

基于 HYDRUS-1D 模型的半干旱黄土区 典型整地措施土壤水分动态模拟

董红霞¹, 张钦弟¹, 卫强²

(1.山西师范大学 生命科学学院, 山西 太原 030031; 2.山西冶金岩土工程勘察有限公司, 山西 太原 030000)

摘要: [目的] 探究不同整地措施下的土壤水分动态特征, 为评估坡面整地的生态水文效益, 促进旱区植被恢复提供科学依据。[方法] 通过半干旱黄土区油松林自然坡面和鱼鳞坑、反坡台的原位对照研究, 基于土壤水分动态监测, 结合降雨事件, 利用 HYDRUS-1D 软件模拟, 揭示不同整地措施对土壤水分垂直运移特征的影响。[结果] ①一维非饱和土壤水分运移数值模型对 0—40 cm 土壤水分的模拟精度大于 40—100 cm, 适于表层(0—40 cm)土壤水分的模拟; 整个研究期内, 相同降雨条件下, 鱼鳞坑、反坡台的土壤水分通量显著大于相应对照自然坡面样地 ($p < 0.05$), 鱼鳞坑的土壤水分通量显著大于反坡台 ($p < 0.05$)。②单独降雨条件下, 0—40 cm 内鱼鳞坑、反坡台的土壤水分通量比相应对照自然坡面样地平均提高 9.07%, 4.02%; 鱼鳞坑、反坡台与相应对照自然坡面样地的平均差值最大在 20, 30 cm 处, 分别为 0.79%, 0.37%, 整体呈先增后减趋势; 降雨量为 5—10 mm 时, 鱼鳞坑、反坡台的土壤水分通量最大为 1.94%, 1.42%, 分别在 30, 40 cm; 降雨量 > 10 mm 时, 鱼鳞坑、反坡台的土壤水分通量最大值均在 0—20 cm, 随降雨量增大而逐渐降低; 鱼鳞坑、反坡台各层土壤水分通量之间差异均不显著。③持续降雨条件下, 0—40 cm 内鱼鳞坑、反坡台的土壤水分通量比其对照自然坡面样地平均提高 10.73%, 4.72%; 鱼鳞坑、反坡台与相应对照自然坡面样地的差值在 0—20 cm 内最显著 ($p < 0.05$), 平均差值整体均呈递减趋势; 鱼鳞坑、反坡台与相应对照自然坡面样地各层的差值在降雨量为 10—20 mm 时最显著 ($p < 0.05$), 最大增量均在 10 cm 处, 分别为 1.35%, 0.53%; 鱼鳞坑各层的平均土壤水分通量呈递减趋势, 反坡台呈递增趋势; 不同降雨特征下, 鱼鳞坑、反坡台土壤水分通量最大值的深度不同, 降雨量 < 20 mm 时, 鱼鳞坑、反坡台在 10, 20 cm, 分别为 1.58%, 0.72%, 降雨量 > 20 mm, 均在 40 cm, 为 2.61%, 1.92%; 鱼鳞坑、反坡台各层土壤水分通量间的显著性也不相同, 降雨量为 5—10 mm 时鱼鳞坑各层土壤水分通量之间均有显著差异 ($p < 0.05$), 反坡台在 20—40 cm 土壤水分通量之间有显著差异 ($p < 0.05$)。[结论] 鱼鳞坑、反坡台均对土壤水分有不同程度的影响, 鱼鳞坑在降雨条件下蓄水效果更好。

关键词: 黄土地区; 半干旱地区; 整地措施; HYDRUS-1D; 降雨; 土壤水分

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2023)05-0156-13

中图分类号: S152.7, X171.1

文献参数: 董红霞, 张钦弟, 卫强. 基于 HYDRUS-1D 模型的半干旱黄土区典型整地措施土壤水分动态模拟[J]. 水土保持通报, 2023, 43(5): 156-168. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.05.019; Dong Hongxia, Zhang Qindi, Wei Qiang. Dynamic simulation of soil moisture under typical land preparation in semi-arid loess area using HYDRUS-1D model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(5): 156-168.

Dynamic Simulation of Soil Moisture Under Typical Land Preparation in Semi-arid Loess Area Using HYDRUS-1D Model

Dong Hongxia¹, Zhang Qindi¹, Wei Qiang²

(1. College of Life Sciences, Shanxi Normal University, Taiyuan, Shanxi 030031, China;

2. Shanxi Metallurgical Rock-Soil Engineering Investigation Limited Company, Taiyuan, Shanxi 030000, China)

Abstract: [Objective] The dynamic characteristics of soil moisture under different land preparation measures were analyzed in order to provide a scientific basis for assessing the eco-hydrological benefits of slope land preparations and for promoting vegetation restoration in arid areas. [Methods] We used an in-situ controlled

收稿日期: 2022-12-08

修回日期: 2023-02-08

资助项目: 国家重点研发计划课题“缓坡丘陵区油松和柠条林水土保持及碳汇功能提升技术”(2022YFF1300403); 山西省基础研究计划(20210302123333); 山西省回国留学人员科研资助项目(2021-097)

第一作者: 董红霞(1996—), 女(汉族), 山西省忻州市人, 硕士研究生, 研究方向为植被生态学。Email: 17835062632@139.com。

通信作者: 张钦弟(1982—), 男(汉族), 河南省南阳市人, 博士, 副教授, 主要从事植被生态和生态水文研究。Email: nyzqd@126.com。

study of natural slopes, fish-scale pits, and reverse slopes of a *Pinus tabulaeformis* forest in a semi-arid loess area along with dynamic monitoring of soil moisture and rainfall events and HYDRUS-1D software simulations to quantify the effects of different land preparation measures on the vertical migration characteristics of soil moisture. [Results] ① The simulation accuracy of the one-dimensional unsaturated soil moisture transport numerical model for soil moisture in the 0—40 cm layer was greater than that of the 40—100 cm layer, which was suitable for the simulation of surface (0—40 cm) soil moisture. During the entire study period, under the same rainfall conditions, the soil moisture fluxes of the fish-scale pits and the reverse slope terraces were significantly higher than the soil moisture flux of the corresponding natural slope ($p < 0.05$). The soil moisture flux of the fish-scale pits was significantly higher than that of the reverse slope terraces ($p < 0.05$). ② Under individual rainfall conditions, the soil moisture fluxes of the fish-scale pits and the reverse slope terraces for the 0—40 cm layer were 9.07% and 4.02%, respectively, higher than that of corresponding natural slope plots. The average differences between the fish-scale pits, the reverse slope terraces, and the corresponding natural slope sample plots were the largest at 20 and 30 cm, which were 0.79% and 0.37%, respectively, exhibiting an overall trend of first increasing and then decreasing. When the rainfall was 5—10 mm, the maximum soil moisture fluxes of the fish-scale pits and the reverse slope terraces were 1.94% and 1.42%, respectively, at 30 cm and 40 cm. When the rainfall was more than 10 mm, the maximum soil moisture fluxes of the fish-scale pits and the reverse slope terraces were 0—20 cm, which gradually decreased with increasing rainfall. There was no significant differences in soil moisture fluxes between fish-scale pits and reverse slope terraces. ③ Under continuous rainfall, soil moisture fluxes of fish-scale pits and reverse slope terraces in 0—40 cm layer were 10.73% and 4.72% higher than the soil moisture flux of the control natural slope. The differences between fish-scale pits, reverse slope terraces and the corresponding control natural slope plots were the most significant within 0—20 cm layer ($p < 0.05$), and the average difference showed an overall decreasing trend. The differences between fish scale pits, reverse slope terraces, and corresponding control natural slope at each soil layer were the most significant when the rainfall was 10—20 mm ($p < 0.05$), and the maximum increment was at 10 cm, which was 1.35% and 0.53%, respectively. The average soil moisture flux in each layer of the fish-scale pits showed a decreasing trend, and the reverse slope terraces showed an increasing trend. Under different rainfall conditions, the depth of the maximum soil moisture flux of the fish-scale pits and the reverse slope terraces was different. When the rainfall was less than 20 mm, the fish-scale pits and the reverse slope terraces were at 10 and 20 cm, which were 1.58% and 0.72%, respectively. When rainfall was > 20 mm, the values for both fish-scale pits and reverse slope terraces at 40 cm were 2.61% and 1.92%. There were significant differences in soil moisture flux between each layer of the fish-scale pits and the reverse slope terraces. When the rainfall was 5—10 mm, there were significant differences in soil moisture fluxes between each layer of the fish-scale pits ($p < 0.05$), and there were significant differences in soil moisture fluxes between 20—40 cm in the reverse slope terraces ($p < 0.05$). [Conclusion] The fish-scale pits and the reverse slope terraces had different effects on soil moisture. The fish-scale pits had better water retention under rainfall conditions.

