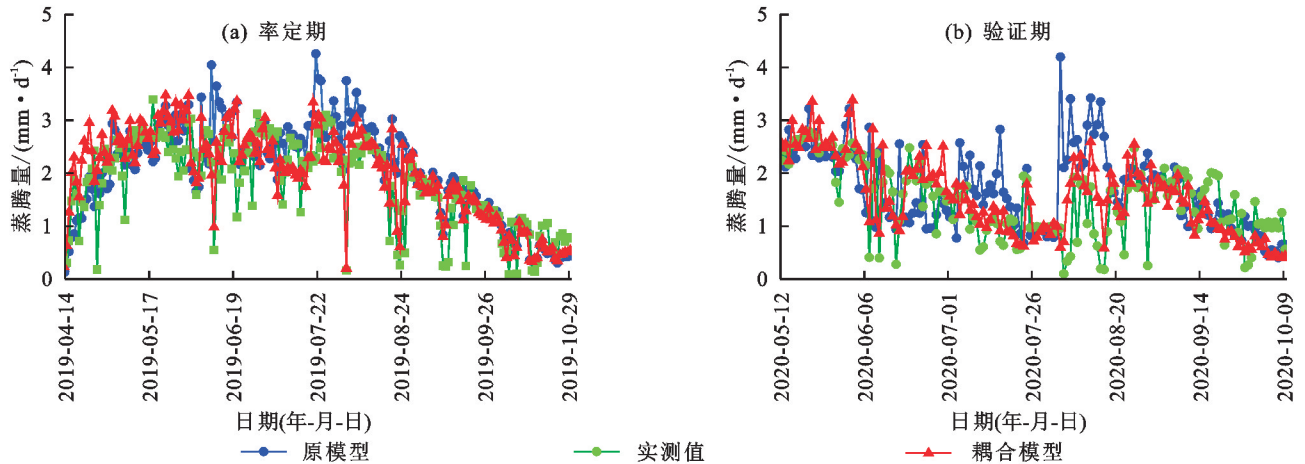


图 3 率定期和验证期苹果树日蒸腾耗水量的模拟值和实测值比较

Fig.3 Comparison of simulated and measured daily transpiration water consumption of apple trees during the calibration and validation periods

2.2 土壤水分体积分数的率定与验证

从表 3 和图 4 可以看出,不同土层土壤水分体积分数的模拟效果均较好,率定期模拟值与实测值的归一化均方根误差(NRMSE)为 1.4%~32.9%,平均绝对误差(MAE)为 0.13~4.26 cm^3/cm^3 。验证期模拟值与实测值的 NRMSE 为 4.0%~22.4%,MAE 为 0.35~3.36 cm^3/cm^3 。对于 200 cm 土层以内的浅层土壤,模型有效地捕捉了土壤水分的实际变化过程,与降雨量变化表现出较好的一致性。尤其是率定期 4 月 27 日、6 月 11—12 日、7 月 21—22 日、7 月 29 日、8 月 3 日、8 月 24 日、9 月 11—12 日、10 月 15 日和验证期 8 月 4—6 日、8 月 16 日、8 月 23 日、9 月 13 日的几次年内重要降水事件,模型均准确地捕捉到浅层土壤水分体积分数的动态变化情况。对于 200 cm 以下的深层土壤,降水补给有限,深层土壤水分体积分数总体相对稳定,在降水前后变化趋势不明显,无论是率定期还是验证期,模型模拟精度较浅层显著提高,深层土壤水分模拟值和实测值基本一致。

2.3 土壤温度的率定与验证

试验期内 20、60、200、300、450 cm 土层深度下土壤温度的模拟与实测结果对比(图 5),在苹果树生长季节内,不同土层土壤温度的模拟结果较好,土壤温

蒸腾耗水量的模拟结果与整个生长季内的观测结果十分吻合。在率定和验证阶段,原模型的 NRMSE 分别为 40.2%和 61.9%,MAE 分别为 0.52 和 0.64 mm/d,而耦合模型的 NRMSE 分别达到 30.0%和 33.2%,MAE 分别为 0.42 和 0.38 mm/d。与原 STEMMUS 模型相比,耦合模型对蒸腾耗水量的模拟精度显著提高。在 2019 年和 2020 年的整个生长季节中,降雨频发,果树蒸腾量波动频繁。但是,耦合模型均能较好地模拟苹果树蒸腾的变化趋势。

