

DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2023.05.017.

郭天崎, 黄明斌, 朱谥远, 等. 基于双孔隙模型研究刺槐林地和苹果地水量平衡要素的差异性[J]. 水土保持研究, 2023, 30(5): 138-145.

GUO Tianqi, HUANG Mingbin, ZHU Miyuan, et al. Study on the Difference of Water Balance Between Robinia Pseudoacacia Forestland and Apple Orchard Based on Dual-Porosity Model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(5): 138-145.

基于双孔隙模型研究刺槐林地和苹果地水量平衡要素的差异性

郭天崎¹, 黄明斌², 朱谥远¹, 张锐¹

(1.西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学 水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的]明晰刺槐林地和苹果园水量平衡要素的动态变化和差异, 可为生态可持续发展提供理论指导。[方法]利用 Hydrus-1D 中的双孔隙模型和标定的参数模拟了 2012—2021 年刺槐林地和苹果地水量平衡各要素的动态变化过程。[结果]优化期和验证期 Hydrus-1D 中双孔模型的 R^2 分别为 0.61、0.76, RMSE 分别为 0.026、0.048 cm^3/cm^3 , 模拟期水量平衡误差分别为 0.18% 和 0.04%; 刺槐林地与苹果地的蒸腾量分别为 (372 ± 70) mm 和 (320 ± 34) mm, 蒸发量为 (256 ± 44) mm 和 (288 ± 36) mm, 土壤储水量变化量为 (-0.61 ± 96) mm 和 (-3.26 ± 87) mm, 深层渗漏量为 (34 ± 45) mm 和 (59 ± 48) mm。[结论]该模型可以较好地模拟刺槐林地和苹果地水量平衡要素的动态变化; 相比于苹果地, 刺槐林地的蒸腾量偏大, 蒸发量和深层渗漏量偏小, ΔS 的波动更为明显。

关键词: 土地利用方式; 双孔模型; 再分布过程; 土壤剖面水分含量; 水量平衡

中图分类号: S152.5; S161.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)05-0138-08

Study on the Difference of Water Balance Between Robinia Pseudoacacia Forestland and Apple Orchard Based on Dual-Porosity Model

GUO Tianqi¹, HUANG Mingbin², ZHU Miyuan¹, ZHANG Rui¹

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The study aims to clarify the dynamic changes and differences in water balance elements between *Robinia pseudoacacia* woodland and apple orchard, and to provide theoretical guidance for ecological sustainable development. [Methods] This study used the dual pore model and calibrated parameters in Hydrus-1D to simulate the dynamic changes of various elements of water balance in *Robinia pseudoacacia* woodland and apple orchard from 2012 to 2021. [Results] The R^2 and RMSE of the two hole model in the optimization and validation periods of Hydrus-1D were 0.61 and 0.76, respectively, and 0.026 and 0.048 cm^3/cm^3 , respectively. The water balance errors in the simulation period were 0.18% and 0.04%, respectively; The transpiration of *Robinia pseudoacacia* forestland and apple orchard were (372 ± 70) mm and (320 ± 34) mm, respectively, and the evaporation was (256 ± 44) mm and (288 ± 36) mm. Variation of soil water storage was (-0.61 ± 96) mm and (-3.26 ± 87) mm, and deep leakage was (34 ± 45) mm and (59 ± 48) mm. [Conclusion] The model can better simulate the dynamic changes of water balance elements in *Robinia pseudoacacia* woodland and apple orchard. Compared with apple fields, *Robinia pseudoacacia* forest has a larger transpiration,

收稿日期: 2022-07-15

修回日期: 2022-08-02

资助项目: 中国科学院战略性先导专项(B类)课题(XDB40000000); 中国科学院战略性先导科技专项课题(XDB20020202)

第一作者: 郭天崎(1998—), 女, 山西忻州人, 硕士研究生, 主要从事土壤物理研究。E-mail: guotq279@163.com

通信作者: 黄明斌(1968—), 男, 湖北荆门人, 研究员, 主要从事生态水文和土壤物理方面研究。E-mail: hmbd@nwsuaf.edu.cn

<http://stbcyj.paperonice.org>

a smaller evaporation and deeper leakage, and a more significant fluctuation in soil water storage.

Keywords: land use type; dual-porosity model; redistribution process; soil water content; water balance

干旱和半干旱的黄土高原地区植被覆盖度低,水土固持能力差^[1]。为了保持水土、改善生态环境,20世纪90年代实施了“退耕还林(草)”^[2]的治理措施,导致人工刺槐林和苹果园种植面积大幅度增加^[3-4]。然而,二者均为深根系、高耗水植物^[5-6],强烈的蒸腾作用会过量消耗深层土壤储水量,导致土壤干燥化,恶化土壤水分生态环境,造成土壤环境恶化,最终引起植被退化^[7-12]。因此,明晰人工刺槐林和苹果园耗水强度和水量平衡各要素的动态变化对生态可持续发展具有重要意义。

大孔隙通常是指直径位于75~5 000 μm 的孔隙^[13],主要是由植物根系、土壤动物、土壤团聚体和土壤裂隙等形成的^[14]。大孔隙使土壤导水率显著增加,入渗和再分布过程加快,出现优势流,对土壤剖面水分再分布和水平衡要素产生显著影响。研究表明,人工林增加和生态环境恢复有利于土壤大孔隙形成^[15],因此,研究人工刺槐林和苹果树水分消耗和水分平衡要素动态变化不能忽略大孔隙的影响。例如,Monika等^[16]应用Hydrus-1D模拟农田灌溉结果表明,考虑优先流的双孔隙模型能更加准确地模拟土壤水分动态过程;Lucas等^[17]人利用Hydrus-1D中的单孔和双孔隙模型对巴西半干旱地区水文过程进行模拟,得到双孔隙模型模拟结果更可靠。但是,目前考虑优势流的影响,利用双孔隙模型研究人工刺槐林和苹果地水量平衡差异性的报道还很少。