Keywords: loess area; semi-arid area; land preparation; HYDRUS-1D; rainfall; soil moisture

土壤水分是植被生存和生长的重要影响因素,在生态系统中扮演着重要的角色。尤其在旱区,土壤水分缺乏是植被生长的主要限制因素^[1]。旱区土壤水分的补给主要来源于降雨,但一部分降雨伴随产生的径流被消耗,一部分因植被蒸腾作用和冠层截留的影响,降低了降雨对土壤水分的补给^[2-3]。因此,为了

提高自然降雨对土壤水分的补给,整地措施被广泛应用于旱区的植被恢复和生态建设。整地措施不仅可以通过改善土壤粒径分布,减少地表径流,而且可以通过改变地形,减少蒸发面积,改善雨水收集,影响土壤的持水性以及抗旱性^[4-5],提高土壤水分^[6]。旱区整地措施与土壤水分的相关研究大多从不同植被

类型、不同土壤质地、不同土地利用方式等^[7-8]方面进行研究。诸多研究均表明整地措施能够有效减少水土流失,增加土壤水分和养分储存,改善土壤水力学性质^[9]。目前大多数研究主要通过野外监测^[10]、人工试验^[11]、数值模拟等^[12-13]方法进行。数值模拟中 HYDRUS, SWMS, SWAP 等数学模型被广泛应用^[14]。其中, HYDRUS-1D 是美国农业部盐土实验室开发的一款包括水分运移,溶质运移,热运移等多个模块的有限元计算机模型。HYDRUS-1D 能够基于 Richards 原理,综合考虑大气—植被—土壤中的水分运移,适用于非饱和带土壤水分运移过程的研究^[15-16],被广泛应用于模拟土壤水分运移的研究中^[17-18]。杨玉峥等^[13]通过 HYDRUS-1D 软件结合土壤水量平衡方程发现大沽河地下水浅埋区农田的土壤水分与降雨、地下水位埋深之间有较快的响应关系。除此之外,数值模拟可以模拟演算一些难以动态监测的变量。特别是在土层深厚的黄土高原,可以利用数值模拟基于少量监测,有效模拟水文过程^[17]。例如:Lü Haishen 等^[19],霍思远等^[20]通过 HYDRUS-1D 软件对黄土高原的旱地梯田及华北平原的衡水地区土壤水分的模拟,表明该模型适用于以上地区的土壤水分模拟。Yi Caiqiong 等^[21]用 HYDRUS-1D 软件对黄土高原土壤前期含水量进行模拟,验证并得出该模型能够模拟出合理的土壤前期含水量值。

目前数值模拟的方法在半干旱黄土区的应用已相对成熟。黄土高原虽属于典型半干旱黄土区,但由于其水土流失严重^[22],年降雨量为 500~600 mm,常年降雨稀少,地下水埋深,季节分布不均匀^[23-24]特殊的气候特征以及降雨入渗和蒸散量的动态监测比较困难,土壤水分动态变化难以准确监测。目前的研究大多从降雨特征、植被、土壤机械组成等对土壤水分变化进行研究。刘小璐等^[25]采用 HYDRUS-1D 软件对不同降雨特征下黄土高原丘陵区土壤水分的变化规律研究中,得出不同的降雨量入渗深度不同,并指出降雨量为 50 mm 时入渗最深可达 100 cm。于洋等^[6]利用实测土壤水分特征曲线与数学模型相结合,对比油松林在不同整地措施下的土壤有效水分,发现不同整地措施下的土壤机械组成不同,对土壤水分有效性的改善程度不同。使用 HYDRUS-1D 软件针对单一植被从降雨条件、不同整地措施的角度探究土壤水分动态变化的研究较少。因此,基于数值模拟的方法,准确探究降雨条件下,不同整地措施下土壤水分动态模拟,阐明不同整地措施下土壤水分通量的动态变化是非常必要的,且对于优化半干旱区整地措

施与植被的结合以及揭示有限水资源条件下植被维持生态系统的机制具有重要的意义。基于此,本研究通过半干旱黄土区油松林自然坡面和鱼鳞坑、反坡台的原位对照研究,基于实测的土壤水分数据,建立一维非饱和数值模型,模拟降雨后各整地措施下的土壤水分变化,分析不同降雨条件下土壤水分通量的变化情况,揭示不同降雨条件下半干旱区土壤水分的垂向运移特征以及土壤水分入渗量、影响深度,提高土壤水资源利用,为半干旱黄土区的生态服务建设提供科学的理论依据。

1 研究区概况

龙滩流域(104°27'—104°31'E, 35°43'—35°46'N)位于甘肃省定西市安定区岷口镇,海拔 1929~2 211 m,流域面积 16.1 km²,平均降水量 386.3 mm,地貌类型属黄土丘陵沟壑区第 V 副区,属于典型半干旱黄土区,降水量季节分配不均,春季降水较为稀少,主要集中在 7—9 月^[26]。流域年均气温为 6.8 °C,潜在蒸发量为 1 649.0 mm,流域土壤类型为黄绵土,土质均一^[27]。流域内主要的植被类型有:紫花苜蓿草地(*Medicago sativa*)、柠条锦鸡儿灌丛(*Caragana korshinskii*)、山杏林(*Prunus armeniaca*)、侧柏林(*Platycladus orientalis*)、油松林(*Pinus tabulaeformis*)。近年来,流域内开展大面积植被恢复措施,其中鱼鳞坑、反坡台、水平阶、水平沟等整地措施广泛应用于植被恢复建设中。

2 研究方法

2.1 样地设计

径流小区于 2014 年在同一坡面设置相邻样地,以自然坡位为对照完成鱼鳞坑、反坡台原位对照样地的布设(表 1)。采用微创式零干扰径流小区搭建技术分层监测土壤水分^[6]。本研究选取 2019 年生长季 4 月 19 日至 9 月 20 日内的监测数据进行模拟研究。

2.2 土壤水分及降雨数据采集与测定

土壤水分使用地下水监测器 HOBO U30(美国)自记水位计,在 100 cm 内,每隔 10 cm 为一个土层,埋设一个检测器探针,自动记录土壤水分数据^[28]。通过布设的翻斗式自记雨量计(DJ-100,北京),记录降雨时长,降雨量等^[29]。根据雨量计翻斗的时间间隔,将间隔时间不超过两小时的记为 1 次降雨事件。参考张建国等^[12]对降雨事件的划分经验,根据实际记录情况,将降雨事件之间的间隔超过 1 d 的降雨事件记为单独降雨事件,降雨事件之间的间隔在 1 d 以内的记为连续降雨事件。研究期内共筛选了 56 次降

雨事件,总降雨量为 365.6 mm。降雨集中在 5—8 月,降雨量为 316 mm,约占总降雨量的 77.85%。根据国家气象局规定的标准,将研究期内的降雨事件

分为<5,5~10,10~20,20~50 mm 共 4 个等级进行研究^[29],各量级内的降雨频率为 63.64%,16.36%,12.73%,7.27%。

表 1 样地基本特征

Table 1 General situation of experimental site

项目	样地 1		样地 2	
	鱼鳞坑	对照自然坡面	反坡台	对照自然坡面
面积/m ²	50	50	50	50
坡度/(°)	25	25	20	20
坡向	西	西	东偏北	东偏北
地表植被	中华隐子草(<i>Cleistogenes chinensis</i>)、赖草(<i>Leymus secalinus</i>)、阿尔泰狗娃草(<i>Heteropappus altaicus</i>)	赖草、阿尔泰狗娃草	中华隐子草、缘毛鹅观草(<i>Roegneria penduline</i>)、长芒草(<i>Stipa bungeana</i>)、阿尔泰狗娃草	缘毛鹅观草、长芒草、阿尔泰狗娃草
冠层郁闭度/%	45	45	30	30
整地措施描述	鱼鳞形的坑状结构沿斜坡交错排列,表土置于上坡位,心土置下坡位作埂。鱼鳞坑的土埂高 15~20 cm,埂顶宽 10 cm;沿等高线相邻鱼鳞坑间距为 0.8~1.5 m;相邻行间距 1~1.5 m;鱼鳞坑直径宽度高度分别为 80,80,和 30 cm	自然坡位	沿等高线外沿生土作埂,将 1.0~1.5 m 长的坡面径流集中到 1.5~2.0 m 的台面,坡面向内倾斜,坡度为 5°~8°,相邻平台垂直距离约 1 m	自然坡位

