

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.01.030

保护性耕作下土壤水分变化特征模拟研究

王 钧¹ 李 广² 聂志刚¹ 刘 强¹ 闫丽娟³

(1. 甘肃农业大学信息科学技术学院, 兰州 730070; 2. 甘肃农业大学林学院, 兰州 730070;

3. 甘肃农业大学农学院, 兰州 730070)

摘要: 为了对陇中黄土高原沟壑区不同保护性耕作措施下的土壤含水率进行差异性分析,利用长期定位试验,设置春小麦/豌豆、豌豆/春小麦轮作序列下传统耕作、免耕、传统耕作秸秆覆盖和免耕覆盖4种耕作措施,以当地月平均气温、月降水量、月平均辐射量、月平均蒸发量、月作物耗水量作为输入,以0~200 cm土层土壤含水率作为输出,建立基于长短期记忆(Long short-term memory, LSTM)神经网络的土壤含水率预测模型,并对模型的有效性进行评估,然后利用该模型模拟4种耕作措施下0~200 cm土层土壤含水率的动态变化过程。结果表明,基于LSTM神经网络建立的土壤含水率模型对陇中黄土高原沟壑区保护性耕作下土壤含水率预测具有较好的适用性,其模拟值与实测值的平均均方根误差为2.29%、平均相对误差为6.79%、平均决定系数为0.82。豌豆/春小麦轮作序列中4种耕作措施下的土壤含水率比春小麦/豌豆轮作序列的土壤含水率增加1.49%、1.61%、1.69%和1.76%,4种耕作措施下0~200 cm土层的土壤含水率由大到小依次为:免耕覆盖、免耕、传统耕作秸秆覆盖、传统耕作,免耕覆盖下的土壤含水率分别比免耕、传统耕作秸秆覆盖和传统耕作增加1.27%、1.75%和2.81%。免耕覆盖对0~30 cm土层土壤含水率的影响最为显著,其土壤含水率分别比免耕、传统耕作秸秆覆盖和传统耕作平均增加1.60%、2.63%和4.18%。4种耕作措施下的土壤含水率随季节发生变化,免耕覆盖下的土壤含水率整体高于其他3种耕作措施,且在作物生长前期的蓄水保墒效果更加显著。研究区豌豆/春小麦轮作序列中4种耕作措施的土壤含水率相对较高,而不同耕作措施下免耕覆盖更有利于提高该地区农田土壤水分,为陇中黄土高原沟壑区最适宜的耕作方式。

关键词: 保护性耕作; 轮作; 土壤含水率; LSTM神经网络

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2021)01-0263-12

OSID:



Simulation on Variation Characteristics of Soil Water Content under Conservation Tillage

WANG Jun¹ LI Guang² NIE Zhigang¹ LIU Qiang¹ YAN Lijuan³

(1. College of Information Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

2. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

3. College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Long-term positioning experiment was used to set up four sorts of tillage measures (traditional tillage, no-tillage, traditional tillage straw mulching and no-tillage with straw cover) for the rotation sequence of spring wheat/pea and pea/spring wheat. The monthly precipitation, monthly average radiation, monthly average evaporation, and monthly crop water consumption were used as input factors, and monthly average soil water content was used as an output to establish a prediction model of soil water content based on long short-term memory (LSTM) neural network, and the validity of the model was evaluated to analyze the differences of soil water content effect of different conservation tillage measures in the Loess Plateau gully region of central Gansu, then the model was applied to simulate the dynamics of the soil water content under four tillage measures in the 0~200 cm soil layer. The results demonstrated

收稿日期: 2020-04-16 修回日期: 2020-06-05

基金项目: 国家自然科学基金地区科学基金项目(31660348)、甘肃省重点研发计划项目(18YF1NA070)、甘肃省自然科学基金项目(20JR10RA509)、甘肃省财政专项(GSCZZ-20160909)、甘肃省高等学校创新基金项目(2020B-121)和甘肃农业大学信息科学技术学院发展基金项目(GAU-XKFZJJ-2012-12)

作者简介: 王钧(1982—),男,副教授,博士生,主要从事农业信息化研究,E-mail: julianwong82@163.com

通信作者: 李广(1971—),男,教授,主要从事农业信息化研究,E-mail: lig@gsau.edu.cn

that the soil water model based on LSTM neural network had good applicability for predicting soil water content under conservation tillage in the Loess Plateau gully region of central Gansu, the average root mean square error, mean relatively error and determination coefficient of the model were 2.29%, 6.79% and 0.82, respectively. In pea/spring wheat rotation sequence, the soil water content of four treatments was increased by 1.49%, 1.61%, 1.69% and 1.76%, respectively, compared with spring wheat/pea, the descending order of soil water content of the four tillage measures was as follows: no-tillage with straw cover, no-tillage, traditional tillage straw mulching, and traditional tillage in 0~200 cm soil layer, the average soil water content of no-tillage with straw cover was increased by 1.27%, 1.75% and 2.81%, respectively, compared with no-tillage, traditional tillage straw mulching, and traditional tillage. The no-tillage with straw cover had the most significant effect on soil water content in 0~30 cm soil layer, the average soil water content of no-tillage with straw cover was increased by 1.60%, 2.63% and 4.18%, respectively, compared with no-tillage, traditional tillage straw mulching, and traditional tillage. Soil water content of four tillage measures was changed with seasons, but the soil water content effect of no-tillage with straw cover was better than that of the other three tillage measures, the effects of water storage and soil moisture conservation were more significant during pre-crop growth. The LSTM neural network model achieved good simulation results on the soil water content in the Loess Plateau gully region of central Gansu, the soil water content of four tillage measures in the pea/spring wheat rotation sequence was relatively higher, no-tillage with straw cover was beneficial to improve the soil water content of farmland in the study area the under four tillage measures, and the most suitable one was conservation tillage measure in the Loess Plateau gully region of central Gansu.

Key words: conservation tillage; rotation; soil water content; LSTM neural network

0 引言

陇中黄土高原沟壑区水资源条件先天不足,土壤水资源十分匮乏,而耕作措施对土壤水分含量的影响较大^[1-2]。保护性耕作作为节水增效的重要措施,不但可以提高土壤蓄水保墒能力,而且能够提高粮食作物产量,是缓解我国水资源不足和提高水分利用效率的重要途径之一^[3-4]。因此,深入研究分析保护性耕作措施下土壤含水率状况及其变化规律,对陇中黄土高原沟壑区发展节水农业、土地资源合理利用以及植被恢复具有非常重要的指导意义^[5-7]。受大田试验周期长、难度大的影响,目前对陇中黄土高原沟壑区土壤水分变化规律的长期定位观测研究不足,对不同轮作体系、不同降水年型和不同种植作物条件下的保护性耕作措施土壤水分变化规律缺乏深入系统的研究,利用模型模拟提供了一种新的研究方法^[8-10]。目前,常见的土壤含水率预测模型有多元回归模型、时间序列模型、土壤水动力学模型以及作物生长模型等。QIU等^[11]根据黄土高原沟壑区土地和地形指数,利用多元线性回归方程建立了土壤水分预测模型。路璐等^[12]利用时间序列 ARIMA (Autoregressive integrated moving average model) 模型实现了冬小麦土壤水分的预测。CHAI等^[13]利用土壤水分特征曲线模型实现了土壤水分的预测。MKHABELA等^[14]利用 Aqua Crop 模型对加拿大西部地区麦田土壤含水率进行了模拟。

不同预测模型具有各自特点,对不同地区、不同土层的土壤水分预测精度也存在着较大的差异,模型参数和边界条件的设置是影响其适用性和预测精度的主要限制性因素。

随着深度学习技术的不断成熟,国内外研究者将基于深度学习的神经网络模型应用于土壤含水率预测。罗党等^[15]利用灰色神经网络模型建立了多变量土壤含水率预测模型,ZOU等^[16]验证了反向传播神经网络模型预测土壤含水率具有较高的精度。然而,以上神经网络模型存在长期记忆能力不足的问题,难以实现土壤含水率的长期预测^[17-18]。LSTM神经网络模型通过引入“门”使神经网络模型真正实现了长时间序列相关数据的有效利用,从而进一步提高了神经网络模型的预测精度^[19-20]。