为此,本文以陕西省中国科学院长武黄土高原农业生态试验站附近的刺槐林和苹果地为研究对象,选择Hydrus-1D中的双孔水流模型研究优势流存在条件下刺槐林和苹果园水量平衡要素的动态变化和差异,其中,双孔模型中的水力参数用再分布过程和水分交换过程中测定的含水量动态来标定和检验,以期对刺槐林和苹果园的可持续发展提供相应的理论依据。

1 试验材料与方法:

1.1 研究区概况

试验区位于中国科学院长武黄土高原农业生态试验站附近,隶属于陕西省咸阳市长武县(107.8°E, 35.2°N),平均海拔为1 186.7 m,属于暖温带半湿润大陆性季风气候。年平均降水量584 mm,年平均气温9.1°C,无霜期171D,地下水位约50~80 m。主要

土壤类型为黑垆土,母质是马兰黄土。

1.2 田间试验

1.2.1 刺槐林和苹果地样地布设及土壤剖面水分含量监测 2021年5月在试验站附近选择具有代表性的刺槐林地和苹果地。在2块样地中分别选取代表性的位置安装3根5 m和1根3 m的中子管,其中3根5 m中子管用于土壤水分动态监测,1根3 m中子管用于后期土壤水分入渗和再分布试验。同时用铝盒按照0—100 cm隔10 cm,100—300 cm隔20 cm取土样,用烘干法测定土壤质量含水量;除此之外,在每块样地中选择代表性区域挖掘50 cm深的土壤剖面,按照10 cm间隔划分,共5层,利用环刀取各层原状土,每层3个重复,共15个。用于测定土壤容重^[18]、饱和含水量^[19],计算出总孔隙度^[20](表1)。假设50—300 cm土壤质地均匀^[21]。

5—11月用中子仪进行土壤剖面水分含量动态监测,时间间隔为10~15 d,测定的土层间隔为0—100 cm隔10 cm,100—300 cm隔20 cm。

1.2.2 入渗与再分布试验 2021年7月,利用双环入渗仪(JZ-IN12)进行入渗与再分布试验。双环入渗仪由双环入渗桶和马氏瓶组成,其内环直径为30 cm,外环直径为60 cm,与之匹配的马氏瓶容量分别为3 L,10 L。

入渗前,根据测定的土壤容重计算出总孔隙度。为确保入渗结束后50 cm剖面的土壤含水量接近饱和和含水量,因此利用0—50 cm剖面的总孔隙度计算出刺槐林地和苹果地的总灌溉量分别为125 L和100 L。然后以3 m长的中子管为圆心放置双环入渗桶,外环桶壁用土壤填充,确保无水分外流。然后,连接好对应的马氏瓶,开始注水于两环中,打开马氏瓶,内外环水位相同均控制在5 cm。灌水结束后,待地表无水层,即入渗过程结束,记录确切的入渗水量和入渗时间,开始水分再分布过程。按照入渗结束后1 h,3 h,6 h,12 h,24 h,48 h,96 h和192 h用中子仪测定土壤剖面水分含量,其中0—100 cm隔10 cm,100—300 cm隔20 cm。

1.2.3 叶面积指数的测定及计算 利用LAI-2200植物冠层分析仪,每隔7 d分别测定刺槐林地和苹果地的叶面积指数(Leaf area index, LAI)。将最大LAI和刺槐林、苹果树从发芽至落叶天数定为1,以相对LAI(0~1)和相对时间(0~1)为参数进行LAI

动态模拟。

采用 Curve Expert 1.4 曲线拟合软件^[22] 最终筛选,建立适合刺槐林地($R^2 = 0.99$)和苹果地($R^2 = 0.94$)的相对化 LAI 动态模型:

$$L_{\text{forest}} = 4.01t^3 - 9.83t^2 + 5.84t - 0.02 \quad (1)$$

$$L_{\text{apple}} = 5.33t^3 - 11.02t^2 + 5.75t - 0.01 \quad (2)$$

$$\text{LAI} = L_R \times \text{LAI}_{\text{max}} \quad (3)$$

式中: L_{forest} 和 L_{apple} 为刺槐林地和苹果地的相对 LAI 值(L_R); t 为相对生育时间; LAI_{max} 为最大叶面积指数。

查阅历史资料 and 实际测定得到 2010—2021 年长武试验站附近刺槐林地和苹果地的 LAI_{max} ,建立 LAI_{max} 的 年际变化回归方程,其中刺槐林地(R^2 为 0.98):

$$\text{LAI}_{\text{max}} = 0.30T - 609.58 \quad (4)$$

苹果地(R^2 为 0.98):

$$\text{LAI}_{\text{max}} = 0.0235T^2 - 94.644T + 95.361 \quad (5)$$

式中: T 为年份,将(4)、(5)式代入(3)式得到每日的叶面积指数。

1.3 模型评价与运用

1.3.1 双孔水流模型^[17] Hydrus-1D 模型中的双孔隙模型是基于 Richards 方程和简单的质量平衡方程的组合来描述大孔隙内的水分运动及基质中水分的动态交换过程:

$$\frac{\partial \theta_m}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial a} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] - S_m - \Gamma_w \quad (6)$$

$$\frac{\partial \theta_m}{\partial t} = -S_{im} + \Gamma_w \quad (7)$$

式中: m , im 分别表示大孔隙域和基质域; $\theta = \theta_m + m_{im}$ 为体积含水量(cm^3/cm^3); S_{im} , S_m 为两个区域的根系吸水速率(1/d); $K(h)$ 为非饱和导水率(cm/d); Γ_w 为大孔隙与基质之间水交换的交换速率(1/d),用如下公式计算:

$$\Gamma_w = \frac{\partial \theta_{im}}{\partial t} = \omega [S_e^m - S_e^{im}] \quad (8)$$