在小区内挖 1 m 深的土壤剖面,按 0—10,10—20,20—30,30—40,40—60,60—80,80—100 cm 用 100 cm³ 的环刀分层取样,每层重复 3 次,供测土壤容重和土壤水分特征曲线。同时在相同深度用自封袋取土,备用与测定土壤机械组成。采用环刀法测量土壤容重,用压力膜法和沙箱法测定土壤水分特征曲线,其中沙箱测定范围为 0—80 cm 水柱^[6,9]。土壤机械组成用激光粒度分析仪(Mastersizer 2000,英国)测量,测定方法参考文献[30],根据测量结果计算各土层砂粒,粉粒,黏粒的平均值来预测 van-Genuchten 参数。土壤水分通量是指大气降水通过地表进入土壤的水量,通过一维非饱和土壤水分运移数值模型模拟可获得各样地的土壤水分通量^[31]。

气象数据包括空气湿度,风速,最高气温和最低气温等,均来自 Meterlog 2200 AG 自动气象监测站(北京)。

2.3 模型设计

本研究基于 2019 年 4 月 19 日至 9 月 20 实测的土壤水分数据及气象数据,利用 HYDRUS 软件在 Main Processes 模块选取 Water Flow 建立一维非饱和土壤水分运移数值模型,在 Soile Profile-Graphical Editor 模块设置剖面信息,Time Information 模块设置时间信息,以天为单位,Water Flow-Boundary Conditions 模块设置边界条件,输入降雨数据。将各土层实测的土壤水分含量数据导入进行土壤水分特征曲线参数拟合,利用 HYDRUS-1D 软件中的 Neural

Network Prediction 模块,输入土壤容重以及土壤颗粒比重,预测各层土壤水力参数参考值,再通过 Inverse Solution 模块,用实测的各层土壤含水量对模拟的土壤水力参数进行矫正得到最终的土壤水力参数^[25]。模拟降雨条件下土壤水分变化,研究不同降雨条件下土壤水分通量的变化规律。

利用 HYDRUS-1D 对一维非饱和土壤水分运移数值模型进行模拟,模拟深度为 0—100 cm,将土壤剖面分为:10,20,30,40,60,80,100 cm 共 7 层^[25]。模拟时间以 d 为单位,选取 2019 年 4 月 19 日至 2019 年 9 月 20 日时间段,共 155 d。初始迭代时间为 0,最终迭代时间为 155 d^[32]。

土壤上边界由于与大气相通且会产生一定的径流量,因此设置为开放的大气边界;下边界由于地下水埋水较深,选定为自由排水边界^[25,32]。采用 Penman-Monteith^[33]通过输入研究区降雨、最低气温、最高气温、空气湿度,风速等气象数据计算潜在蒸发量。模拟过程中,由于油松为深根植物,黄土高原土层深厚,且本研究涉及土层深度仅为 0—100 cm,在祁宇麟^[34]探究鱼鳞坑、反坡台、水平阶 3 种不同整地措施下油松林的总根系密度的差异中表明,在浅层(0—100 cm)鱼鳞坑、反坡台的总根系密度无显著差异,因此不考虑根系吸水的影响。

模型所需的 van-Genuchten 参数,通过 HYDRUS-1D 软件中的 Neural Network Prediction 模块,输入每层土壤颗粒比重,模拟各层土壤水力参

数参考值,再根据 HYDRUS 软件中的 Inverse Solution 模块,用实测的各层土壤水含量对模拟的土壤水力参数进行矫正得到最终的土壤水力参数^[25]。

本研究对一维垂直方向土壤水分运移的模拟,用 Richards 方程来描述^[35]:

$$\frac{\alpha\theta}{at} = \frac{\alpha}{\alpha z} \left[K(h) \left(\frac{\alpha h}{\alpha z} + 1 \right) \right] - S(z, t) \quad (1)$$

式中: θ 为土壤体积含水率(cm^3/cm^3); t 为时间(h); $K(h)$ 为土壤导水率(cm/h); h 为土壤压力水头(cm); $S(z, t)$ 为根系吸水速率(cm/h); z 为土壤纵剖面深度(cm)。

土壤水分特征曲线采用 van-Genuchten 方程拟合,方程^[36]为:

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m} & (h < 0) \\ \theta_s & (h > 0) \end{cases} \quad (2)$$

$$K(h) = K_s S_e^l [1 - (1 - S_e^{l/m})^m]^2 \quad (3)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (4)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (n > 1) \quad (5)$$

式中: $\theta(h)$ 为土壤体积含水量(cm^3/cm^3); θ_r 和 θ_s 为残余含水量(cm^3/cm^3)和饱和含水量(cm^3/cm^3); α , n , m , l 为经验参数, l 一般取值为 0.5; K_s 为土壤饱和导水率(cm/h)。

2.4 模型评价标准

本研究将选取的 155 d 数据进行土壤水分模拟研究,同时用该时间段内的实测数据与模拟值进行对比来验证模型精度。评价指标包括相对误差(RE)、均方根误差(RMSE)、决定系数(R^2)。其中 R^2 的大小决定了实测值和模拟值之间的契合度,RE, RMSE 越接近于 0, R^2 越接近于 1, 说明模型模拟的精度越高^[16]。计算公式如下:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}} \quad (6)$$

$$\text{RE} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{\sum_{i=1}^n Y_i} - 1 \quad (7)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}) \times (Y_i - \bar{Y})]^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \times \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (8)$$

式中: X_i 第 i 个时间段的实测值; Y_i 第 i 个时间段的模拟值; n 为样本点数; \bar{X} 为 X_i 的平均值; \bar{Y} 为 Y_i 的平均值。

2.5 数据处理

本文选用 HYDRUS-1D 软件建立并求解模型。使用 Excel 和 SPSS 16.0 进行数据分析,用单因素方差分析和最小显著差异法(LSD)进行多重比较($p < 0.05$)分析不同整地措施下各样地土壤水分通量之间的差异显著性,数据采用平均值±标准差(Mean±SD)表示。采用 Origin 2016 绘图。

3 结果与分析

3.1 不同整地措施下土壤水分变化过程模拟

图 1—2 为鱼鳞坑、反坡台及相应对照自然坡面样地 0—100 cm 的土壤水分实测值与模拟值的对比。根据 RMSE, RE, 以及 R^2 对各土层不同整地措施下的实测值与模拟值进行评价。由图 1—2 可知 0—40 cm 的鱼鳞坑及对照自然坡面样地、反坡台及对照自然坡面样地的模拟效果数据指标 RMSE 的变化范围均在 0.02~0.07 m^3/m^3 内, RE 值的变化范围在 -0.34~0.77, R^2 的变化范围在 0.01~0.25 内。根据 RMSE 越趋近于 0, RE 少于 5%, R^2 接近于 1 模拟效果越好的标准,综合得出在 0—40 cm 的模拟效果显著高于 40—100 cm, 而 30—40 cm 处的精度最好。结果表明该模型对该研究区样地 0—40 cm 的模拟效果大于 40—100 cm, 更适用于表层土壤水分的模拟, 表层土壤水分对降雨的响应更加敏感。

3.2 不同整地措施下土壤水分通量对降雨的响应

由图 3—4 可以得出,单独降雨条件下,0—40 cm 内鱼鳞坑、反坡台的土壤水分通量比相应对照自然坡面样地平均提高了 9.07%, 4.20%。鱼鳞坑、反坡台与相应对照自然坡面样地在 0—40 cm 内的差值呈先增后减趋势。根据降雨量级的划分标准,降雨量 < 5 mm 时,由于 5—8 月降雨最为集中,受前期大降雨事件的影响,各样地土壤水分通量在降雨量为 2 mm 时达到最大值,分别比相应对照自然坡面样地提高了 1.01%, 1.17%; 降雨量为 5—10 mm 时,鱼鳞坑、反坡台的最大值为 1.94%, 1.42%, 分别比相应对照自然坡面样地提高了 1.20%, 0.70%, 土层深度为 30, 40 cm; 降雨量在 10—20 mm, 鱼鳞坑、反坡台的土壤水分通量最大值为 1.09%, 0.59%, 土层深度为 10, 20 cm, 此时相应对照自然坡面样地仅为 0.53%, 0.41%; 降雨量 > 20 mm 时,鱼鳞坑及对照自然坡面样地、反坡台及对照自然坡面样地土壤水分通量最大值依次为 1.27%, 0.61%, 0.63%, 0.46%, 鱼鳞坑反坡台的土层深度为 10, 20 cm, 相应对照自然坡面样地均在 40 cm。图 3—4 结合多重比较结果(表 2)可知,鱼