本研究基于 LSTM神经网络模型对陇中黄土高原沟壑区不同保护性耕作措施下的土壤含水率变化特征进行研究,旨在探明不同轮作体系、不同降水年型以及不同种植作物条件下土壤水分的变化规律,为陇中黄土高原沟壑区节水农业发展提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

试验地位于甘肃省定西市李家堡镇,属于典型黄土高原丘陵沟壑区,平均海拔 2 000 m,多年平均降雨量为 393.5 mm,年均蒸发量为 1 540 mm,年平均气温为 6.5℃,为典型的半干旱雨养农业区。该

地区土壤类型以灰钙土为主,土壤母质为黄土,质地为粉砂壤和粉壤,土壤全氮、全磷、有机质含量(质

量比)分别为 0.76、1.77、12.01 g/kg,土壤容重如表 1 所示。

表 1 试验田 0~200 cm 土层土壤容重

Tab. 1 Soil bulk density in 0~200 cm soil layer of experimental field

土层深度/cm	0~5	5~10	10~30	30~50	50~80	80~110	110~140	140~170	170~200
容重/(g·cm ⁻³)	1.29	1.23	1.32	1.20	1.14	1.14	1.13	1.12	1.11

1.2 试验处理

试验采用春小麦和豌豆双序列轮作(Spring wheat/pea rotation sequence, W/P; Pea/spring wheat rotation sequence, P/W),采用 4 种耕作措施:传统耕作(Traditional tillage, T)、免耕(No-tillage, NT)、传统耕作秸秆覆盖(Traditional tillage straw mulching, TS)和免耕覆盖(No-tillage with straw cover, NTS),每个处理重复 4 次。处理 1:传统耕作(T),在 8 月前茬作物收获后马上进行第 1 次耕深为 25 cm 的耕作,在 8 月底和 9 月分别进行耕深为 10 cm 和 5 cm 的第 2 次和第 3 次耕作,完成第 3 次耕作后对试验地耨一次,10 月冻结前再耨一次。处理 2:免耕覆盖(NTS),整个试验期对试验地进行免耕处理,将前茬作物收获的秸秆脱粒、打碾后切碎(5 cm 左右)覆盖于试验地原小区。处理 3:传统耕作秸秆覆盖(TS),同处理 1,但在第 1 次耕作后将前茬秸秆翻入土中。处理 4:免耕不覆盖(NT),同处理 2,但不覆盖,整个试验阶段免耕。

1.3 供试材料

试验采用随机区组排列,试验地小区面积为 80 m²(20 m × 4 m)。供试作物为春小麦和豌豆,作物品种分别为定西 35 号和绿豌豆,两种作物的播种量分别为 187.5、180.0 kg/hm²。肥料作为基肥在播种时施入,其中春小麦 4 种耕作方式各施氮肥 105.0 kg/hm²,P₂O₅ 105.0 kg/hm²;豌豆 4 种耕作方式各施氮肥 20.0 kg/hm²,P₂O₅ 105.0 kg/hm²。

1.4 测定指标与方法

1.4.1 气象观测

气象站设置在距离试验地西北 200 m,使用澳大利亚 AWSTJ-1 型气象自动观测仪观测降雨、辐射、蒸发量和气温(包括平均气温、最高温和最低温)。根据模型模拟需要,将逐日气象数据转换为月气象数据,其中月降水量为当月降水量之和,其他气象数据为当月气象数据之和与时间的比值。

1.4.2 土壤含水率测定及方法

试验期间每年 1—12 月每隔 15 d 使用干燥法测定 0~5 cm、5~10 cm 土层的土壤含水率,利用土钻在小区内随机取样 3 次,并将同一小区同一土层的 3 次取样均匀混合后装入铝盒称量,通过干燥法

将土样放置于 110℃ 的干燥箱内干燥至质量恒定并计算土壤质量含水率,计算公式为

$$\theta = (\omega_1 - \omega_2) / \omega_2 \times 100\% \quad (1)$$

式中 θ ——土壤质量含水率, %

ω_1 ——土壤湿质量, g

ω_2 ——土壤干质量, g

将质量含水率转换为体积含水率,计算式为

$$W = \gamma_1 / \gamma_2 \theta \quad (2)$$

式中 W ——土壤体积含水率, %

γ_1 ——土壤容重, g/cm³

γ_2 ——水容重, g/cm³

10~30 cm、30~50 cm、50~80 cm、80~110 cm、110~140 cm、140~170 cm、170~200 cm 共 7 个土层的土壤体积含水率利用中子仪沿小区对角线方向均匀测量 3 次,并取平均值,将每月两次土壤含水率的平均值作为当月平均土壤含水率。

1.5 LSTM 神经网络模型

LSTM 神经网络模型是一种特殊的循环神经网络(Recurrent neural network, RNN)模型,可以学习长距离时间序列数据。基于 LSTM 神经网络模型的土壤含水率模型由输入层、隐含层和输出层组成,其结构如图 1 所示。输入层主要按公式 $x_i = (x'_i - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min})$ (式中 x_i 为归一化计算结果, x'_i 为要进行归一化的月平均气温、月降水量、月平均辐射量、月平均蒸发量、月作物耗水量, x_{\max} 为月平均气温、月降水量、月平均辐射量、月平均蒸发量、月作物耗水量的最大值, x_{\min} 为月平均气温、月降水量、月平均辐射量、月平均蒸发量、月作物耗水量的最小值)对月平均气温、月降水量、月平均辐射量、月平均蒸发量、月作物耗水量分别进行归一化处理,按 7:3 的比例将实测数据划分为训练集和测试集,最后由 LSTM 细胞单元组成的隐含层处理。隐含层主要负责完成土壤含水率计算,而其计算结果由输出层处理。输出层对隐含层产生的数据进行去归一化后,计算出月平均土壤含水率的模拟值。

隐含层是整个 LSTM 神经网络的核心,其细胞单元结构如图 2 所示。LSTM 神经网络的隐含层通过 sigmoid 函数和一个点乘运算组成了一个具有信息选择功能的门,其中 sigmoid 函数的输出值在 0~

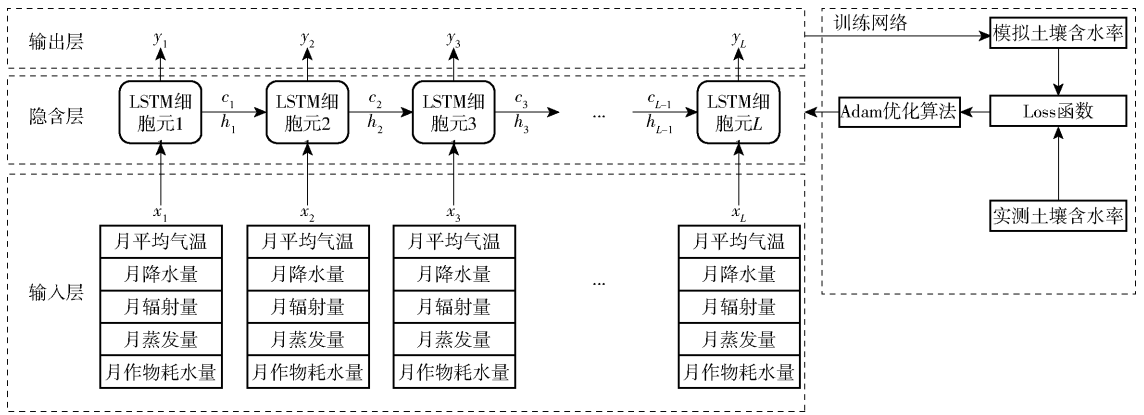


图1 基于 LSTM 神经网络的土壤含水率模型示意图

Fig. 1 Diagram of soil water storage model based on LSTM neural network

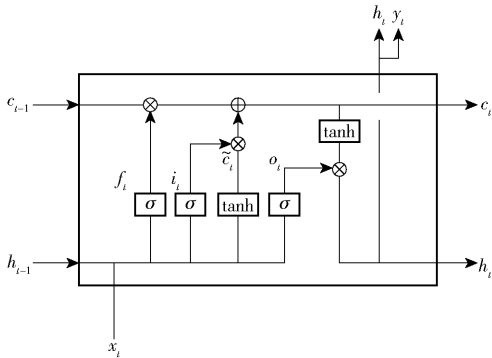


图2 LSTM 神经网络细胞单元结构图

Fig. 2 Cell structure of LSTM neural network

1 之间,0 代表过滤信息,1 代表保留信息,LSTM 神经网络通过门能实现信息的遗忘和记忆。LSTM 神经网络细胞单元包括遗忘门、输入门和输出门。通过这些细胞单元使 LSTM 神经网络具有长期信息记忆的能力^[21]。根据 LSTM 神经网络细胞单元的结构图,可以得到输入门,输出门与遗忘门的函数表达式为