式中: θ_{im} 为基质含水量(cm^3/cm^3); ω 为一级交换速率系数(1/天); S_e^m , S_e^{im} 分别为大孔隙域和基质域相对含水量。

土壤水分特征曲线和非饱和导水率(K)与土壤含水量的关系由 van Genuchten-Mulaem 方程拟合^[23]:

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$K(h) = \begin{cases} K_s S_e [1 - (1 - S_e^{1/m})] & h < 0 \\ K_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (11)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (12)$$

式中: $\theta(h)$ 为体积含水量(cm^3/cm^3); θ_r 为残余含水量(cm^3/cm^3); θ_s 为饱和含水量(cm^3/cm^3); S_e 为相对含水量; K_s 为饱和导水率; α , n , m 均为土壤水力参数, $m = 1 - 1/n$; l 表示水力传导函数参数,常取 0.5。

Hydrus-1D 利用 Feddes 模型模拟水分胁迫和根系分布对根系吸水(S)的影响,方程如下^[23-24]:

$$S(h) = \alpha(h) S_p = \alpha(h) b(x) T_p \quad (13)$$

式中: $\alpha(h)$ 为水分胁迫响应函数,介于 0~1; S_p 为潜在根系吸水速率(cm/d); $b(x)$ 为根系吸水分配密度函数; T_p 为潜在蒸腾速率(cm/d)。

1.3.2 模型评价

(1)模型参数标定。解方程(6—13)需要确定水力参数 θ_r , θ_{rim} , θ_s , θ_{sim} , α , n , K_s 和 ω 。鉴于大孔隙域中水流特征, θ_r 设置为 0, θ_{rim} 取值为 $0.078 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。 l 默认为 0.5,同时 $\theta_s = \theta_{sm} + \theta_{sim}$ 。因此,对每种质地的土壤,当假设 θ_s 等于孔隙度时,模型共有 θ_{sim} , α , n , K_s 和 ω 5 个参数需要确定。由于研究的土壤剖面质地均匀,本文仅根据耕作层深度将土壤剖面分为两层:耕层 0—30 cm 和非根层 30—300 cm。每层 5 个土壤水力参数利用土壤水分再分布过程中测定的含水量动态通过 Hydrus-1D 的反演模块优化得到。各参数初值均采用过去研究结果,参数上下边界均根据过去研究经验设置^[25-27]。

(2)模型检验。标定的模型参数用 2021 年 5—11 月测定的土壤含水量动态进行检验,决定系数(Coefficient of determination, R^2)和均方根误差(Root mean square error, RMSE)作为模型检验指标。 R^2 越接近 1, RMSE 值越接近 0,表明模拟值与实际值拟合度更好。 R^2 与 RMSE 的计算公式如下:

$$R^2 = \frac{\text{cov}(S_i, O_i)}{\text{var}(S_i) \text{var}(O_i)} \quad (14)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2} \quad (15)$$

式中 S_i 和 O_i 分别为模拟值和实测值; N 为观测样本个数; i 为样本号。

1.3.3 模型应用 检验好的模型参数将用来模拟刺槐林地和苹果地水量平衡过程,模拟时间段为 2012—2021 年,该期间刺槐和苹果均已进入稳定生长阶段,假设根系分布不变,只考虑 LAI 和气候变化对刺槐林地和苹果地水量平衡的影响。由于刺槐林

地和苹果地处于黄土塬旱区,地势较平坦,入渗能力强,无地表径流,降水是唯一的水来源。因此,水量平衡方程可简化为^[28-30]:

$$P = T_r + E + \Delta S + D \quad (16)$$

式中: P 为降雨量(mm); T_r 为植物蒸腾量(mm); E 为土壤蒸发量(mm); ΔS 为土壤储水量的变化量(mm); D 为深层渗漏量(mm)。

1.3.4 模型边界条件和初始条件 模型标定、检验和应用过程上下边界分别设定为近地层大气边界和自由排水下边界。再分布过程时间尺度是小时(h),模型验证和应用阶段时间尺度均为日(d)。

再分布开始 0 h 测定的土壤含水量剖面作为再分布过程的初始水分剖面,验证过程中第一次测定土壤水分含量用作初始含水量剖面,而模型应用阶段初始含水量剖面用 spin-up 方法来确定。首先收集了 2010—2011 年气象和刺槐林和苹果地 LAI 资料,验证后的模型运行两年获得 2011 年 12 月 31 日含水量剖面,该剖面用作模拟期间 2012—2021 年的初始含水量。模拟期间所有气象资料从长武农业生态国家野外试验站气象观测站获得,其中潜在蒸散发量(PET)利用 Priestley-Taylor 公式计算,PT(潜在蒸腾)和 PE(潜在蒸发)利用 LAI 值采用如下公式计算:

$$PT = PET(1 - e^{-\mu LAI}) \quad (17)$$

$$PE = PET - PT \quad (18)$$

式中: μ 为消光系数,刺槐林地和苹果地分别取值为 0.54^[27,31]和 0.65^[32-33]。

表 1 刺槐林地和苹果地的土壤物理性质

土地利用类型	土层	土层深度/cm	容重/($g \cdot cm^{-3}$)	总孔隙度 f	饱和含水量/($cm^3 \cdot cm^{-3}$)
刺槐林地	1	0—30	1.26±0.009	0.52±0.003	0.50±0.011
	2	30—300	1.34±0.036	0.49±0.013	0.45±0.018
苹果地	1	0—30	1.32±0.006	0.50±0.002	0.49±0.014
	2	30—300	1.35±0.019	0.49±0.007	0.47±0.052