鳞坑、反坡台的土壤水分通量均显著大于相应对照自然坡面样地 ($p < 0.05$); 鱼鳞坑土壤水分通量显著大

于反坡台 ($p < 0.05$); 鱼鳞坑、反坡台各土层间的土壤水分通量差异均不显著。

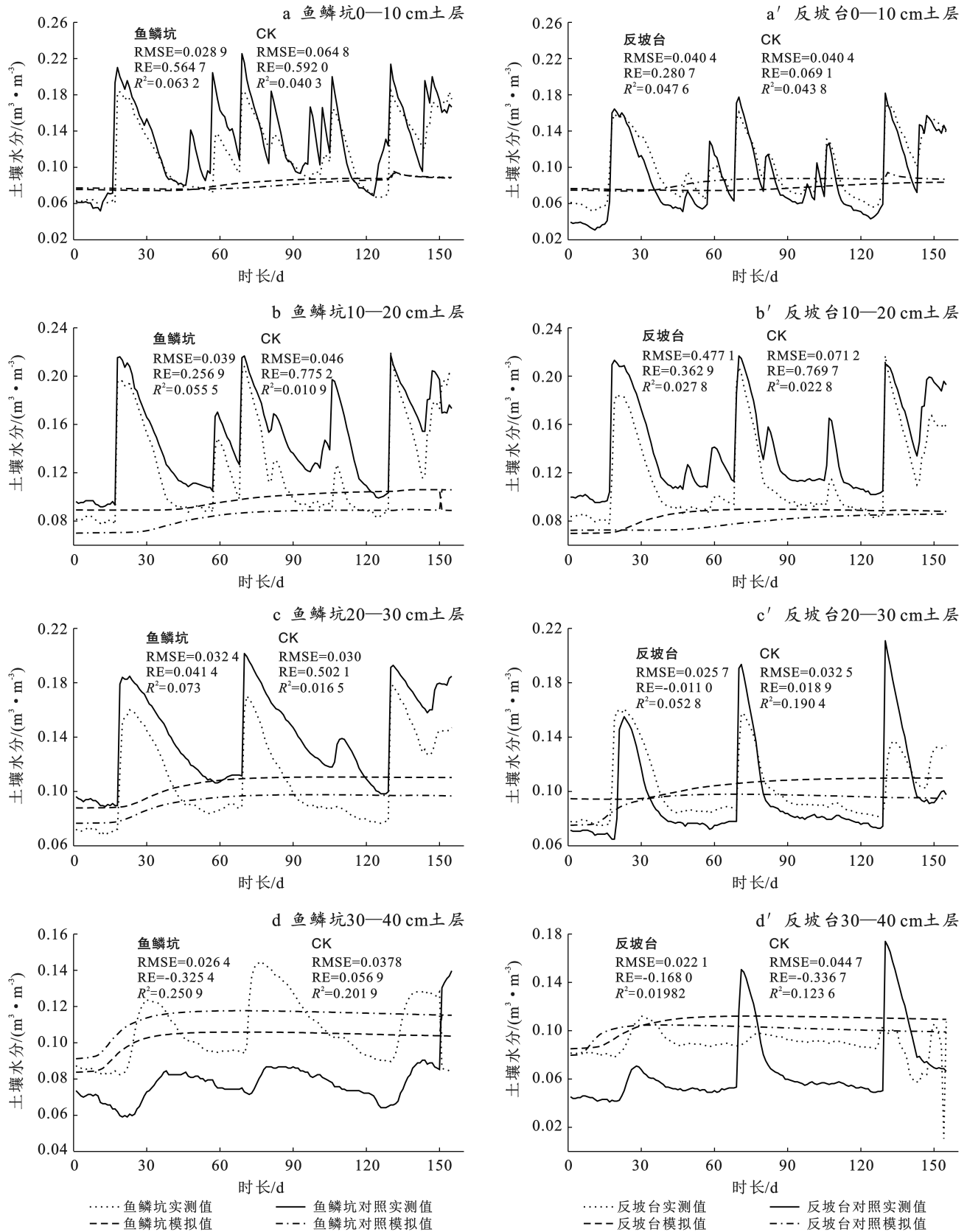


图1 不同整地措施下0—40 cm的土壤水分实测值与预测值对比

Fig.1 Comparison of measured and simulated soil moisture in 0—40 cm soil layer under different land preparations

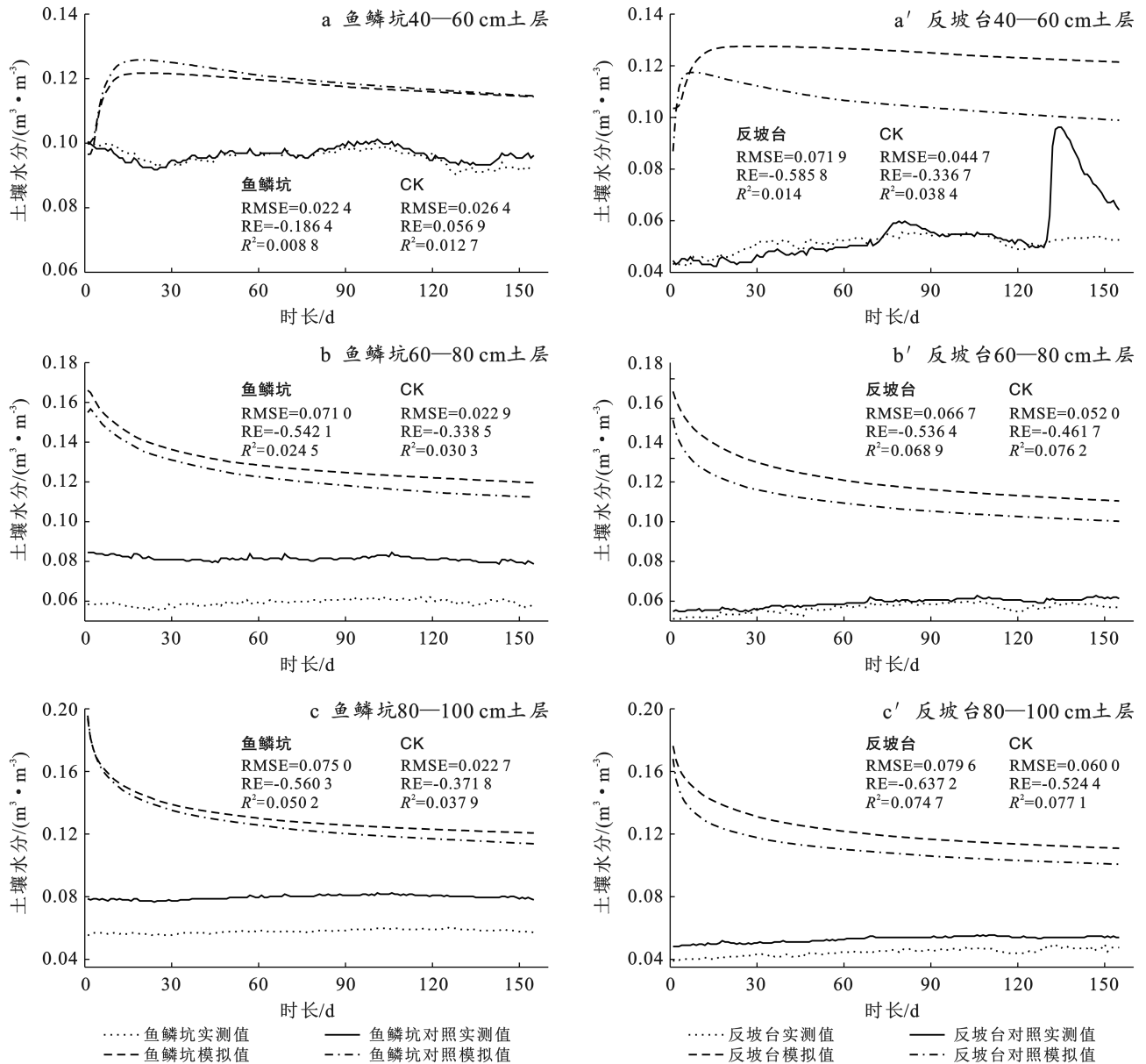


图 2 不同整地措施下 40—100 cm 的土壤水分实测值与预测值对比

Fig.2 Comparison of measured and simulated soil moisture in 40—100 cm soil layer under different land preparations