$$i_t = \sigma(w_i[h_{t-1}, x_t] + b_i) \quad (3)$$

$$f_t = \sigma(w_f[h_{t-1}, x_t] + b_f) \quad (4)$$

$$\tilde{c}_t = \tanh(w_c[h_{t-1}, x_t] + b_c) \quad (5)$$

$$c_t = f_t c_{t-1} + i_t \tilde{c}_t \quad (6)$$

$$o_t = \sigma(w_o[h_{t-1}, x_t] + b_o) \quad (7)$$

$$h_t = o_t \tanh(c_t) \quad (8)$$

式中 i_t ——输入门
 x_t ——本细胞单元输入值
 h_{t-1} ——上一细胞单元输出值
 b_i ——输入门偏置
 w_i ——输入门权重
 f_t ——遗忘门
 b_f ——遗忘门偏置
 w_f ——遗忘门权重
 \tilde{c}_t ——将要加入的细胞结构状态

b_c ——本输入单元偏置
 w_c ——本输入单元权重
 c_t ——本细胞单元结构状态
 c_{t-1} ——上一细胞单元结构状态
 o_t ——输出门
 w_o ——输出门权重
 b_o ——输出门偏置
 h_t ——本细胞单元的输出值
 σ ——sigmoid 函数
 $\tanh(\cdot)$ ——双曲正切激活函数^[22]

基于 LSTM 神经网络模型的土壤含水率模型的具体计算步骤为:

- (1) 利用正交初始化完成隐含层遗忘门权重 w_f 的初始化。
- (2) 将输入层归一化后的训练集数据 $x_t (1 \leq t \leq L)$ 输入隐含层。
- (3) 隐含层各细胞单元根据上一细胞单元的细胞结构状态 c_{t-1} 、输出值 h_{t-1} ,以及本细胞的输入值 x_t ,按照式(3)~(8)计算本细胞单元的细胞状态 c_t 、输出值 h_t ,并将土壤含水率模拟结果 y'_t 传输到输出层。
- (4) 利用损失函数 $\text{Loss} = \sum_{i=1}^L (y'_i - y_i)^2 / L$ 计算每一个 LSTM 神经网络细胞单元含水率模拟值 y'_t 与实测值 y_t 的反向误差。
- (5) 根据反向误差,求出相应的权重 w_f 的梯度。
- (6) 利用 Adam 优化算法反复迭代,不断更新遗忘门权重 w_f ,降低函数 Loss 的误差,直到 LSTM 神经网络模型收敛,训练结束。
- (7) 利用土壤含水率测试集数据对完成训练的 LSTM 神经网络模型进行土壤含水率适应性分析。
- (8) LSTM 神经网络模型通过适应分析后,将研究区月平均气温、月降水量、月平均辐射量、月平均蒸发量、月作物耗水量输入模型完成土壤含水率的模拟。

1.6 数据处理

利用 Matlab 作为基于 LSTM 神经网络模型模拟土壤含水率的试验仿真环境,将研究区 2002—2011 年 1—12 月月平均气温、月降水量、月平均辐射量、月平均蒸发量、月作物耗水量作为输入 x_t ,将 4 种耕作措施 0~5 cm、5~10 cm、10~30 cm、30~50 cm、50~80 cm、80~110 cm、110~140 cm、140~170 cm、170~200 cm 共 9 个土层的土壤含水率作为输出 y_t ,建立 LSTM 神经网络模型,并利用 2012—2013 年 1—12 月土壤含水率实测数据对模型进行适应性分析。最终利用经过验证的模型模拟研究区土壤含水率变化情况,并分析不同轮作体系下,4 种耕作措施的土壤含水率变化情况。

2 结果与分析

2.1 LSTM 神经网络模型的适应性分析

利用基于 LSTM 神经网络的土壤含水率预测模型对研究区 2012—2013 年 1—12 月 0~200 cm 共 9 个土层的土壤含水率进行模拟,以验证模型对模拟研究区土壤含水率的适应性,选取均方根误差 (Root mean squared error, RMSE)、决定系数 (Determination coefficient, R^2) 和平均相对误差 (Mean relatively error, MRE) 3 种统计指标对模拟结果进行分析,如表 2 所示。两个轮作序列中,LSTM 神经网络模型模拟土壤含水率的精度随着土层深度的增加不断下降,但模型对研究区 0~200 cm

表 2 不同轮作序列和耕作措施下土壤含水率 LSTM 神经网络模型模拟值与实测值的统计指标

Tab.2 Statistical indices of LSTM neural network simulated and observed values of soil water content under different tillage measures and different rotation sequences

土层深度/ cm	处理	P/W					W/P				
		模拟平均 值/%	实测平均 值/%	平均相对 误差/%	均方根误 差/%	决定 系数	模拟平均 值/%	实测平均 值/%	平均相对 误差/%	均方根误 差/%	决定 系数
0~5	T	13.27	13.17	0.72	2.28	0.86	13.63	12.83	6.24	2.26	0.88
	NT	13.34	13.63	2.16	2.52	0.86	13.07	13.16	0.68	2.39	0.80
	TS	12.49	13.38	6.65	2.59	0.86	11.93	13.04	8.51	2.41	0.85
	NTS	14.48	13.56	6.76	2.61	0.87	14.30	13.41	6.64	2.61	0.89
5~10	T	14.78	14.73	0.34	2.55	0.83	14.89	14.67	1.50	2.41	0.83
	NT	16.55	15.20	8.88	2.35	0.83	14.37	14.99	4.14	2.08	0.72
	TS	16.16	15.04	7.45	1.99	0.87	14.71	14.83	0.81	2.13	0.83
	NTS	16.62	15.47	7.43	2.02	0.89	15.96	15.21	4.93	2.56	0.84
10~30	T	17.27	15.76	9.58	2.92	0.88	16.94	15.86	6.81	2.68	0.82
	NT	15.93	16.06	0.81	2.84	0.87	17.09	16.13	5.95	2.55	0.85
	TS	16.89	16.01	5.50	2.00	0.87	17.72	16.05	10.40	2.59	0.86
	NTS	17.85	16.32	9.38	2.45	0.87	17.88	16.33	9.40	2.66	0.89
30~50	T	15.45	15.63	1.15	1.56	0.86	14.60	15.58	6.29	2.80	0.78
	NT	15.49	15.82	2.09	2.23	0.84	14.09	15.82	10.94	2.92	0.77
	TS	16.64	15.54	7.08	2.10	0.85	17.23	15.75	9.40	2.99	0.72
	NTS	15.08	15.79	4.50	2.14	0.84	15.35	16.08	4.54	2.84	0.75
50~80	T	14.56	15.64	6.91	2.29	0.89	14.59	15.73	7.25	2.81	0.79
	NT	14.24	16.00	11.00	2.45	0.85	14.16	15.86	10.72	2.90	0.80
	TS	16.89	15.73	7.37	2.03	0.84	17.72	15.81	12.08	2.97	0.78
	NTS	14.69	16.01	8.24	2.18	0.82	14.57	16.01	8.99	2.97	0.80
80~110	T	15.29	15.61	2.05	1.42	0.84	13.99	15.51	9.80	2.16	0.87
	NT	15.51	15.87	2.27	1.52	0.84	14.17	15.75	10.03	2.91	0.83
	TS	14.75	15.82	6.76	1.67	0.86	17.78	15.65	13.61	2.83	0.80
	NTS	14.78	16.06	7.97	1.84	0.87	14.67	16.08	8.77	1.98	0.87
110~140	T	14.48	15.92	9.05	1.93	0.76	14.13	15.83	10.74	2.00	0.82
	NT	14.98	16.08	6.84	1.65	0.74	14.96	16.09	7.02	2.79	0.80
	TS	17.07	15.99	6.75	1.54	0.75	14.88	16.02	7.12	2.83	0.80
	NTS	14.79	16.34	9.49	2.02	0.76	14.57	16.24	10.28	2.56	0.83
140~170	T	15.04	16.74	10.16	1.85	0.79	14.83	16.60	10.66	2.13	0.77
	NT	15.55	16.98	8.42	1.64	0.79	16.07	16.90	4.91	2.01	0.77
	TS	18.96	16.88	12.32	2.57	0.78	14.51	16.69	13.06	2.60	0.74
	NTS	15.30	17.19	10.99	2.35	0.73	14.83	16.94	12.46	2.48	0.75
170~200	T	18.23	18.20	0.16	0.85	0.74	17.12	17.24	0.70	2.69	0.73
	NT	18.62	18.46	0.87	1.05	0.73	16.90	17.39	2.82	2.28	0.82
	TS	17.19	18.31	6.12	1.73	0.69	16.28	17.40	6.44	2.46	0.78
	NTS	17.78	18.74	5.12	1.63	0.71	16.76	17.55	4.50	2.34	0.80