注:数据组成为平均值±标准误差。

2.2 模型参数优化

基于水分再分布过程土壤剖面含水量监测数据,采用 Hydrus-1D 对土壤再分布过程进行分层模拟,以优化刺槐林地和苹果地的土壤水力参数,结果见表 2。

从表 2 可知,刺槐林地和苹果地表层(0—30 cm)土壤的大孔隙体积占比分别为 24%和 21%,深层(30—300 cm)为 7%和 17%,即随土层深度的增加大孔隙逐步减少,这与根系剖面分布一致;较苹果地而言,刺槐林地表层(0—30 cm)和深层(30—300 cm)的大孔隙分布差异更大,表层大孔隙几乎为深层大孔隙的 4

刘秀萍等^[34]和龚道枝等^[35]测定了黄土高原刺槐林地和苹果地的根系分布,测定结果证实刺槐林地和苹果地根系分别主要集中在 120 cm 和 200 cm 内,测定的最大根长密度 L_{max} 分别为 0.000 38 cm/cm^3 , 0.178 1 cm/cm^3 。利用其试验资料建立刺槐林地($R^2=0.96$)和苹果地($R^2=0.91$)的相对根长密度分布函数:

$$L_{rf}(Z) = \frac{0.211 + 0.33Z}{1 - 4.641Z + 6.706} \quad (19)$$

$$L_{ra}(Z) = 1.0813e^{-0.03Z} \quad (20)$$

式中: L_{rf} 和 L_{ra} 为刺槐林地和苹果地相对根长密度(L_r); Z 为深度。

1.4 数据分析与制图

数据的分析和制图采用 Excel 2019 和 Origin 2022 统计软件。

2 结果与分析

2.1 刺槐林和苹果园土壤基本物理性质

由表 1 可知,刺槐林地和苹果地表层土壤容重差别较大,深层土壤容重相近。0—30 cm 表现为苹果地(1.32 g/cm^3)>刺槐林地(1.26 g/cm^3),30—300 cm 则苹果地(1.35 g/cm^3)与刺槐林地(1.34 g/cm^3)近似。同一土地利用方式下不同土层的总孔隙度也存在差异,其中刺槐林地表层(0—30 cm)的总孔隙度大于深层(30—300 cm),而苹果地表层和深层土壤的总孔隙度相近。测定的饱和含水量的剖面变化规律与总孔隙度一致。

倍,且刺槐林地表层的水质交换速率 ω (0.344)约是深层(0.05)的 7 倍,但苹果地整个土壤的水质交换速率无明显差异,均为 0.01;此外,饱和导水率(K_s)均表现为随土层深度增加而降低,表层(0—30 cm)约为深层(30—300 cm)的 2.3 倍,二者相比,苹果地的 K_s 更大,约为刺槐林地的 2.3 倍。

刺槐林地和苹果地的再分布过程模拟结果如图 1 所示。刺槐林地和苹果地均随时间产生相似的土壤水分动态变化。在 30 cm 处由于土壤质地的变化土壤水分发生突然变化。192 h 的模拟值明显大于

实测值,其他模拟时间段内 0—30 cm 过高的估计的土壤水分含量,可能是中子仪测定表层土壤水分时,中子扩散不稳定造成的^[36],30—300 cm 的模拟值与实测值较为一致。192 h 实测值与模拟值差异可能来源于入渗水分沿中子管的管壁快速渗漏,导致 192 h

模拟值始终大于实测值。

图 2 为模拟值与实测值的相关性分析,刺槐林地和苹果地的实测值与模拟值的 R^2 ,RMSE 分别为 0.76,0.048 cm^3/cm^3 ,0.76,0.030 cm^3/cm^3 。高的决定系数和低的 RMSE 值表明该优化参数较合理。

表 2 刺槐林地和苹果地的土壤水力参数

土地利用类型	土层	土层深度/cm	θ_r	θ_s	α	n	$K_s / (\text{cm} \cdot \text{h}^{-1})$	θ_{rim}	θ_{sim}	ω
刺槐林地	1	0—30	0	0.119	0.0036	2.163	14.00	0.078	0.381	0.344
	2	30—300	0	0.030	0.0049	2.150	6.63	0.078	0.420	0.050
苹果地	1	0—30	0	0.101	0.0237	1.419	41.40	0.078	0.389	0.010
	2	30—300	0	0.078	0.0343	1.471	15.80	0.078	0.392	0.010