表 2 不同整地措施下土壤水分通量分布差异

Table 2 Difference of soil moisture flux distribution in soil layer under different land preparations

整地措施	各土层土壤水分通量			
	0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm	30—40 cm
鱼鳞坑	0.99 ± 0.48 ^{aA}	1.11 ± 0.50 ^{aA}	1.04 ± 0.65 ^{aA}	0.98 ± 0.62 ^{aA}
鱼鳞坑对照自然坡面	0.22 ± 0.39 ^{bB}	0.33 ± 0.20 ^{bB}	0.46 ± 0.22 ^{bB}	0.63 ± 0.41 ^{abA}
反坡台	0.34 ± 0.24 ^{bB}	0.45 ± 0.21 ^{bAB}	0.61 ± 0.38 ^{bAB}	0.67 ± 0.53 ^{abA}
反坡台对照自然坡面	0.09 ± 0.30 ^{bB}	0.21 ± 0.15 ^{cb}	0.24 ± 0.16 ^{cb}	0.40 ± 0.20 ^{ba}

注:不同小写字母代表不同整地措施之间差异显著($p < 0.05$);不同大写字母代表同一整地措施不同土层之间差异显著($p < 0.05$)。

本研究共筛选 12 次持续降雨事件进行分析,由图 5,表 3 的结果可以得出:0—40 cm 内鱼鳞坑、反坡台的土壤水分通量大于相应对照自然坡面样地,与相应对照自然坡面样地的差值均随降雨量的增大而增

大,差值均在 0—20 cm 内最显著($p < 0.05$)。降雨量 < 20 mm 时,鱼鳞坑、反坡台的最大值分别在 10, 20 cm, 降雨量 > 20 mm 时,鱼鳞坑、反坡台的土壤水分通量最大值所在的土层深度一致,最大值均在 40 cm。整体

上,鱼鳞坑的土壤水分通量显著大于反坡台($p < 0.05$),并且鱼鳞坑、反坡台各土层之间差异显著性在不同的降雨特征下表现不同。如在降雨量为 5~10 mm 时,鱼鳞坑、反坡台各土层之间的土壤水分通量差异显著性明显大于其他降雨条件。此时,鱼鳞坑、反坡台的土壤水分通量最大值(1.21%,0.61%)都在 10 cm,分别比相应对照自然坡面样地提高了 0.73%,0.46%。随后逐层下降至 40 cm 时,鱼鳞坑的土壤水分通量仍为 0.85%~0.87%,而反坡台的土壤水分通量仅为 0.53%左右,鱼鳞坑显著大于反坡台($p < 0.05$)。逐

层下降过程中,鱼鳞坑在 0—40 cm 内各土层之间均有显著差异,反坡台则以 20 cm 为分界线,在 0—20 cm 内显著大于 20—40 cm。综合来看,鱼鳞坑、反坡台这两种整地措施对 0—20 cm 内的土壤水分通量影响更大。在 0—40 cm 内,鱼鳞坑、反坡台的土壤水分通量比相应对照自然坡面样地平均提高了 10.73%,4.72%,鱼鳞坑显著大于反坡台。各量级范围内持续降雨条件下鱼鳞坑,反坡台的土壤水分通量最大值大于单独降雨条件下的最大值。降雨量越大影响深度越大,在 0—40 cm 内鱼鳞坑的效果优于反坡台。

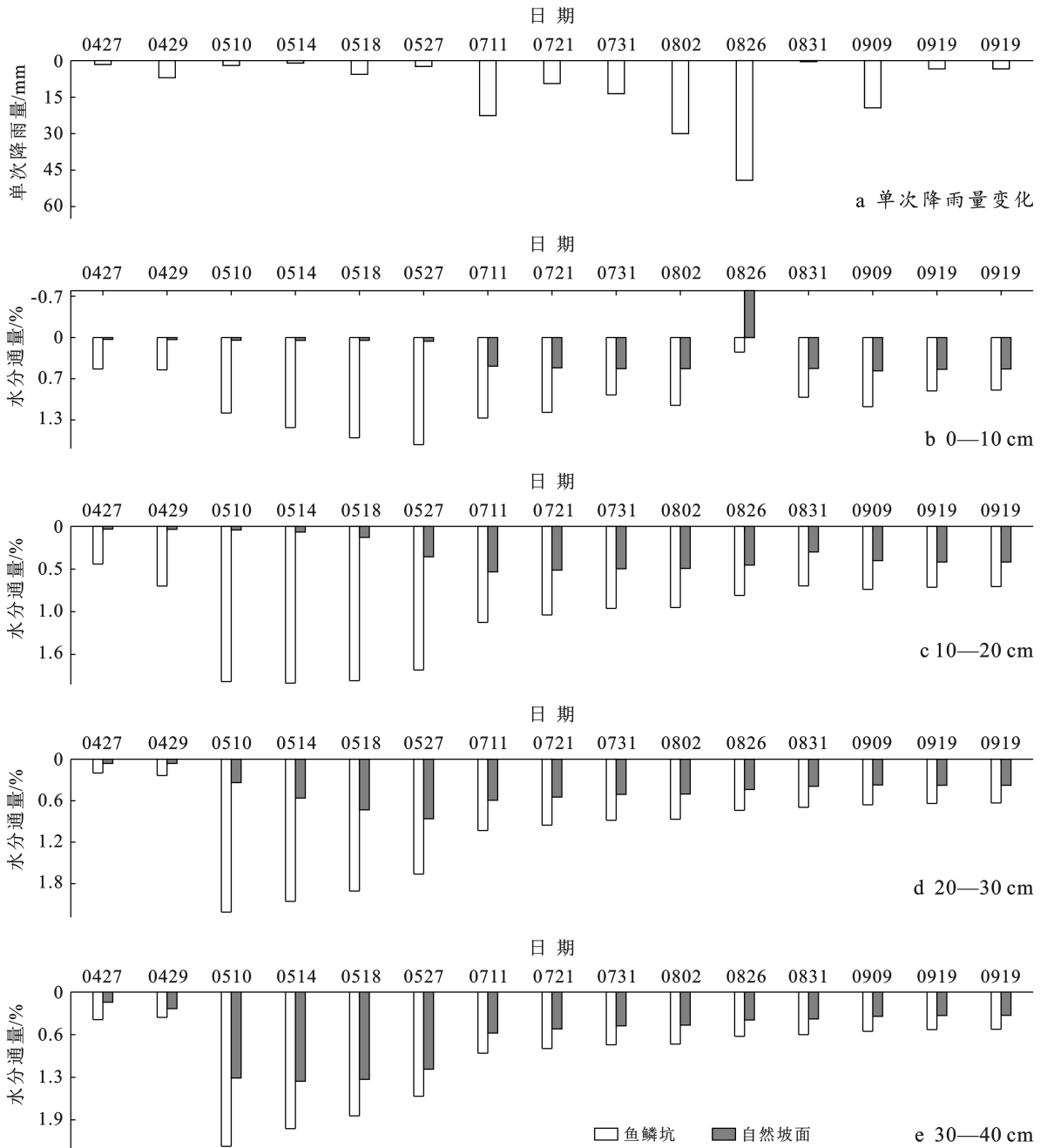


图 3 单独降雨条件下鱼鳞坑及其对照自然坡面样地 0—40 cm 层的土壤水分通量变化

Fig.3 Changes of soil water flux in 0—40 cm layer of fish-scale pit and control natural slope under condition of individual rainfall