土层土壤含水率的模拟效果总体良好,4种耕作措施的土壤含水率的模拟值与实测值的平均RMSE为2.29%,平均MRE为6.79%,平均 R^2 为0.82。结果表明,LSTM神经网络模型对土壤含水率的模拟具有较高的准确性,利用该模型可以实现陇中黄土高原沟壑区土壤水分变化的动态模拟。

2.2 不同耕作措施下土壤含水率的动态变化规律

2.2.1 不同耕作措施下土壤含水率的垂直变化特征

为了进一步探明不同保护性耕作措施下,不同土层土壤含水率的变化规律,对W/P和P/W两个轮作序列0~200 cm土层的土壤含水率进行综合分析,如图3所示。P/W轮作序列4种耕作措施0~200 cm土层的土壤含水率均高于W/P轮作序列,T、NT、TS和NTS分别增加1.49%、1.61%、1.69%和1.76%。

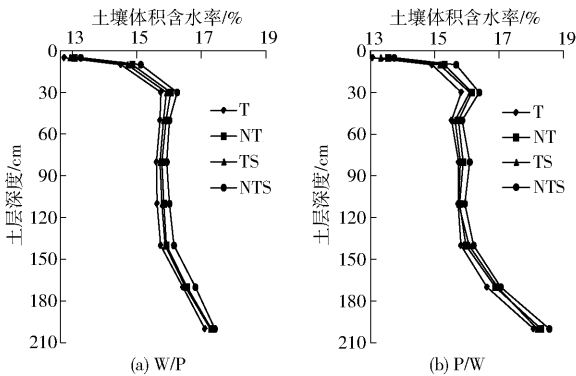


图3 不同轮作序列和耕作措施下0~200 cm土层土壤含水率变化曲线

Fig. 3 Changing curves of soil water content in 0~200 cm soil layer under different tillage measures and different rotation sequences

不同轮作序列下,4种耕作措施0~200 cm土层土壤含水率由大到小依次为NTS、NT、TS、T,NTS处理土壤含水率比NT、TS和T处理分别增加1.27%、1.75%和2.81%。其中,W/P轮作序列中,NTS处理土壤含水率比NT、TS和T处理分别增加1.19%、1.72%和2.67%;P/W轮作序列中,NTS处理土壤含水率比NT、TS和T处理分别增加1.34%、1.78%和2.94%。

保护性耕作措施对0~30 cm土层土壤含水率的影响最为显著。其中,W/P轮作序列中,0~5 cm土层TS、NT和NTS处理比T处理土壤含水率分别提高1.41%、2.51%和4.00%;5~10 cm土层TS、NT和NTS处理比T处理土壤含水率分别提高1.38%、2.41%和4.20%;10~30 cm土层TS、NT和NTS处理比T处理土壤含水率分别提高1.07%、1.91%和3.17%;而其他土层TS、NT和NTS处理比T处理土壤含水率分别提高1.12%、0.79%和

2.18%。P/W轮作序列中,0~5 cm土层TS、NT和NTS处理比T处理土壤含水率分别提高1.91%、3.75%和5.13%;5~10 cm土层TS、NT和NTS处理比T处理土壤含水率分别提高1.61%、2.62%和5.03%;10~30 cm土层TS、NT和NTS处理比T处理土壤含水率分别提高1.64%、2.08%和3.54%;其他土层TS、NT和NTS处理比T处理土壤含水率分别提高0.89%、1.06%和2.23%。

与NT、TS和T处理相比,NTS处理对0~30 cm土层土壤含水率影响最为显著。NTS处理0~30 cm土层土壤含水率比NT、TS和T处理平均提高1.60%、2.63%和4.18%,而其他土层NTS处理土壤含水率比NT、TS和T处理提高1.13%、1.42%和2.29%。其中,W/P轮作序列中,NTS处理0~30 cm土层土壤含水率比NT、TS和T处理分别提高1.48%、2.47%和3.79%,而其他土层NTS处理土壤含水率比NT、TS和T处理分别提高1.07%、1.43%和2.26%;在P/W轮作序列中,NTS处理0~30 cm土层土壤含水率比NT、TS和T处理分别提高1.71%、2.79%和4.56%,而其他土层NTS处理土壤含水率比NT、TS和T处理分别提高1.18%、1.40%和2.33%。

2.2.2 不同耕作措施下土壤含水率的变异系数

不同轮作序列下,4种耕作措施的土壤含水率变异系数如图4所示。W/P轮作序列中,TS、NT和NTS处理0~30 cm土层土壤含水率变异系数较T处理分别减少1.32%、5.05%和9.09%;50~200 cm土层中,NT处理的土壤含水率变异系数较T处理减小0.33%,而TS和NTS处理较T处理分别增加1.44%和3.62%。P/W轮作序列中,TS、NT和NTS处理0~30 cm土层土壤含水率变异系数较T处理分别减少0.81%、3.06%和6.92%;50~200 cm土层中,NT处理的土壤含水率变异系数较T处理减小0.39%,而TS和NTS处理较T处理分别增加1.37%和3.10%。结果表明,不同耕作措施下,0~30 cm土层的土壤含水率变异系数差异较为明显,TS、NT和NTS处理可以不同程度提高T处理土壤表层水分的稳定性,其中NTS处理的土壤含水率稳定性最高。随着土层深度的不断增加,4种耕作措施的土壤含水率变异系数逐渐减小,土壤水分的稳定性不断提高,不同耕作措施间的土壤含水率变异系数差异不断缩小,保护性耕作措施对土壤含水率的影响效果逐渐降低。

2.2.3 不同耕作措施下土壤含水率的季节变化特征

不同轮作序列下,4种耕作措施的土壤含水率季节变化趋势如图5所示。不同轮作序列下,4种

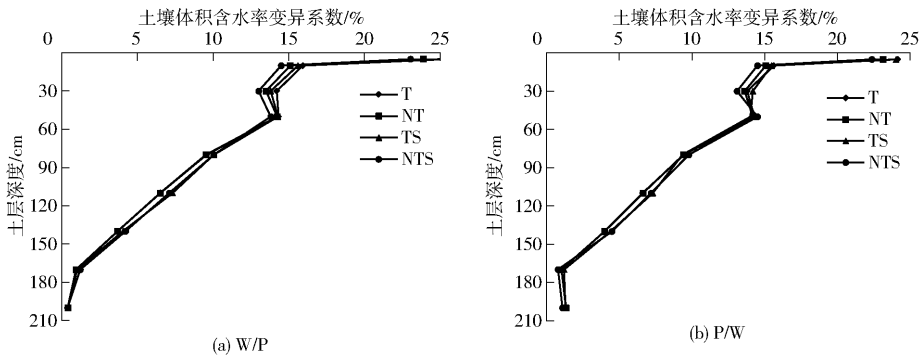


图 4 不同轮作序列和耕作措施下 0 ~ 200 cm 土层土壤含水率的变异系数
Fig. 4 Variation coefficient of soil water content in 0 ~ 200 cm soil layer under different tillage measures and different rotation sequences

耕作措施的土壤含水率变化趋势基本保持一致,1—12 月土壤含水率在 13% ~ 19% 的变化范围内,其中最低值出现在 6 月,最高值出现在 9 月。4 种耕作措施的土壤含水率在不同季节总体呈先减少后增加的变化趋势,土壤含水率的年内变化分为 3 个阶段:土壤水分缓慢消耗阶段(10 月—翌年 4 月):该阶段平均降水量为 65.51 mm。W/P 轮作序列中,NTS 处理的土壤含水率比 T、NT 和 TS 分别增加 3.56%、1.78% 和 2.80%;P/W 轮作序列中,NTS 处理的土壤含水率比 T、NT 和 TS 分别增加 3.64%、1.87% 和