度变化主要发生在 200 cm 以内的浅层土壤中,特别是 0~20 cm 的表层土壤,土壤温度日变化和季节变化明显。在模型率定和验证期内,生长季开始时模拟的土壤温度与实测值的一致性较好,随后在第 1 次强降雨发生后略有差异。但尽管如此,耦合模型依旧能准确地描述土壤温度的季节变化。由表 4 可知,在率定期,不同土层土壤温度模拟值和实测值的 NRMSE 为 2.9%~6.9%,MAE 为 0.34~0.79 $^{\circ}\text{C}$,对于验证期,NRMSE 和 MAE 分别为 3.4%~9.5%和 0.43~1.49 $^{\circ}\text{C}$ 。无论是率定期还是验证期,耦合模型均极好地捕获了不同监测深度下的土壤温度变化。

表 3 率定期和验证期各土层土壤水分体积分数模拟精度

Table 3 Simulation accuracy of soil water content in each soil layer during the calibration and validation periods

土层 深度/cm	率定期		验证期	
	NRMSE/ %	MAE/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	NRMSE/ %	MAE/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)
20	32.9	4.26	18.1	2.35
60	28.6	3.84	22.4	3.36
200	13.7	1.16	21.1	2.57
300	1.4	0.13	4.0	0.35
450	2.1	0.16	8.1	0.59