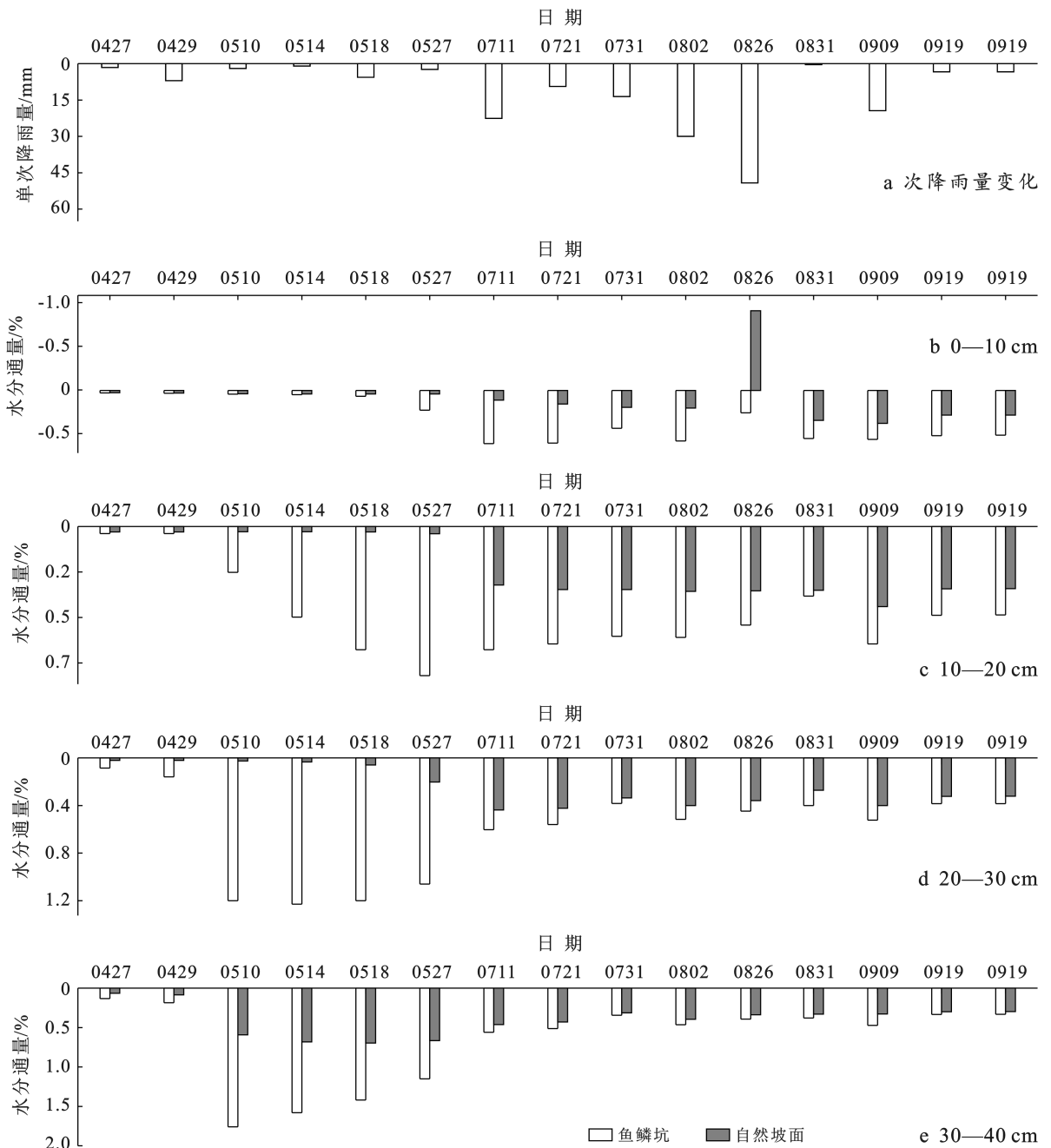


图 4 单次降雨条件下反坡台及其对照自然坡面 0—40 cm 层的土壤水分通量变化

Fig.4 Changes of soil water flux in 0—40 cm layer of reverse slope platform and control natural slope under condition of individual rainfall

4 讨论与结论

4.1 讨论

本研究通过 HYDRUS-1D 软件建立一维非饱和土壤水分运移数值模型,对不同整地措施下油松林的土壤水分变化进行模拟,发现模拟的土壤水分与实测数据的土壤水分整体变化趋势一致,但实测的土壤水分数据均高于模拟值。根据模型评价指标 RMSE, R^2 , MSE 标准以及参考张洛丹等^[37]在对黄土高原侧

柏、刺槐两种乔木林的土壤水分研究中,均方根的误差范围为 $0.02 \sim 0.03 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$,发现该模型在降雨条件下,对半干旱黄土区 0—40 cm 土壤水分的模拟精度高于 40—100 cm 的模拟精度。主要由于半干旱黄土区土层深厚,地下水埋深,常年降雨稀少^[38-39],在研究期内的总降雨量为 365.5 mm,降雨量 $< 20 \text{ mm}$ 的事件占 92.73%,降雨量在 20—50 mm 的事件仅占 7.27%,而杨磊等^[29]在次降雨对土壤水分补给效率与阈值的研究发现油松林的降雨有效补给阈值为

26.4 mm,且在 20 cm 时降雨的补给延滞时间为 81.8 h,只有大降雨(>50 mm)事件深层土壤水分才能得到补给。在不同降雨条件下坡面土壤水分的入渗研究中表明小雨(<10 mm)入渗 10 cm,中雨(<25 mm)入渗 40 cm,大雨(<50 mm)入渗 100 cm^[25]。本研究主要是降雨条件下短期内土壤水分动态模拟,未考虑

降雨滞后效应的影响,因此土壤水分的模拟值低于实测值,且实际的降雨量对 0—40 cm 土壤水分的扰动大于 40—100 cm。除此之外,在植被演替过程中,半干旱黄土区形成一些以旱生植被为优势的生态系统,如油松、侧柏、刺槐等^[23]。植被根系的一些形态学指标又是探索土壤环境和吸收水分养分能力的重要指标^[40]。

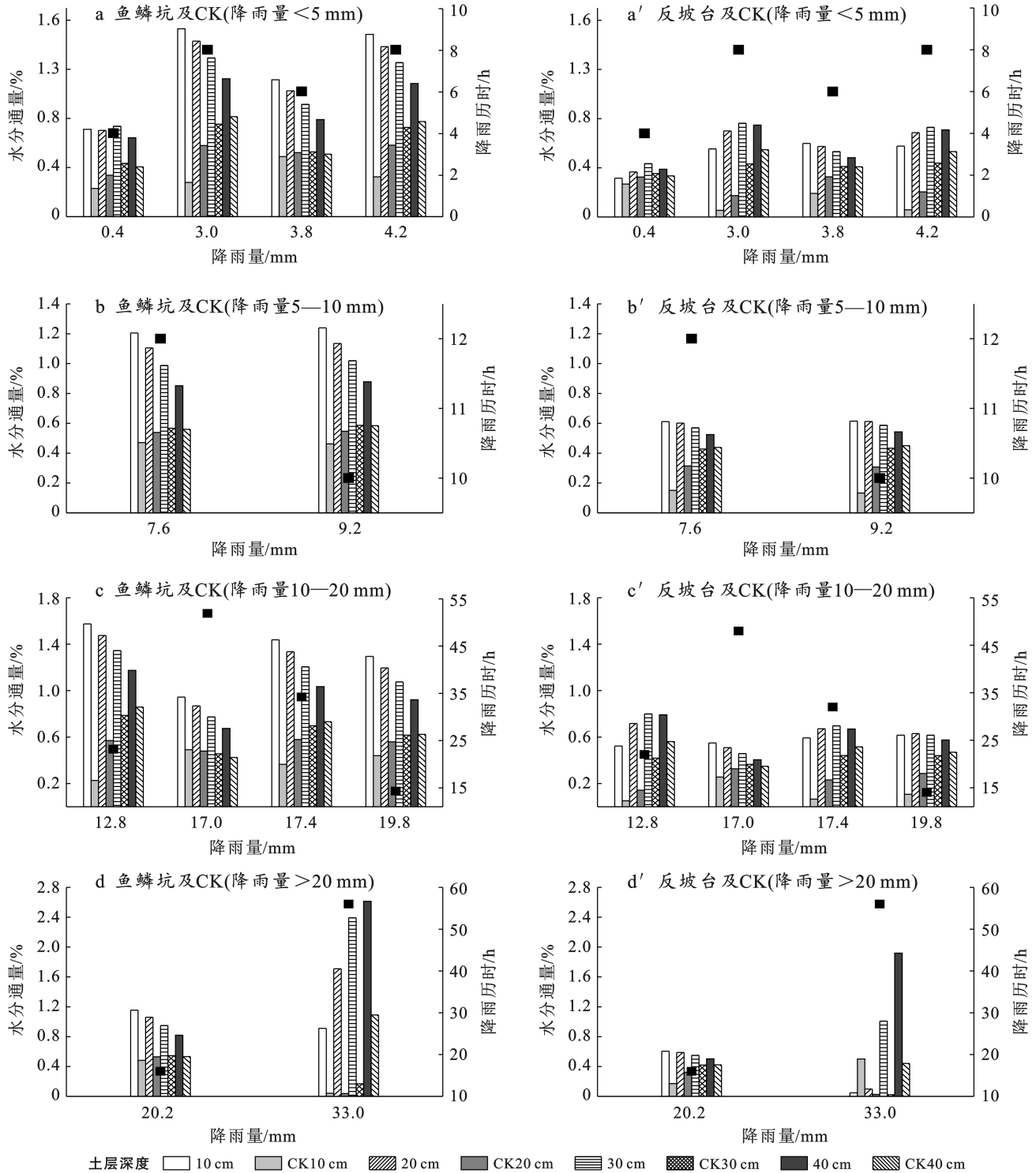


图 5 持续降雨条件下各样地 0—40 cm 层的土壤水分通量变化

Fig.5 Changes of soil moisture flux in 0—40 cm layer soil layer under continuous rainfall