2.81%。土壤水分大量损耗阶段(5—6 月):该阶段平均降水量 76.69 mm。W/P 轮作序列中,NTS 处理的土壤含水率比 T、NT 和 TS 分别增加 1.96%、0.68% 和 1.36%;P/W 轮作序列中,NTS 处理的土壤含水率比 T、NT 和 TS 分别增加 2.06%、0.79% 和 1.45%。土壤水分恢复阶段(7—9 月):该阶段平均降水量为 165.16 mm。W/P 轮作序列中,NTS 处理的土壤含水率比 T、NT 和 TS 分别增加 2.68%、1.39% 和 2.13%;W/P 轮作序列中,NTS 处理的土壤含水率比 T、NT 和 TS 分别增加 2.80%、1.92% 和 2.39%。

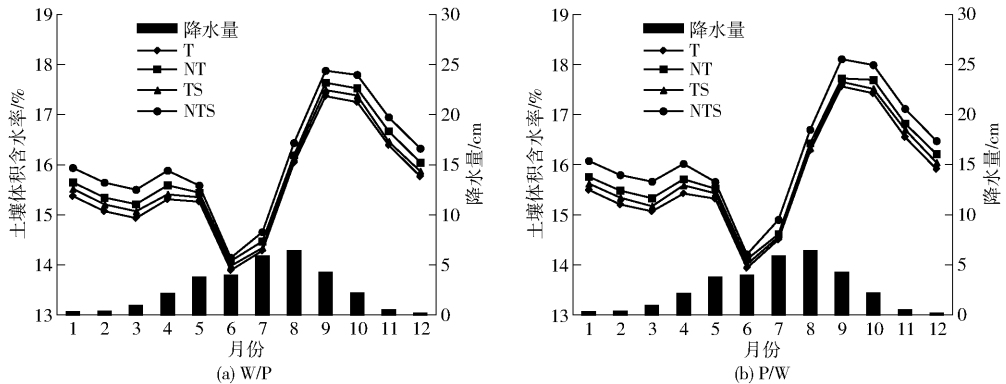


图 5 不同轮作序列和耕作措施下 0 ~ 200 cm 土层各月土壤含水率的变化

Fig. 5 Changes of soil water content in 0 ~ 200 cm soil layer under different tillage measures and different rotation sequences

不同轮作序列下,年内 4 种耕作措施的土壤含水率随季节发生变化。其中,土壤水分缓慢消耗阶段,NTS 处理水分消耗最小,土壤含水率最高;土壤水分大量损耗阶段,4 种耕作措施的土壤含水率快速下降,NTS 处理的土壤含水率降幅最大,4 种耕作措施的土壤含水率差别不大,此阶段 NTS 处理的蓄水保墒效果不再显著;土壤水分恢复阶段,受降水大幅增加的影响 4 种耕作措施的土壤含水率开始显著回升,4 种耕作措施中 NTS 处理的土壤含水率增长幅度最大。

2.2.4 NTS 处理各土层土壤含水率的季节变化特征

不同轮作序列下,4 种耕作措施土壤含水率的季节变化趋势一致,只是大小区别。为此,本研究以

NTS 处理为例,分析 0 ~ 200 cm 各土层土壤含水率的季节变化特征,如图 6(图中含水率单位为%)所示。

10 月—翌年 4 月 0 ~ 200 cm 土层土壤含水率变化幅度不大,呈稳定状态。该时期由于气温相对较低,日照强度不高,作物生长并未进入旺季,散蒸量相对较小,土壤含水率呈缓慢消耗状态。5—6 月各土层土壤含水率快速下降,在 50 cm 左右的根层形成了土壤含水率的低值区。该时期温度不断升高,日照强度不断增大,同时作物生长进入旺盛期,作物的耗水量达到最大。虽然降水量较前期有所增加,但受蒸散量变大的影响,土壤含水率仍处于快速消耗状态。8—9 月土壤表层含水率逐渐回升,在 0 ~

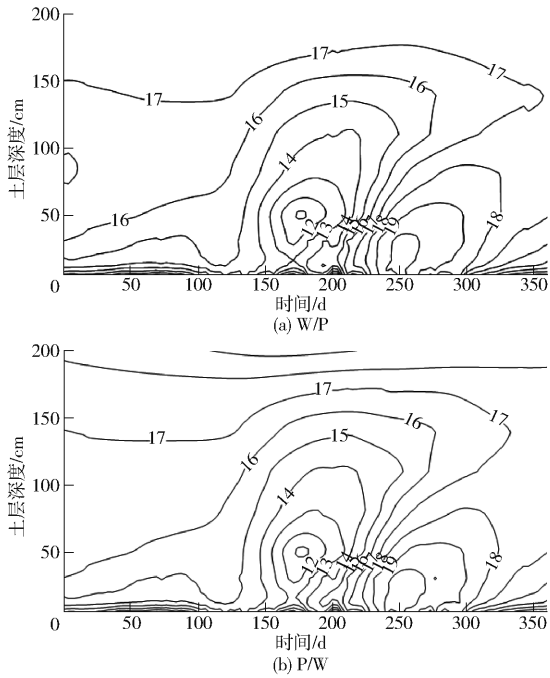


图6 不同轮作序列下 NTS 处理 0~200 cm 土壤含水率等值线图

Fig. 6 Contour maps of soil water content of NTS treatment in 0~200 cm soil layer under different rotation sequences

50 cm 的土壤表层形成了土壤含水率的高值区。该时期研究区降水量达到全年最大,气温逐渐降低,日照减弱,蒸散量减少,土壤含水率处于恢复状态。

2.3 典型年型不同耕作措施下土壤含水率的垂直分异特征

研究区 2002—2017 年平均降水量为 393.53 mm,其中 2003 年降水量最高,达到 564.5 mm,降水量距平百分率为 43.44%,将该年作为典型丰水年。2016 年降水量最低,仅为 275.9 mm,降水量距平百分率为 -29.89%,将该年作为典型干旱年。

本研究分析典型丰水年(2003 年)和典型干旱年(2016 年)对轮作序列中小麦和豌豆在不同耕作条件下不同土层土壤含水率的影响。结果表明,4 种耕作措施的土壤含水率变化规律在干旱年和丰水年表现相似,由大到小为 NTS、NT、TS、T,0~200 cm 土层土壤含水率变化幅度随土层递增呈逐渐减小的变化趋势。在相同降水条件和耕作措施下,由于不同作物的生育期以及耗水特性的差异,造成了作物对土壤用水强度及深度的消耗差异。而各土层土壤含水率变异系数能够较为准确地反映作物相对用水强度,相同土层变异系数与用水强度成正比,如表 3 所示。

在同一降水年型不同种植作物条件下,干旱年豌豆地 T、NT、TS 和 NTS 处理 0~200 cm 土层的土壤含水率为 16.16%、16.24%、16.19% 和 16.55%,大于小麦地相应耕作措施的土壤含水率(15.40%、

15.49%、15.44% 和 15.79%);丰水年豌豆地 T、NT、TS 和 NTS 处理 0~200 cm 土层的土壤含水率为 16.44%、16.49%、16.46% 和 16.78%,大于小麦地相应耕作措施的土壤含水率(16.26%、16.34%、16.30% 和 16.66%),表明豌豆的用水强度小于小麦的用水强度。

在同一降水年型相同种植作物条件下,干旱年豌豆地 T、NT、TS 和 NTS 处理 0~200 cm 土层的土壤含水率平均变异系数为 10.44%、9.97%、10.30% 和 9.69%;丰水年豌豆地 4 种耕作措施 0~200 cm 土层的土壤含水率平均变异系数为 24.45%、23.90%、24.12% 和 23.62%。干旱年小麦地 T、NT、TS 和 NTS 处理 0~200 cm 土层的土壤含水率平均变异系数为 13.70%、12.95%、13.50% 和 9.55%;丰水年小麦地 4 种耕作措施 0~200 cm 土层的土壤含水率平均变异系数为 20.94%、20.46%、20.82% 和 20.11%。在降水年型和种植作物相同的条件下,耕作措施是决定土壤含水率稳定性的主要因素,而 NTS 处理 0~200 cm 土层的土壤含水率平均变异系数小于 NT、TS 和 T 处理,该处理蓄水保墒效果更加显著。同时,丰水年 4 种耕作措施 0~200 cm 土层的土壤含水率平均变异系数均大于干旱年相应耕作措施的土壤含水率平均变异系数,表明丰水年降水对土壤水层能够产生更大的影响。