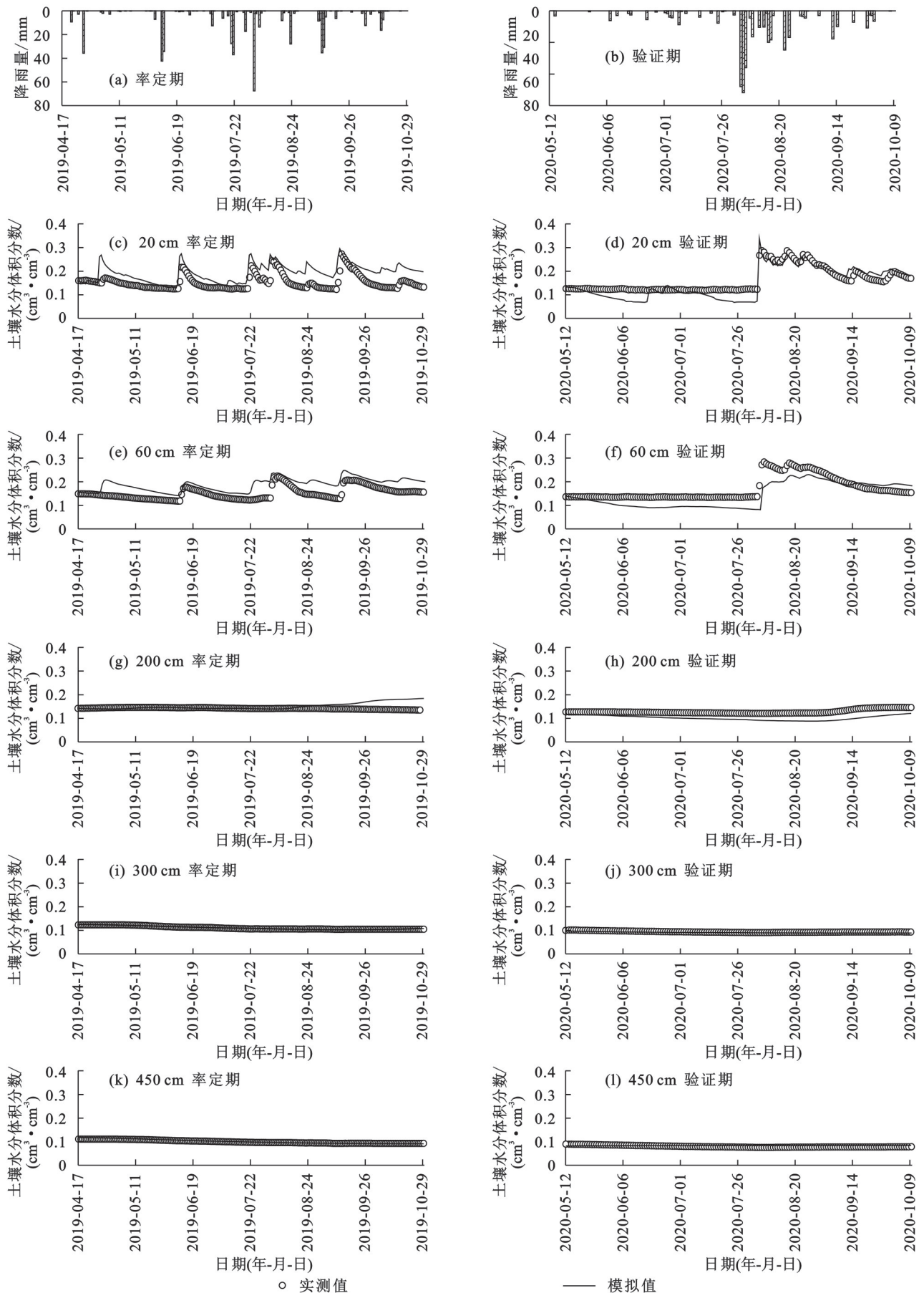


图 4 率定期和验证期不同土层土壤水分体积分数的模拟值和实测值比较

Fig.4 Comparison of simulated and measured soil water content in different soil layers during the calibration and validation periods

表 4 率定期和验证期各土层土壤温度模拟精度

Table 4 Simulation accuracy of soil temperature in each soil layer during the calibration and validation periods

土层 深度/cm	率定期		验证期	
	NRMSE/%	MAE/°C	NRMSE/%	MAE/°C
20	6.9	0.79	9.5	1.49
60	3.9	0.52	7.0	1.22
200	3.4	0.47	3.5	0.52
300	2.9	0.34	3.4	0.43
450	6.3	0.72	7.5	0.93

3 讨论

3.1 叶面积指数对蒸腾模拟的影响

叶面积指数是生态水文和生物地球化学模型中模拟大气与生态系统间相互作用的关键参数,其与土壤蒸发、植株光合作用、蒸腾作用和生产力等密切相关^[12]。蒸腾作为植被耗水的主要方式,是生态系统中土壤与大气间链接的桥梁^[17]。P-M 模型被广泛用于模拟植物蒸腾量,YU 等^[5]将 P-M 模型嵌入到 STEMMUS 模型中,基于参考作物蒸散量,利用 LAI 将蒸散发划分为土壤蒸发和植物蒸腾,模拟玉米的日蒸散量、蒸腾量和土壤蒸发量;GAO 等^[18]基于改进后的 STEMMUS 模型对黄土高原旱地苹果园果树蒸腾量进行模拟,率定期和验证期的归一化均方根误差 NRMSE 分别为 30%和 50%。与 GAO 等^[18]的研究结果相比,本研究应用耦合叶面积指数发育子模块的 STEMMUS 模型模拟的苹果园果树蒸腾耗水量,在率定期和验证期的 NRMSE 分别为 30.0%和 33.2%,模拟精度显著提高。主要是因为 GAO 等^[18]的模拟是基于固定的 LAI 和将少量实测 LAI 拟合二次函数插值作为模型输入参数,但实际上 LAI 是随植物物候发育不断动态变化的,其变化显著影响着果树的蒸腾耗水过程。如 AGOTA 等^[19]基于耦合 Shuttleworth-Wallace 模型研究叶面积指数和最小气孔阻力的输入数据改变对模型结果的敏感性表明,甜樱桃蒸腾量与 LAI 呈正相关;也有学者^[20]应用生态水文模型 BROOK90 对不同降水年型下半干旱区落叶松人工林的生态水文过程进行模拟发现,林分蒸腾量与冠层 LAI 变化呈显著正相关。以上研究^[18-19]均表明,叶面积指数变化对植物蒸腾模拟的影响不容忽视,而本研究耦合叶面积发育子模块成功地提高 STEMMUS 模型对果树蒸腾的模拟精度,进一步减少模拟值和实测值间的差异。