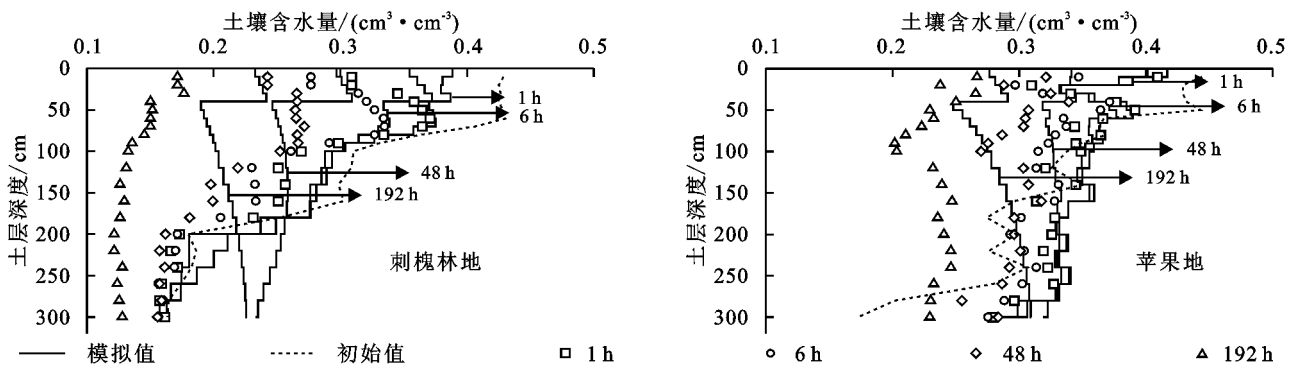


图 1 刺槐林地和苹果地再分布过程土壤剖面实测值与模拟值比较

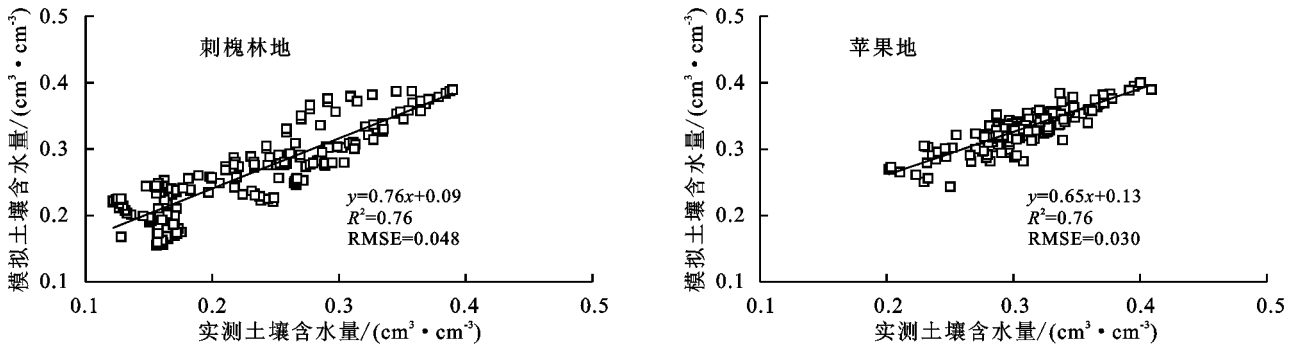


图 2 刺槐林地和苹果地水分再分布过程土壤水分实测值与模拟值线性分析

2.3 模型验证

利用标定的水力参数(表 2)模拟了 2021 年 5—11 月在刺槐林地和苹果地土壤水分动态。整体上,模拟值与实测值较接近。其相关性分析如图 3 所示。刺槐林地和苹果地的 R^2 分别为 0.63,0.61, RMSE 分别为 0.026 cm^3/cm^3 ,0.029 cm^3/cm^3 ,误差在允许范围之内^[37]。说明本文采用的双孔隙模型可以较好地预测该区域刺槐林地和苹果地的土壤水分动态变化。但是,在 260 d 后该模型低估了 160 cm 和 300 cm 深度的土壤水分(图 4),可能是模型忽略了入参与再分布之间的滞后效应,使得模拟结果出现一定误差^[38]。因为在第 260 天出现了一次大的降雨过程,剖面水分运动以入渗为主,而模型参数优化以再分布过程为

主,滞后效应导致二者水分特征曲线的差异影响了模型精度。

2.4 刺槐林地和苹果地水量平衡要素动态变化

在干旱半干旱黄土高原区,降雨是唯一的水分来源^[11]。水量平衡要素主要为植物蒸腾、土壤蒸发、土壤储水量变化量和深层渗漏。利用上述优化验证后的模型对刺槐林地和苹果地水量平衡各要素进行模拟,结果显示水量平衡平均相对误差(δ)分别为 0.18% 和 0.04%,误差较小,对模拟结果的影响可忽略不计,表明该模型可以较好地模拟刺槐林地和苹果地水量平衡各要素的动态变化。

水量平衡各要素模拟结果(图 5)显示,刺槐林地和苹果地的水量平衡各要素的动态变化规律存在明

显差异。由图 5 可知,刺槐林地的蒸腾量大于蒸发量,两者总和为(629±71) mm,占到降雨量的 95%。其中,蒸腾量为(372±70) mm,在平水年,占到降雨量的 41%~61%,在干旱年,可达到 58%~81%;蒸发量为(256±44) mm,在平水年占到降雨量的 23%~43%,干旱年达 37%~66%。而苹果地的蒸腾量略大于蒸发量,两者总和是(608±58) mm,占到降雨量

的 92%。其中蒸腾量为(320±34) mm,在平水年,占到降雨量的 36%~48%,在干旱年可达到 47%~66%;蒸发量为(288±36) mm,在平水年占到降雨量的 30%~44%,干旱年达到 45%~62%。相比于刺槐林地,苹果地的蒸腾量较小,主要原因是苹果种植密度低,叶面积指数小,模拟期间苹果地平均最大叶面积指数是 2.41,刺槐林平均最大叶面积指数是 3.63。