在同一种种植物不同降水年型条件下,干旱年豌豆地 NT、TS、NTS 与 T 处理相比,土壤含水率分别增加 0.48%、0.19% 和 2.37%;丰水年豌豆地 NT、TS、NTS 与 T 处理相比,土壤含水率分别增加 0.36%、0.16% 和 2.12%。干旱年小麦地 NT、TS、NTS 与 T 处理相比,土壤含水率分别增加 0.62%、0.29% 和 2.55%;丰水年小麦地 NT、TS、NTS 与 T 处理相比,土壤含水率分别增加 0.47%、0.24% 和 2.40%。干旱年 NTS、NT、TS 与 T 处理相比土壤含水率的增幅均大于丰水年,表明保护性耕作措施在干旱年的保墒效果更为显著。

3 讨论

土壤含水率与耕作措施、降水量、蒸发量以及作物蒸腾之间存在复杂的非线性关系,探明这种非线性关系对土壤含水率的准确预测起着至关重要的作用。罗党等^[15]基于灰色神经网络建立了多变量土壤含水率预测模型,该模型的平均相对误差为 10.29%。王国玉等^[23]建立的 Biswas 土壤水分估算模型的平均相对误差小于 10%。本文基于 LSTM 神经网络建立了土壤含水率与温度、降水量、辐射量、蒸发量以及作物耗水量的非线性模型,实现了不同

表 3 不同降水年型和不同耕作措施下土壤含水率的统计特征

Tab. 3 Characters of soil water content of different tillage and precipitation

%

降水年型	作物	处理	参数	土层深度/cm								
				0~5	5~10	10~30	30~50	50~80	80~110	110~140	140~170	170~200
丰水年	豌豆	T	均值	13.77	15.78	16.67	16.57	16.62	16.39	16.68	17.51	17.93
			变异系数	37.42	30.05	29.79	28.56	23.78	19.96	16.33	17.11	17.01
		NT	均值	13.83	15.82	16.79	16.62	16.66	16.45	16.73	17.57	17.98
			变异系数	37.25	29.76	29.18	28.07	23.12	19.58	16.11	16.08	15.92
		TS	均值	13.79	15.80	16.73	16.59	16.64	16.42	16.70	17.54	17.95
			变异系数	37.33	29.91	29.56	28.42	23.62	19.68	16.28	16.19	16.05
	NTS	均值	14.32	16.11	17.03	16.84	16.92	16.62	16.96	17.82	18.44	
		变异系数	37.08	29.56	28.91	27.84	23.05	18.94	15.83	15.76	15.57	
	小麦	T	均值	13.62	15.58	16.51	16.26	16.18	15.95	16.36	17.21	18.71
			变异系数	33.14	26.08	25.54	25.32	21.08	16.81	13.74	13.51	13.28
		NT	均值	13.71	15.65	16.57	16.31	16.25	16.03	16.44	17.28	18.83
			变异系数	32.55	25.69	25.34	25.13	20.73	16.42	13.28	12.72	12.32
TS		均值	13.66	15.61	16.54	16.29	16.22	15.99	16.40	17.25	18.77	
		变异系数	32.88	25.91	25.46	25.25	21.01	16.63	13.62	13.39	13.21	
NTS	均值	14.13	15.91	16.79	16.53	16.51	16.34	16.82	17.68	19.19		
	变异系数	31.89	25.42	25.20	25.02	20.41	15.92	13.08	12.32	11.69		
干旱年	豌豆	T	均值	13.24	15.33	16.33	16.19	16.37	16.19	16.54	17.34	17.94
			变异系数	22.95	13.85	11.78	12.96	8.73	7.99	6.80	4.56	4.35
		NT	均值	13.39	15.38	16.36	16.27	16.42	16.25	16.69	17.40	18.01
			变异系数	21.95	13.36	11.24	12.52	8.31	7.56	6.25	4.32	4.20
		TS	均值	13.28	15.36	16.35	16.21	16.40	16.22	16.57	17.37	17.98
			变异系数	22.52	13.76	11.62	12.89	8.62	7.85	6.67	4.49	4.29
	NTS	均值	13.84	15.69	16.60	16.46	16.69	16.54	16.94	17.77	18.39	
		变异系数	20.82	13.13	11.15	12.30	8.22	7.42	6.09	4.15	3.91	
	小麦	T	均值	12.56	14.52	15.53	15.27	15.36	15.28	15.71	16.48	17.88
			变异系数	18.02	11.23	12.59	14.85	16.09	13.37	13.21	12.08	11.85
		NT	均值	12.69	14.63	15.56	15.41	15.49	15.38	15.79	16.52	17.98
			变异系数	17.80	10.73	12.19	13.82	13.53	13.18	12.71	11.64	10.92
TS		均值	12.62	14.57	15.54	15.35	15.43	15.34	15.75	16.47	17.92	
		变异系数	17.96	11.08	12.36	14.65	16.01	13.22	12.95	11.84	11.43	
NTS	均值	13.18	14.94	15.89	15.74	15.57	15.65	15.98	16.89	18.28		
	变异系数	17.63	10.59	10.02	9.19	8.52	8.05	7.84	7.05	7.02		

耕作措施土壤含水率的准确模拟,模型模拟结果的平均均方根误差为 2.29%,平均相对误差为 6.79%,平均决定系数为 0.82,郭庆春等^[24]基于 BP 神经网络预测了 0~30 cm 土层的土壤含水率,且平均相对误差不超过 2%,预测精度虽高于本模型,但该模型仅限于模拟土壤表层的含水率,而对深层土壤的模拟效果未知。本研究基于 LSTM 神经网络模型模拟研究区土壤含水率具有较高的精度,可以实现陇中黄土高原沟壑区不同耕作措施条件下 0~200 cm 土层土壤含水率的准确预测。但本研究在训练模型时仅将当地气象条件和作物耗水作为输入因子,没有考虑土壤特征、径流和渗漏等相关因素的影响,造成模型模拟精度随土层增加有所下降。在后期的研究中,可以通过增加新的约束和边界条件来进一步提高模型模拟深层土壤含水率的精度。

豆科作物与禾谷类作物轮作是优化土壤水分利用的重要措施之一^[25]。郭清毅等^[26]研究表明,

P/W 轮作序列中传统耕作、免耕、传统耕作秸秆覆盖以及免耕覆盖的土壤含水率均比 W/P 轮作序列中 4 种耕作措施的土壤含水率有所增加,增幅为 0.33%~0.62%。而本研究表明,P/W 轮作序列中 4 种耕作措施的土壤含水率比 W/P 轮作序列分别增加 1.49%、1.61%、1.69% 和 1.76%,造成研究结果有所差异的主要原因是本研究计算过程没有考虑径流和渗漏等因素的影响,造成模型模拟结果偏大。

大量研究证实,保护性耕作措施可显著提高土壤表层的含水率,起到明显蓄水保墒作用,保护性耕作措施下土壤蓄集水分能力显著大于传统耕作^[27-28]。李月兴等^[29]研究表明,保护性耕作措施下,0~40 cm 土层土壤含水率较传统耕作有明显提高。李玲玲等^[30]研究表明,免耕覆盖对 0~10 cm 土层土壤水分含量影响较大。本研究表明,在 0~5 cm、5~10 cm、10~30 cm 和 50~200 cm 土层中,传统耕作秸秆覆盖、免耕以及免耕覆盖与传统耕作

相比,土壤含水率分别提高 1.41% ~ 5.13%、1.38% ~ 5.03%、1.07% ~ 3.45% 和 0.89% ~ 2.23%,保护性耕作措施对 0 ~ 30 cm 土层土壤含水率的影响最为显著,免耕覆盖条件下的土壤含水率最高、变异系数最小,这主要是因为覆盖可以抑制表层土壤水分蒸发、减小径流,同时多年的传统耕作会在 25 cm 左右的土层中形成坚实的犁底层,影响了降水的下渗,从而提高 0 ~ 30 cm 土层的土壤含水率^[31]。