3.2 耦合模型对土壤水热的模拟性能

土壤水连接着大气水、植物水和地下水,在生态系统中发挥着承上启下的作用^[21]。考虑干空气的

STEMMUS 模型能够很好地反映非饱和带实际的土壤水分运移过程^[8]。本研究应用耦合叶面积发育子模块的 STEMMUS 模型对苹果园 0~450 cm 土层土壤水分和温度进行模拟,表明归一化均方根误差 NRMSE 分别为 1.4%~32.9%和 2.9%~9.5%,平均绝对误差 MAE 分别为 0.13~4.26 cm³/cm³,0.34~1.49 °C,模拟结果精度较高。值得注意的是,对于土壤水分,20 cm 土层深度的模拟效果远不如深层土壤,在率定阶段模拟土壤水分体积分数出现高估现象。杨博等^[6]在黄土丘陵区苹果园应用 STEMMUS 模型模拟 0~80 cm 土层土壤水分也发现,率定期内 0~10 cm 土层土壤水分体积分数模拟值较测量值存在显著高估。是由于水分输入有限,实测值在整个生长季内略有波动,而模型对于降雨比较敏感,因此,模拟值对降雨的响应更加强烈,此现象在验证阶段得到明显改善。再者,冠层截留、地表产流和人类活动可能也是导致浅层土壤水分体积分数模拟值和实测值产生差异化的原因。在野外试验监测中,土壤水分传感器被安装在苹果树冠层以下的土壤中,降雨发生时,果树冠层截留部分降雨,使实际到达土壤表层的水分少于观测到的降雨量。同时,短历时强降雨可能导致地表产流,也减少入渗到土壤中的水分,而此情况在模型降雨参数输入时难以考虑^[22]。人类活动如践踏、除草等也影响表层土壤,但模型很难完全考虑到相关影响因素^[23]。此外,本研究根系吸水模块采用的是苹果树生长季末根系的垂直分布,未考虑到根系随时间变化的动态生长过程,虽然短时间内根系生长缓慢,特别是对于老果树,也可能影响果树根系吸水过程进而降低土壤水分的模拟精度^[24]。相较于土壤水分,耦合模型对土壤温度的模拟效果更好。在模型率定和验证期内,生长季开始时模拟的土壤温度与实测值的一致性较好,随后在第 1 次强降雨发生后略有差异。由于土壤表面温度的不确定性,强降雨事件对土壤温度模拟有显著影响。但尽管如此,耦合模型依旧能准确地描述土壤温度的季节变化。值得注意的是,在 450 cm 土层深度处,模拟土壤温度与实测土壤温度间的相对较大偏差并不是因为模型本身的限制,而可能是传感器或野外试验过程中相关的测量偏差^[22]。在干旱与半干旱区域生长的苹果树,通过深根系吸收土壤水分,并通过蒸散发过程消耗水分,此过程作为 LAI 的函数每天都在变化。因此,耦合模型对土壤水分体积分数和蒸腾耗水量的模拟精度,一定程度上表明,在生态水文过程模拟中考虑叶面积动态发育是非常有必要的。