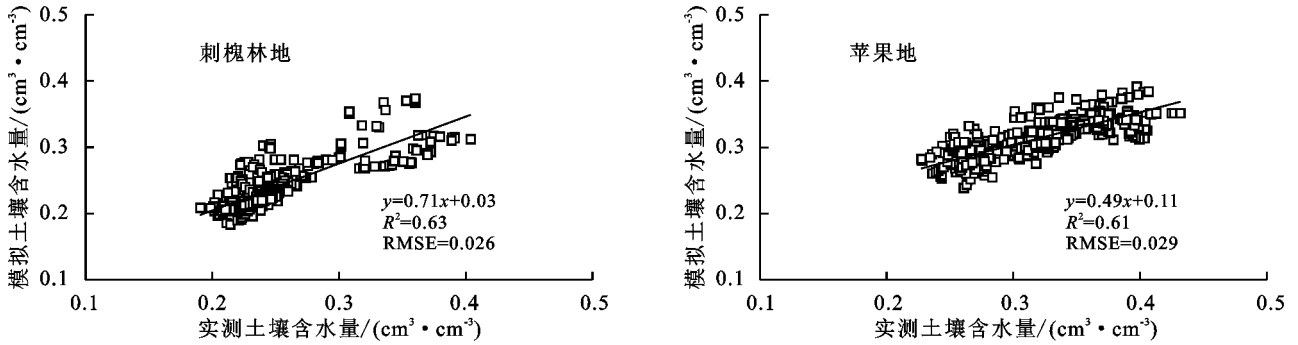


图 3 刺槐林地和苹果地土壤水分实测值与模拟值线性分析

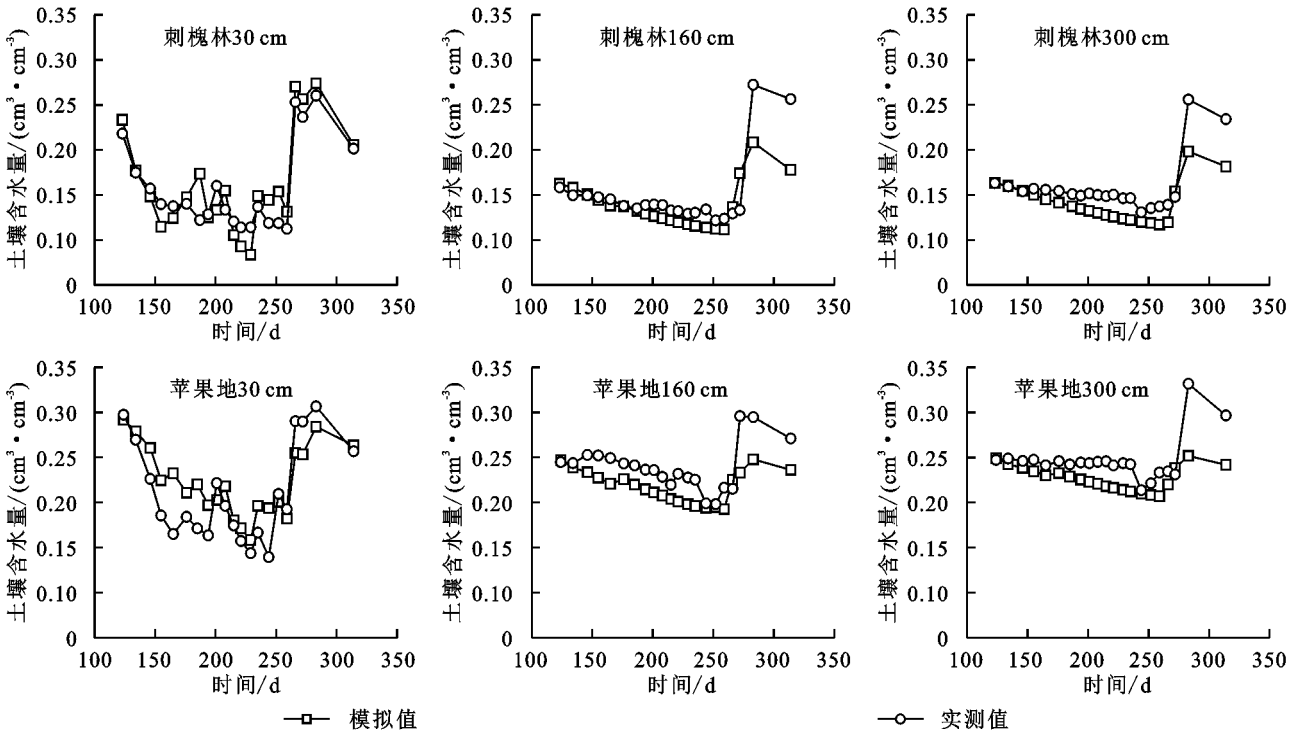


图 4 刺槐林地和苹果地深度土壤水分模拟值与实测值比较

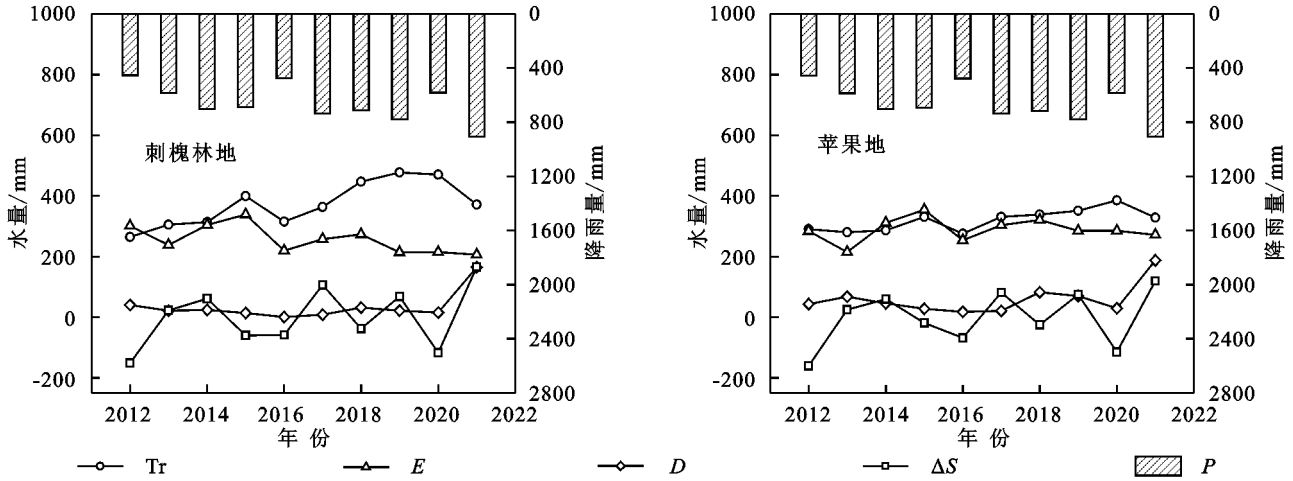
模拟期间,刺槐林地和苹果地的 ΔS 的波动趋势与降雨量基本一致。其中,刺槐林地的土壤储水量变化量为(-0.61±96) mm,苹果地为(-3.26±87) mm。从总趋势来看,两种林地土壤储水量均略有减小,主要由于在干旱年刺槐林和苹果树的蒸散发量大于降雨量,消耗土壤储水量,使其出现亏损,而丰水年降雨量虽然大于蒸散发量,土壤储水量得到了一定的补充,但多年的补充量小于亏损量。相对于苹果地,刺槐林地 ΔS 值波动更为明显,模拟期间 ΔS 的方差

明显大于苹果地,主要原因是刺槐林种植密度大,叶面积指数大,干旱年土壤水分消耗大,而丰水年土壤水分得到补充^[39]。

此外,模拟期间,刺槐林地深层渗漏量为(34±45) mm,平水年占到降雨量的 6%,干旱年达到 4%。苹果地的深层渗漏量为(59±48) mm,平水年占到降雨量的 10%,干旱年占到 7%。降雨量大的年份深层渗漏均明显增加,尤其是 2021 年,刺槐林地和苹果地的深层渗漏量达到 164 mm 和 187 mm,分别占到降

雨量的18.16%和20.63%。相比于刺槐林地,模拟期间苹果地的深层渗漏量更大,主要由于苹果地深层

(30—300 cm)的大孔隙多,而大孔隙是降雨对深层渗漏主要的补给途径^[40]。



注:Tr 是植物蒸腾量;E 是土壤蒸发量;D 是深层渗漏量; ΔS 是土壤储水量变化量;P 是降雨量。

图5 2012—2021年刺槐林地和苹果地水量平衡要素动态变化

3 结论