晋小军等^[32]研究表明,4种耕作措施中免耕的土壤含水率最高,而免耕覆盖和传统耕作秸秆覆盖的土壤含水率最低。本研究结果则不尽相同,研究表明在不同轮作序列、不同降水年型和不同种植作物的条件下,免耕覆盖的土壤含水率比免耕、传统耕作秸秆覆盖和传统耕作增加 1.19% ~ 2.94%,这与王克鹏等^[33]和刘爽等^[34]的研究结果一致。余海英等^[35]研究表明,免耕处理较传统耕作能够明显提高土壤的水分含量,在降水量较大的年份里两者间的差异更为显著。吕美蓉等^[36]研究发现,免耕与秸秆因素的交互效应弱化了免耕覆盖在干旱时期的保水效果。而本研究结果表明,丰水年降水对土壤水层产生的影响更大,而干旱年免耕和免耕覆盖的蓄水保墒效果更加显著,这与丁晋利等^[37]研究结果一致。

保护性耕作措施的保水效果会随作物生育期的推后而发生变化^[38]。陈四龙等^[39]研究表明,免耕覆盖可以起到作物生长前期蓄水后期供水的作用,同时耕作方式对土壤蓄水作用的差异主要发生在作物生育前期。而本研究结果表明,在作物生长前期(3—5月),传统耕作秸秆覆盖、免耕和免耕覆盖与传统耕作相比能显著提高土壤含水率,其中免耕覆盖条件下土壤含水率最高;在作物生长旺盛期(5—6月),4种耕作措施的土壤含水率快速下降,在50 cm左右的根层形成了土壤含水率的低值区,保护性耕作措施与传统耕作的土壤含水率差异不显著;而在作物生长后期(7—8月),4种耕作措施的土壤含水率显著回升,并且在0~50 cm的土壤表层形成了土壤含水率的高值

区,免耕覆盖的土壤含水率增加幅度最为明显,这主要是由于在小麦开花灌浆期和豌豆开花结荚期,表层部分根系已经死亡,降水成为影响表层土壤含水率的主要因素,在作物生长后期研究区降水量明显增加,免耕覆盖在减少土壤水分蒸发的同时,还可以增加土壤水分的入渗率,因此作物生长后期免耕覆盖的土壤含水率增幅显著^[40]。

4 结论

(1) LSTM神经网络模型能够较好地模拟陇中黄土高原沟壑区不同耕作措施下的土壤含水率,其模拟值和实测值的平均均方根误差为 2.29%,平均相对误差为 6.79%,平均决定系数为 0.82。

(2) 豌豆/春小麦轮作序列中 4 种耕作措施的土壤含水率高于春小麦/豌豆轮作序列,4 种耕作措施的增幅分别为 1.49%、1.61%、1.69% 和 1.76%。

(3) 不同耕作措施下,免耕覆盖具有较强的蓄水保墒效果,且干旱年份效果更为显著,土壤含水率分别比免耕、传统耕作秸秆覆盖和传统耕作增加 1.27%、1.75% 和 2.81%。免耕覆盖对 0 ~ 30 cm 土层土壤含水率的影响最为显著,免耕覆盖 0 ~ 30 cm 土层土壤含水率分别比免耕、传统耕作秸秆覆盖和传统耕作平均增加 1.60%、2.63% 和 4.18%,而其他土层免耕覆盖土壤含水率分别比免耕、传统耕作秸秆覆盖和传统耕作增加 1.13%、1.42% 和 2.29%。

(4) 不同耕作措施下的蓄水保墒效果随季节发生变化,免耕覆盖的土壤含水率整体高于其他 3 种耕作措施,且作物生长前期保水效果更为显著。在土壤水分缓慢消耗阶段,免耕覆盖的土壤含水率分别比传统耕作、免耕和传统耕作秸秆覆盖平均增加 3.60%、1.83% 和 2.81%;在土壤水分大量损耗阶段,免耕覆盖的土壤含水率分别比传统耕作、免耕和传统耕作秸秆覆盖平均增加 2.01%、0.74% 和 1.41%;在土壤水分恢复阶段,免耕覆盖的土壤含水率分别比传统耕作、免耕和传统耕作秸秆覆盖平均增加 2.74%、1.66% 和 2.26%。

参 考 文 献

- [1] 胡继超,姜东,曹卫星,等. 短期干旱对水稻叶水势、光合作用及干物质分配的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(1): 63-67.
HU Jichao, JIANG Dong, CAO Weixing, et al. Effect of short-term drought on leaf water potential, photosynthesis and dry matter partitioning in paddy rice[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(1): 63-67. (in Chinese)
- [2] 岳宏昌,王玉,李缠云,等. 黄土丘陵沟壑区土壤水分垂直分布研究[J]. 水土保持通报, 2009, 29(1): 66-82.
YUE Hongchang, WANG Yu, LI Chanyun, et al. Vertical distribution of soil moisture in the loess hilly and gully area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009, 29(1): 66-82. (in Chinese)
- [3] CHOUDHURY S G, SRIVASTAVA S, SINGH R, et al. Tillage and residue management effects on soil aggregation, organic carbon dynamics and yield attribute in rice-wheat cropping system under reclaimed sodic soil[J]. Soil & Tillage Research, 2014, 136(4): 76-83.

- [4] CHERYL P, HUMBERTO B C, FABRICE D, et al. Conservation agriculture and ecosystem services: an overview [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2014, 187: 87 – 105.
- [5] 彭正凯, 李玲玲, 谢军红, 等. 保护性耕作对陇中旱作农田水分特征的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(12): 4022 – 4028.
PENG Zhengkai, LI Lingling, XIE Junhong, et al. Effects of conservation tillage on water characteristics in dryland farm area of central Gansu, Northwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(12): 4022 – 4028. (in Chinese)
- [6] 彭正凯, 李玲玲, 谢军红, 等. 不同耕作措施对旱地作物生育期农田耗水结构和水分利用效率的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(5): 214 – 221.
PENG Zhengkai, LI Lingling, XIE Junhong, et al. Effect of different tillage practices on water consumption structure and water use efficiency during crop growth period in arid farmland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(5): 214 – 221. (in Chinese)
- [7] 郑洪兵, 刘武仁, 罗洋, 等. 耕作方式对农田土壤水分变化特征及水分利用效率的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(3): 264 – 270.
ZHENG Hongbing, LIU Wuren, LUO Yang, et al. Effect of different tillage methods on soil water content and water use efficiency in cropland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(3): 264 – 270. (in Chinese)
- [8] 邵晓梅, 严昌荣. 陇中黄土高原丘陵沟壑区土壤水分动态变化分析[J]. *水土保持研究*, 2006, 13(4): 243 – 249.
SHAO Xiaomei, YAN Changrong. Analysis on the dynamic change of soil water in the Loess Plateau gully and hill region [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006, 13(4): 243 – 249. (in Chinese)
- [9] 李旺霞, 陈彦云. 土壤水分及其测量方法的研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2014, 42(10): 335 – 339.
LI Wangxia, CHEN Yanyun. Research progress of soil moisture and its measurement method [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2014, 42(10): 335 – 339. (in Chinese)
- [10] 丁晋利, 武继承, 杨永辉, 等. 耕作方式转变对土壤蓄水保墒影响的 RZWQM 模型模拟[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(4): 136 – 143.
DING Jinli, WU Jicheng, YANG Yonghui, et al. Simulation of effects of tillage pattern transformation on soil water conservation with RZWQM model[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(4): 136 – 143. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160419&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.04.019. (in Chinese)
- [11] QIU Y, FU B, WANG J, et al. Spatial prediction of soil moisture content using multiple-linear regressions in a gully catchment of the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Arid Environments*, 2010, 74(2): 208 – 220.
- [12] 路璐, 王振龙, 杜富慧, 等. 淮北平原基于 ARIMA 模型的冬小麦日土壤水分预测[J]. *节水灌溉*, 2019(6): 67 – 76.
LU Lu, WANG Zhenlong, DU Fuhui, et al. Prediction of daily soil moisture of winter wheat based on ARIMA model in Huaibei Plain[J]. *Water Saving Irrigation*, 2019(6): 67 – 76. (in Chinese)
- [13] CHAI J, KHAIMOOK P. Prediction of soil-water characteristic curves using basic soil properties [J]. *Transportation Geotechnics*, 2020, 22: 1 – 11.
- [14] MKHABELA M S, BULLOCK P R. Performance of the FAO Aqua Crop model for wheat grain yield and soil moisture simulation in western Canada[J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 110(7): 16 – 24.
- [15] 罗党, 王浚婷. 灰色神经网络下的多变量土壤含水率预测模型[J]. *华北水利水电大学学报*, 2017, 38(5): 70 – 75.
LUO Dang, WANG Kuaiting. Prediction model of multivariate soil water content constructed by the grey model combined with neural network and three-parameter interval grey number [J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power*, 2017, 38(5): 70 – 75. (in Chinese)
- [16] ZOU P, YANG J S, FU J R, et al. Artificial neural network and time series models for predicting soil salt and water content [J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(12): 2009 – 2019.
- [17] LANGK V M, KARLSSON L, LOUTFI A, et al. A review of unsupervised feature learning and deep learning for time-series modeling[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2014, 42(1): 11 – 24.
- [18] LECUN Y, BENGIO Y, HINTON G. Deep learning[J]. *Nature*, 2015, 521(7553): 436 – 444.
- [19] 范竣翔, 李琦, 朱亚杰. 基于 RNN 的空气污染时空预报模型研究[J]. *测绘科学*, 2017, 42(7): 76 – 83.
FAN Junxiang, LI Qi, ZHU Yajie. Aspatio-temporal prediction framework for air pollution based on deep RNN[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2017, 42(7): 76 – 83. (in Chinese)
- [20] 王鑫, 吴际, 刘超, 等. 基于 LSTM 循环神经网络的故障时间序列预测[J]. *北京航空航天大学学报*, 2018, 44(4): 772 – 782.
WANG Xin, WU Ji, LIU Chao, et al. Exploring LSTM based recurrent neural network for failure time series prediction [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2018, 44(4): 772 – 782. (in Chinese)
- [21] GREFF K, SRIVASTAVA R K, KOUTNIK J, et al. LSTM: a search space odyssey [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks & Learning Systems*, 2016, 99: 1 – 11.
- [22] 王旭东, 严珂, 陆慧娟, 等. LSTM 的单变量短期家庭电力需求预测[J]. *中国计量大学学报*, 2018, 29(2): 142 – 147.
WANG Xudong, YAN Ke, LU Huijuan, et al. Short-term household electricity demand forecast based on LSTM single variable [J]. *Journal of China University of Metrology*, 2018, 29(2): 142 – 147. (in Chinese)
- [23] 王国玉, 池宝亮, 李娜娜, 等. 晋南旱塬地农田土壤水分动态及预测模拟[J]. *山西农业科学*, 2014, 42(10): 1106 – 1110.
WANG Guoyu, CHI Baoliang, LI Nana, et al. Study on dynamics of soil moisture in dryland of the south of Shanxi Province and its simulation model[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2014, 42(10): 1106 – 1110. (in Chinese)
- [24] 郭庆春, 王素娟, 何振芳. 基于 BP 人工神经网络的土壤含水率预测模型的研究[J]. *山东农业科学*, 2012, 44(12): 11 – 15.
GUO Qingchun, WANG Sujuan, HE Zhenfang. Study on forecasting model of soil water content based on BP artificial neural