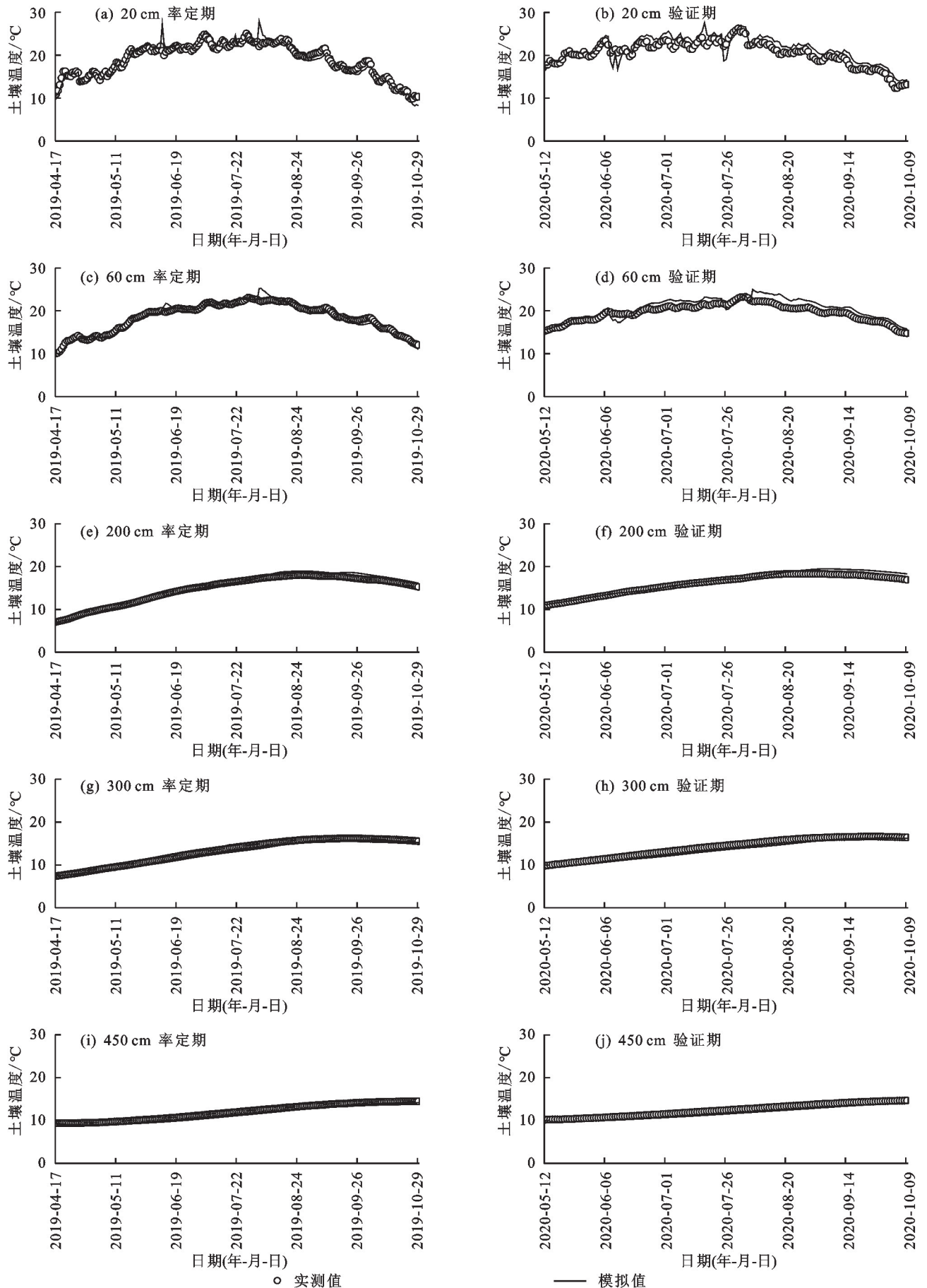


图 5 率定期和验证期不同土层土壤温度的模拟值和实测值比较

Fig.5 Comparison of simulated and measured soil temperature of different soil layers during the calibration and validation periods