(1) 利用干旱半干旱黄土高原区的刺槐林地和苹果地再分布过程和实测土壤剖面含水量数据对Hydrus-1D中的双孔隙模型参数进行标定和验证, R^2 在0.61~0.74, RMSE在0.026~0.048 cm^3/cm^3 ;水量平衡 δ 在0.04%~0.18%,误差在合理范围之内。因此该模型可以较好地用于模拟黄土高原区刺槐林地和苹果地的水量要素动态变化。

(2) 刺槐林地和苹果地的水量平衡要素主要受降雨量的影响,但水量平衡要素的动态变化存在明显差异。相比于苹果地,刺槐林地的蒸腾量更大,蒸发量和深层渗漏较小, ΔS 的波动更明显。

参考文献:

[1] 陈明玉,邵明安,李同川,等.黄土高原典型切沟土壤水分时空分布特征及其影响因素[J].土壤学报,2021,58(2):381-390.

[2] 张琨,吕一河,傅伯杰,等.黄土高原植被覆盖变化对生态系统服务影响及其阈值[J].地理学报,2020,75(5):949-960.

[3] 郭军庭,张志强,唐丽霞.晋西黄土区小流域典型植被水文功能优化研究[J].水土保持通报,2010,30(3):36-40.

[4] 王艳萍,王力,韩雪,等.黄土塬区不同土地利用方式土壤水分消耗与补给变化特征[J].生态学报,2015,35(22):7571-7579.

[5] 白岗栓,邹超煜,杜社妮.渭北旱塬果园自然生草对土壤水分及苹果树生长的影响[J].农业工程学报,2018,34(3):151-158.

[6] 安文明,梁海斌,王聪,等.黄土高原阴/阳坡向林草土壤

水分随退耕年限的变化特征[J].生态学报,2017,37(18):6120-6127.

[7] 邵明安,贾小旭,王云强,等.黄土高原土壤干层研究进展与展望[J].地球科学进展,2016,31(1):14-22.

[8] 于贵瑞,李文华,邵明安,等.生态系统科学研究与生态系统管理[J].地理学报,2020,75(12):2620-2635.

[9] 郭慧敏,张彦军,刘庆芳,等.黄土高原半干旱区土壤呼吸对土地利用变化的响应[J].自然资源学报,2014,29(10):1686-1695.