表 3 不同整地措施下同一降雨量级的土壤水分通量分布差异

Table 3 Difference of soil moisture flux distribution in same rainfall level under different land preparations

降雨量/mm	整地措施	各土层土壤水分通量			
		0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm	30—40 cm
<5	鱼鳞坑	1.21±0.38 ^{aA}	0.88±0.38 ^{abA}	1.05±0.27 ^{aA}	0.91±0.23 ^{aA}
	鱼鳞坑对照自然坡面	0.33±0.11 ^{bcB}	1.14±0.34 ^{aAB}	0.61±0.15 ^{bA}	0.63±0.20 ^{bA}
	反坡台	0.51±0.13 ^{bA}	0.58±0.15 ^{bcA}	0.61±0.16 ^{bA}	0.58±0.17 ^{bA}
	反坡台对照自然坡面	0.14±0.11 ^{cB}	0.26±0.08 ^{cB}	0.41±0.04 ^{bA}	0.46±0.10 ^{bA}
5—10	鱼鳞坑	1.22±0.02 ^{aA}	1.12±0.02 ^{aB}	1.00±0.02 ^{aC}	0.87±0.02 ^{aD}
	鱼鳞坑对照自然坡面	0.47±0.01 ^{cB}	0.54±0.01 ^{cB}	0.58±0.01 ^{bA}	0.57±0.02 ^{bAB}
	反坡台	0.61±0.01 ^{bA}	0.61±0.01 ^{bA}	0.58±0.01 ^{bB}	0.53±0.01 ^{bC}
	反坡台对照自然坡面	0.14±0.01 ^{dC}	0.31±0.01 ^{dB}	0.43±0.00 ^{cA}	0.44±0.01 ^{cA}
10—20	鱼鳞坑	1.31±0.27 ^{aA}	1.22±0.26 ^{aA}	1.10±0.24 ^{aA}	0.95±0.21 ^{aA}
	鱼鳞坑对照自然坡面	0.38±0.12 ^{bB}	0.55±0.05 ^{bAB}	0.64±0.14 ^{bA}	0.66±0.18 ^{bA}
	反坡台	0.57±0.04 ^{bA}	0.63±0.09 ^{bA}	0.64±0.14 ^{bA}	0.61±0.16 ^{bA}
	反坡台对照自然坡面	0.12±0.09 ^{cC}	0.25±0.08 ^{cB}	0.42±0.04 ^{bA}	0.47±0.09 ^{bA}
>20	鱼鳞坑	1.03±0.17 ^{aA}	1.39±0.46 ^{aA}	1.67±1.02 ^{aA}	1.72±1.27 ^{aA}
	鱼鳞坑对照自然坡面	0.26±0.31 ^{aA}	0.28±0.35 ^{bA}	0.36±0.27 ^{aA}	0.81±0.39 ^{aA}
	反坡台	0.33±0.40 ^{aA}	0.34±0.35 ^{bA}	0.78±0.32 ^{aA}	1.21±1.00 ^{aA}
	反坡台对照自然坡面	0.34±0.23 ^{aA}	0.17±0.21 ^{bA}	0.22±0.28 ^{aA}	0.43±0.01 ^{aA}

注:不同小写字母代表相同降雨量级下不同整地措施之间差异显著($p<0.05$);不同大写字母代表同一整地措施不同土层之间差异显著($p<0.05$)。

曾有研究也表明植被根系吸水和土壤水分动态有着密切的关系^[41],可以间接或直接改善土壤稳定性^[42]。陈雨等^[43]基于 HYDRUS-1D 探究植物根系对人工基质水分特征曲线参数的影响研究中表明植物根系对水分特征曲线中的饱和含水率及残余含水率有不同的影响。油松属于深根植被,在整地措施的长期作用下不同整地措施下植物根系的分布特征不同,不同土层深度的根系分布不同^[35],因此导致不同深度的根系吸水对土壤水分的影响不同。但模拟过程中未将根系吸水的问题考虑其中,且模拟过程中采用的是均匀的压力水头,也可能导致模拟结果出现误差。综上所述,虽然模拟精度在 40—100 cm 差异较大,但总体模拟值与实测值的变化趋势一致,能够反映土壤水分随时间的变化特征,与王宇祥等^[28]基于 HYDRUS-1D 对科尔沁半干旱区土壤水分的模拟结果以及张洛丹等^[37]、Wang Yunqiang 等^[44]使用 HYDRUS-1D 软件对黄土高原半干旱区的土壤水分模拟的研究结果一致。本研究进一步得出该模型对降雨条件下半干旱黄土区油松林土壤水分的模拟深度在 0—40 cm 更为准确。

本研究将降雨事件分为单独降雨事件和持续降雨事件,分析不同降雨条件下 0—40 cm 内鱼鳞坑、反坡台整地措施对土壤水分通量的影响。结果表明在 0—40 cm 内,单独降雨条件下鱼鳞坑、反坡台的土壤水分通量比相应对照自然坡面样地平均提高了

9.07%,4.04%。持续降雨条件下鱼鳞坑、反坡台的土壤水分通量比相应对照自然坡面样地平均提高了 10.73%,4.72%。在 0—40 cm 内鱼鳞坑土壤水通量均显著大于反坡台($p<0.05$),且持续降雨条件下土壤水分通量的提高更加明显,但鱼鳞坑土壤水分通量最大值的土层深度比反坡台的土层深度浅。如单独降雨条件下,鱼鳞坑的影响深度在 0—30 cm,其对照自然坡面样地的深度均在 30—40 cm,反坡台及对照自然坡面样地的影响深度在 30—40 cm,鱼鳞坑的平均土壤水分通量最大值为 0.78%,深度为 20 cm,反坡台的最大值为 0.37%,深度为 30 cm;但是持续降雨条件下,鱼鳞坑的平均土壤水分通量最大值为 3.34%,深度为 20 cm,反坡台的最大值为 1.28%,深度为 10 cm。说明无论单独降雨条件还是持续降雨条件鱼鳞坑、反坡台对表层土壤水分均有改善,但由于鱼鳞坑为坑状结构,在降雨较多的情况下可以更好的收集雨水,具有较好的蓄水性能。反坡台是通过平整大面积土地,减少土壤蒸发面积,从而提高土壤水含量,改善土壤持水能力。因此,在降雨较多的时候鱼鳞坑的蓄水效果较好^[45-46]。曾有研究也表明鱼鳞坑在 0—20 cm 的蓄水效率较高,反坡台在 0—40 cm 的蓄水效率较低,降雨较多的情况下,鱼鳞坑有较好的蓄水效果^[41],这一结论与本文结果一致。除此之外,冯天骄等^[9]在对 van-Genuchten 程拟合的土壤水分曲线中整地后不同水吸力下土壤水分含量的研究中,同样表

明降雨条件下鱼鳞坑对土壤水分含量的提高相较反坡台更加明显。因此,在 0—40 cm 内试验样地的土壤水分通量高于对照自然坡面样地。各降雨量级下,持续降雨对土壤水分通量的影响均大于单独降雨,降雨较多时,鱼鳞坑的土壤水分通量比反坡台大,但影响深度比反坡台较浅。

4.2 结论

通过 HYDRUS-1D 对不同整地措施下油松林土壤水分的模拟,初步得出:土壤水分模拟值与实测值的变化趋势基本一致,该模型对 0—40 cm 土壤水分的模拟精度更高。相同降雨条件下,鱼鳞坑、反坡台的土壤水分通量均显著大于相应对照自然坡面样地 ($p < 0.05$),鱼鳞坑的土壤水分通量显著大于反坡台 ($p < 0.05$)。单独降雨条件下,0—40 cm 内鱼鳞坑、反坡台与相应对照自然坡面样地的平均差值均呈先增后减的趋势,但拐点(0.79%,0.37%)所在土层深度不同(20,30 cm)。持续降雨条件下,降雨量 < 20 mm 时,鱼鳞坑、反坡台对 0—20 cm 的土壤水分通量影响较大,最大值分别在 10,20 cm(1.58%,0.72%),降雨量 > 20 mm 时,鱼鳞坑、反坡台对 20—40 cm 的土壤水分通量影响逐渐增强 40 cm 处最大(2.61%,1.92%)。总体而言,降雨条件下,鱼鳞坑对 0—40 cm 内土壤水分的影响大于反坡台,蓄水效果更好。