4 结论

耦合叶面积发育子模块后的 STEMMUS 模型能够更准确地模拟果树的蒸腾耗水过程,对 0~450 cm 不同土层土壤水分和土壤温度也均具有较好的模拟效果。将动态叶面积指数发育模块耦合进土壤水-汽-热耦合模型 STEMMUS 中不但减少模型输入固定参数引起的模拟结果的不确定性,同时,也为黄土高原干旱、半干旱区果园生态水文过程研究提供技术理论支撑。

参考文献:

- [1] YANG M, GAO X D, WANG S F, et al. Quantifying the importance of deep root water uptake for apple trees' hydrological and physiological performance in drylands[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 606: e127471.
- [2] 王根绪, 夏军, 李小雁, 等. 陆地植被生态水文过程前沿进展: 从植物叶片到流域[J]. *科学通报*, 2021, 66(28): 3667-3683.
- WANG G X, XIA J, LI X Y, et al. Critical advances in understanding ecohydrological processes of terrestrial vegetation: From leaf to watershed scale[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2021, 66(28): 3667-3683.
- [3] 牛晓倩, 贾小旭, 刘成功, 等. 关中平原农田土壤水力参数空间分异与模拟[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(1): 198-204.
- NIU X Q, JIA X X, LIU C G, et al. Spatial variations and simulations of farmland soil hydraulic parameters in the Guanzhong Plain[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(1): 198-204.
- [4] BAI X, JIA X X, JIA Y H, et al. Modeling long-term soil water dynamics in response to land-use change in a semi-arid area[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 585: e124824.
- [5] 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.
- [6] 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.
- 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.
- [7] 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.
- [8] 万华, 高晓东, 赵西宁, 等. 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 H, GAO X D, ZHAO X N, et al. Simulation of wa-
- ter and vapor fluxes in soil profile of apple orchard in loess area[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(3): 787-799.
- [9] TRUGMAN A T. Integrating plant physiology and community ecology across scales through trait-based models to predict drought mortality[J]. *New Phytologist*, 2022, 234(1): 21-27.
- [10] SHAO X Y, GAO X D, ZENG Y J, et al. Eco-physiological constraints of deep soil desiccation in semiarid tree plantations[J]. *Water Resources Research*, 2023, 59(8): e2022WR034246.
- [11] LI H Y, LUO Y, SUN L, et al. Modelling the artificial forest(*Robinia pseudoacacia* L.) root-soil water interactions in the Loess Plateau, China[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2022, 26(1): 17-34.
- [12] TIAN A, WANG Y H, WEBB A A, et al. Water yield variation with elevation, tree age and density of larch plantation in the Liupan Mountains of the Loess Plateau and its forest management implications[J]. *The Science of the Total Environment*, 2021, 752: e141752.
- [13] 杨敏. 黄土丘陵区苹果园深层耗水过程及其生态水文效应研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2024.
- YANG M. Deep soil water consumption process and its eco-hydrological impacts of apple orchard on the Loess Hilly Plateau[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest Agriculture and Forestry University, 2024.
- [14] TAO Z, NEIL E, SI B C. Determining deep root water uptake patterns with tree age in the Chinese loess area[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 249: e106810.
- [15] MILLY P C D. Moisture and heat transport in hysteretic, inhomogeneous porous media: A matric head-based formulation and a numerical model[J]. *Water Resources Research*, 1982, 18(3): 489-498.
- [16] ARNOLD J G, MORIASI D N, GASSMAN P W, et al. SWAT: Model use, calibration, and validation[J]. *Transactions of the Asabe*, 2012, 55(4): 1491-1508.
- [17] LIU Y L, KUMAR M, KATUL G G, et al. Plant hydraulics accentuates the effect of atmospheric moisture stress on transpiration[J]. *Nature Climate Change*, 2020, 10: 691-695.
- [18] GAO X D, WAN H, ZENG Y J, et al. Disentangling the impact of event- and annual-scale precipitation extremes on critical-zone hydrology in semiarid loess vegetated by apple trees[J]. *Water Resources Research*, 2023, 59(3): e2022WR033042.
- [19] ÁGOTA Juhász, KAROLY H. Comparison of the transpiration part of two sources evapotranspiration model and the measurements of sap flow in the estimation of the transpiration of sweet cherry orchards[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 143(9): 142-150.