[10] 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.

[11] 程立平,王亚萍,齐光.黄土塬区苹果种植对深剖面土壤水分和地下水补给的影响[J].地理研究,2021,40(9):2684-2694.

[12] 杨文治,田均良.黄土高原土壤干燥化问题探源[J].土壤学报,2004,41(1):1-6.

[13] Soil Science Glossary Terms Committee, Soil Science Society of America. Glossary of soil science terms 2008 [R]. ASA-CSSA-SSSA, 2008.

[14] 高朝侠,徐学选,赵娇娜,等.土壤大孔隙流研究现状与发展趋势[J].生态学报,2014,34(11):2801-2811.

[15] Bargaúes Tobella A, Reese H, Almaw A, et al. The effect of trees on preferential flow and soil infiltrability in an agroforestry parkland in semiarid Burkina Faso [J]. Water Resources Research, 2014,50(4):3342-3354.

[16] Markovi M, Filipovi V, Legovi T, et al. Evaluation of different soil water potential by field capacity threshold in combination with a triggered irrigation module [J]. Soil and Water Research, 2015,10(3):164-171.

[17] Alcantara L R P D, Coutinho A P, Neto S M D S, et al. Modeling of the Hydrological Processes in Caatinga

- and Pasture Areas in the Brazilian Semi-Arid[J]. *Water*, 2021(13):1877.
- [18] 江胜国.国内土壤容重测定方法综述[J].*湖北农业科学*,2019,58(S2):82-86,91.
- [19] 李映强,曾觉延.关于土壤通气孔隙概念及其测定方法的商榷[J].*土壤通报*,1990,21(2):87-88.
- [20] 邹文安,姜波,顾李华.土壤水分常数的测定[J].*水文*,2015,35(4):62-66.
- [21] Yang F, Huang M B, Li C H, et al. Changes in soil moisture and organic carbon under deep-rooted trees of different stand ages on the Chinese Loess Plateau[J]. *Agriculture, Ecosystem & Environment*, 2022, 328 (1):1-14.
- [22] 张宾,赵明,董志强,等.作物高产群体 LAI 动态模拟模型的建立与检验[J].*作物学报*,2007,33(4):612-619.
- [23] Agarwal P, Sharma P K. Analysis of critical parameters of flow and solute transport in porous media[J]. *Water Science & Technology Water Supply*, 2020, 20 (8):3449-3463.
- [24] Rabbal I, Bogena H, Neuwirth B, et al. Using Sap Flow Data to Parameterize the Feddes Water Stress Model for Norway Spruce[J]. *Water*, 2018, 10(3):279, Doi:org/10.3390/w10030279.
- [25] Li Y, Yu Y, Sun R, et al. Simulation of soil water dynamics in a black locust plantation on the Loess Plateau, Western Shanxi Province, China [J]. *Water*, 2021,13(9):1213.
- [26] Li B B, Wang Y Q, Hill R L, et al. Effects of apple orchards converted from farmlands on soil water balance in the deep loess deposits based on HYDRUS-1D model[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2019,285(C):106645.
- [27] 李蓝君,宋孝玉,夏露,等.黄土高原沟壑区典型造林树种蒸散发对气候变化的响应[J].*农业工程学报*,2018,34(20):148-159.
- [28] Zhao C Y, Feng Z D, Chen G D. Soil water balance simulation of alfalfa(*Medicago sativa* L.)in the semiarid Chinese Loess Plateau[J]. *Agricultural Water Management*, 2004,69(2):101-114.
- [29] 程立平,刘文兆,李志.黄土塬区不同土地利用方式下深层土壤水分变化特征[J].*生态学报*,2014,34(8):1975-1983.
- [30] Fan J, Wang Q J, Jones S B, et al. Soil water depletion and recharge under different land cover in China's Loess Plateau[J]. *Ecohydrology*, 2016,9(3):396-406.
- [31] 贺康宁,田阳,张光灿.刺槐日蒸腾过程的 Penman-Monteith 方程模拟[J].*生态学报*,2003,23(2):251-258.
- [32] 高登涛,郭景南,魏志峰,等.中部地区两类矮砧密植苹果园生产效率及光照质量评价[J].*中国农业科学*,2012,45(5):909-916.
- [33] 焦醒,刘广全,土小宁.黄土高原植被恢复水资源承载力核算[J].*水利学报*,2014,45(11):1344-1351.
- [34] 刘秀萍,陈丽华,陈吉虎.刺槐和油松根系密度分布特征研究[J].*干旱区研究*,2007,24(5):647-651.
- [35] 龚道枝.苹果园土壤—植物—大气系统水分传输动力学机制与模拟[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2005.
- [36] 田昌玉,孙文彦,林治安,等.中子仪测定土壤水分方法的研究进展[J].*中国农学通报*,2011,27(18):7-11.
- [37] 张洛丹,张瑜,黄明斌,等.黄土高原沟壑区两种乔木林土壤水分平衡的模拟[J].*水土保持研究*,2015,22(2):26-31.
- [38] Huang M B, Barbour S L, Elshorbagy A, et al. Infiltration and drainage processes in multi-layered coarse soils[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2015,91(2):185-197.
- [39] 陈维梁,王树学,齐统祥,等.黄土丘陵区不同恢复年限人工刺槐林土壤水分时空动态及其时间稳定性[J].*生态学报*,2021,41(14):5643-5657.
- [40] 郑双科,司炳成,张志强,等.黄土塬区苹果园降雨入渗机制[J].*应用生态学报*,2017,28(9):2870-2878.