[参 考 文 献]

- [1] 卫伟,余韵,贾福岩,等.微地形改造的生态环境效应研究进展[J].生态学报,2013,33(20):6462-6469.
- [2] Yang Lei, Wei Wei, Chen Liding, et al. Response of temporal variation of soil moisture to vegetation restoration in semi-arid Loess Plateau, China [J]. Catena, 2014,115:123-133.
- [3] Zhang Yafeng, Wang Xinping, Hu Rui, et al. Rainfall partitioning into throughfall, stemflow and interception loss by two xerophytic shrubs within a rain-fed re-vegetated desert ecosystem, Northwestern China [J]. Journal of Hydrology, 2015,527:1084-1095.
- [4] 刘恩斌,董水丽.黄土高原主要土壤持水性能及抗旱性的评价[J].水土保持通报,1997,17(7):21-27.
- [5] 宁婷,郭忠升,李耀林.黄土丘陵区撂荒坡地土壤水分特征曲线及水分常数的垂直变异[J].水土保持学报,2014,28(3):166-170.
- [6] 于洋,卫伟,陈利顶,等.黄土丘陵区小流域典型造林整地工程土壤水分特征曲线模拟[J].生态学报,2018,38(18):6511-6520.
- [7] 于洋,卫伟,陈利顶,等.黄土丘陵区坡面整地和植被耦合下的土壤水分特征[J].生态学报,2016,36(11):3441-3449.
- [8] 杨磊,卫伟,莫保儒,等.半干旱黄土丘陵区不同人工植被恢复土壤水分的相对亏缺[J].生态学报,2011,31(11):3060-3068.
- [9] 冯天骄,卫伟,陈利顶,等.黄土丘陵区小流域不同整地措施长期影响下的土壤水力学特性[J].环境科学,2017,38(9):3860-3870.
- [10] 王云强,邵明安,刘志鹏.黄土高原区域尺度土壤水分空间变异性[J].水科学进展,2012,23(3):310-316.
- [11] 姜娜,邵明安.黄土高原小流域不同坡地利用方式的水土流失特征[J].农业工程学报,2011,27(6):36-41.
- [12] 张建国,闫美杰,杜盛.连续降雨条件下黄土丘陵区两典型林分降雨分配特征研究[J].水土保持研究,2016,23(5):158-163.
- [13] 杨玉峥,林青,王松禄,等.大沽河中游地区土壤水与浅层地下水转化关系研究[J].土壤学报,2015,52(3):547-557.
- [14] 陈宝根,王仕琴,宋献方.一维土壤水分运动模拟在土壤水分特征研究中的应用:以华北平原衡水实验站为例[J].水文,2011,31(3):64-70.
- [15] 邵东国,杨霞,徐保利,等.南方丘陵区多层土壤结构水平和垂向渗流特征试验与模拟研究[J].水利学报,2017,48(7):799-807.
- [16] 马欢,杨大文,雷慧闽,等.Hydrus-1D 模型在田间水循环规律分析中的应用及改进[J].农业工程学报,2011,27(3):6-12.
- [17] 李冰冰,王云强,李志.HYDRUS-1D 模型模拟渭北旱塬深剖面土壤水分的适用性[J].应用生态学报,2019,30(2):398-404.
- [18] 卞建民,李育松,胡昱欣,等.基于 Hydrus-1D 模型的大安灌区旱田灌溉入渗补给研究[J].干旱地区农业研究,2014,32(2):191-195.
- [19] Lü Haishen, Zhu Yonghua, Skaggs T H, et al. Comparison of measured and simulated water storage in dryland terraces of the Loess Plateau, China [J]. Agricultural Water Management, 2009,96(2):299-306.
- [20] 霍思远,靳孟贵.不同降水及灌溉条件下的地下水入渗补给规律[J].水文地质工程地质,2015,42(5):6-13.
- [21] Yi Caiqiong, Fan Jun. Application of HYDRUS-1D model to provide antecedent soil water contents for analysis of runoff and soil erosion from a slope on the Loess Plateau [J]. Catena, 2016,139:1-8.
- [22] Yang L, Wei W, Chen L, et al. Spatial variations of shallow and deep soil moisture in the semi-arid Loess Plateau, China [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2012,16(9):3199-3217.
- [23] 杨文治,马玉玺,韩仕峰,等.黄土高原地区造林土壤水分生态分区研究[J].水土保持学报,1994,8(1):1-9.
- [24] 王力,邵明安,侯庆春.黄土高原土壤干层初步研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2001,29(4):34-38.

- [25] 刘小璐,鲁克新,李鹏,等.不同降雨条件下坡面土壤水分入渗过程研究与模拟[J].干旱区资源与环境,2018,32(11):114-118.
- [26] 莫保儒,王子婷,蔡国军,等.半干旱黄土区成熟柠条林地剖面土壤水分环境及影响因子研究[J].干旱区地理,2014,37(6):1207-1215.
- [27] 殷地迟,王立,蔡国军,等.半干旱黄土丘陵区不同植被类型的土壤水分特征及其稳定性[J].水土保持通报,2020,40(1):65-71.
- [28] 王宇祥,刘廷玺,段利民,等.基于 Hydrus-1D 模型的科尔沁沙地沙丘—草甸相间区土壤水分动态模拟[J].中国沙漠,2020,40(2):195-205.
- [29] 杨磊,张涵丹,陈利顶.黄土宽梁缓坡丘陵区次降雨对土壤水分补给效率与阈值研究[J].中国科学(地球科学),2018,48(4):457-466.
- [30] 吕贻忠,李保国.土壤学[M].北京:中国农业出版社,2006.
- [31] 胡安焱.土壤水和地下水关系研究[D].新疆 乌鲁木齐:新疆农业大学,2000.
- [32] 郭强.基于 HYDRUS-1D 模型和稳定同位素的鄱阳湖湿地水分传输过程研究[D].山西 太原:太原理工大学,2020.
- [33] 徐俊增,彭世彰,张行南,等.两种 Penman-Monteith 公式计算草坪草参考腾发量的适用性[J].农业工程学报,2009,25(12):32-37.
- [34] 祁宇麟.黄土高原整地措施对植物群落根系分布特征及其生态效应的影响[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2020.
- [35] Ren Dongyang, Xu Xu, Hao Yuanyuan, et al. Modeling and assessing field irrigation water use in a canal system of Hetao, Upper Yellow River basin: application to maize, sunflower and watermelon [J]. Journal of Hydrology, 2016,532:122-139.
- [36] Van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980,44(5):892-898.
- [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] Chen Liding, Wang Jiping, Wei Wei, et al. Effects of landscape restoration on soil water storage and water use in the Loess Plateau Region, China [J]. Forest Ecology and Management, 2010,259(7):1291-1298.
- [39] Zhang Yongwang, Deng Lei, Yan Weiming, et al. Interaction of soil water storage dynamics and long-term natural vegetation succession on the Loess Plateau, China [J]. Catena, 2016,137:52-60.
- [40] 苏樑,宋同清,杜虎,等.喀斯特峰丛洼地不同植被恢复阶段细根生物量、形态特征及其影响因素[J].应用生态学报,2018,29(3):783-789.
- [41] Chen Die, Wei Wei, Chen Liding. How can terracing impact on soil moisture variation in China?: a meta-analysis [J]. Agricultural Water Management, 2020,227:105849.
- [42] Hao Haoxin, Di Hanyue, Jiao Xiong, et al. Fine roots benefit soil physical properties key to mitigate soil detachment capacity following the restoration of eroded land [J]. Plant and Soil, 2020,446(1/2):487-501.
- [43] 陈雨,陈璇,刘瑞芬.基于 HYDRUS-1D 模型的植物根系对人工基质水分特征曲线参数的影响[J].环境科学学报,2022,42(8):325-336.
- [44] Wang Yunqiang, Hu Wei, Zhu Yuanjun, et al. Vertical distribution and temporal stability of soil water in 21 m profiles under different land uses on the Loess Plateau in China [J]. Journal of Hydrology, 2015,527:543-554.
- [45] 朱聿申,陈宇轩,查同刚,等.大鱼鳞坑双苗造林技术在黄土沟壑区的应用效果[J].干旱区研究,2016,33(3):560-568.
- [46] 符素华,刘宝元,路炳军,等.官厅水库上游水土保持措施的减水减沙效益[J].中国水土保持科学,2009,7(2):18-23.