(下转第 337 页)

- NDVI(1985—2018) in the Yarlung Zangbo River Basin of China based on time series segmentation algorithm [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(19):6863-6871.
- [21] 陈元鹏,周旭,陈妍,等.融合时序遥感分析的国土空间生态保护修复关键区识别[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(10):161-170.
- CHEN Y P, ZHOU X, CHEN Y, et al. Identification of key areas for ecological protection and restoration in national land space by integrating time-series remote sensing analysis[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(10):161-170.
- [22] WANG F, GE Q S, WANG S W, et al. A new estimation of urbanization's contribution to the warming trend in China[J]. *Journal of Climate*, 2015, 28(22):8923-8938.
- [23] 金凯,王飞,韩剑桥,等.1982—2015年中国气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化的影响[J]. *地理学报*, 2020, 75(5):961-974.
- JIN K, WANG F, HAN J Q, et al. Contribution of climatic change and human activities to vegetation NDVI change over China during 1982—2015 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(5):961-974.
- [24] 朱林富,谢世友,杨华,等.气候变化与人类活动在四川植被覆盖度变化中的相对作用[J]. *西部林业科学*, 2022, 51(6):8-16.
- ZHU L F, XIE S Y, YANG H, et al. Relative effects of climate change and human activities on vegetation coverage change in Sichuan[J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2022, 51(6):8-16.
- [25] 吴瀚,白洁,李均力,等.新疆地区植被覆盖度时空变化及其影响因素分析[J]. *植物生态学报*, 2024, 48(1):41-55.
- WU H, BAI J, LI J L, et al. Study of spatio-temporal variation in fractional vegetation cover and its influencing factors in Xinjiang, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2024, 48(1):41-55.
- [26] ABDUL AZIZ O I, BURN D H. Trends and variability in the hydrological regime of the Mackenzie River Basin [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 319(1/2/3/4):282-294.
- [27] WAN H, XIE Y L, LI B, et al. An integrated method to identify and evaluate the impact of hydropower development on terrestrial ecosystem [J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2023, 99:e107042.
- [28] YI Y J, ZHOU Y, SONG J, et al. The effects of cascade dam construction and operation on riparian vegetation[J]. *Advances in Water Resources*, 2019, 131:e103206.
- [29] YANG Y, WANG Y H, CONG N, et al. Impacts of the Three Gorges Dam on riparian vegetation in the Yangtze River Basin under climate change[J]. *The Science of the Total Environment*, 2024, 912:e169415.
- (上接第 325 页)
- [20] 王亚蕊,王彦辉,于澎涛,等.华北落叶松人工林蒸散及产流对叶面积指数变化的响应[J]. *生态学报*, 2016, 36(21):6928-6938.
- WANG Y R, WANG Y H, YU P T, et al. Simulated responses of evapotranspiration and runoff to changes in the leaf area index of a *Larix principis-rupprechtii* plantation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(21):6928-6938.
- [21] 于哈.土壤水分运移模拟研究进展[J]. *安徽农学通报*, 2022, 28(2):108-110.
- YU H. Research progress in simulation of soil water transport[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2022, 28(2):108-110.
- [22] WANG J X, GAO X D, ZHOU Y Q, et al. Impact of conservation practices on soil hydrothermal properties and crop water use efficiency in a dry agricultural region of the Tibetan Plateau[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 200:e104619.
- [23] BAI X, JIA X X, ZHAO C L, et al. Artificial forest conversion into grassland alleviates deep-soil desiccation in typical grass zone on China's Loess Plateau: Regional modeling [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2021, 320:e107608.
- [24] ZHU W, ZHAO D H, DI N, et al. Matching root water uptake patterns to fine root and soil water distributions [J]. *Plant and Soil*, 2024, 495(1):499-516.