- network[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2012, 44(12): 11–15. (in Chinese)
- [25] 李小涵, 王朝辉, 郝明德, 等. 黄土高原旱地种植体系对土壤水分及有机氮和矿质氮的影响[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(9): 2686–2692.
LI Xiaohan, WANG Zhaohui, HAO Mingde, et al. Effects of cropping systems on soil water, organic N and mineral N in dryland soil on the Loess Plateau[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(9): 2686–2692. (in Chinese)
- [26] 郭清毅, 黄高宝, GUANGDI Li, 等. 保护性耕作对旱地麦-豆双序列轮作农田土壤水分及利用效率的影响[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(3): 165–169.
GUO Qingyi, HUANG Gaobao, GUANGDI Li, et al. Conservation tillage effects on soil moisture and water use efficiency of two phases rotation system with spring wheat and field pea in dryland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(3): 165–169. (in Chinese)
- [27] 刘继龙, 李佳文, 周延, 等. 秸秆覆盖与耕作方式对土壤水分特性的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(7): 333–339.
LIU Jilong, LI Jiawen, ZHOU Yan, et al. Effects of straw mulching and tillage on soil water characteristics [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(7): 333–339. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190736&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.036. (in Chinese)
- [28] 刘继龙, 任高奇, 付强, 等. 秸秆还田下土壤水分时间稳定性与玉米穗质量的相关性[J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(5): 320–326.
LI Jilong, REN Gaoqi, FU Qiang, et al. Relationship between temporal stability of soil water and corn ear weight under straw returning [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(5): 320–326. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190536&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.036. (in Chinese)
- [29] 李月兴, 魏永华, 魏永霞. 保护性耕作对土壤水分和玉米产量的影响[J]. *中国农村水利水电*, 2010(10): 25–28.
LI Yuexing, WEI Yonghua, WEI Yongxia. Effect of conservation tillage on soil moisture and corn yield[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2010(10): 25–28. (in Chinese)
- [30] 李玲玲, 秦舒浩. 陇中半干旱区集雨补灌小麦玉米复合群体产量及水分效应[J]. *干旱地区农业研究*, 2005, 23(6): 38–41.
LI Lingling, QING Shuhao. Yield and water use efficiency of wheat/corn compound colony under supplementary irrigation with catching rainfall[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, 23(6): 38–41. (in Chinese)
- [31] 冯福学, 黄高宝, 于爱忠. 不同保护性耕作措施对武威绿洲灌区冬小麦水分利用的影响[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(5): 1060–1065.
FENG Fuxue, HUANG Gaobao, YU Aizhong. Effects of different conservation tillage measures on winter wheat water use in Wuwei oasis irrigated area[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(5): 1060–1065. (in Chinese)
- [32] 晋小军, 黄高宝. 陇中半干旱地区不同耕作措施对土壤水分及利用效率的影响[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(5): 109–112.
JIN Xiaojun, HUANG Gaobao. Effects of different tillage methods on soil water and water use efficiency in semi-arid area of Gansu[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(5): 109–112. (in Chinese)
- [33] 王克鹏, 张仁陟, 董博. 长期保护性耕作对黄土高原旱地土壤水分及作物叶水势的影响[J]. *生态学报*, 2014, 34(13): 3752–3761.
WANG Kepeng, ZHANG Renzhi, DONG Bo. Effect of long-term conservation tillage on soil water regimes and leaf water potential of crops in rainfed areas of the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(13): 3752–3761. (in Chinese)
- [34] 刘爽, 张兴义. 保护性耕作下黑土水热动态研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2010, 28(6): 15–22.
LIU Shuang, ZHANG Xingyi. Effects of different tillage managements on soil physical properties in dryland[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(6): 15–22. (in Chinese)
- [35] 余海英, 彭文英, 马秀, 等. 免耕对北方旱作玉米土壤水分及物理性质的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(1): 99–104.
YU Haiying, PENG Wenyong, MA Xiu, et al. Effects of no-tillage on soil water content and physical properties of spring corn fields in semi-arid region of Northern China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(1): 99–104. (in Chinese)
- [36] 吕美蓉, 李增嘉, 张涛, 等. 少免耕与秸秆还田对极端土壤水分及冬小麦产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(1): 41–46.
LÜ Meirong, LI Zengjia, ZHANG Tao, et al. Effects of minimum or no-tillage system and straw returning on extreme soil moisture and yield of winter wheat[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(1): 41–46. (in Chinese)
- [37] 丁晋利, 魏红义, 杨永辉, 等. 保护性耕作对农田土壤水分和冬小麦产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(8): 2501–2508.
DING Jinli, WEI Hongyi, YANG Yonghui, et al. Effects of conservation tillage on soil water condition and winter wheat yield in farmland [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(8): 2501–2508. (in Chinese)
- [38] 贺立恒, 高志强, 孙敏, 等. 旱地小麦休闲期不同耕作措施对土壤水分蓄纳利用与产量形成的影响[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(15): 106–111.
HE Liheng, GAO Zhiqiang, SUN Min, et al. Effect of ploughing in leisure period on yield and soil water use efficiency of winter wheat in dryland[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(15): 106–111. (in Chinese)
- [39] 陈四龙, 陈素英, 孙宏勇. 耕作方式对冬小麦棵间蒸发及水分利用效率的影响[J]. *土壤通报*, 2006, 37(4): 817–820.
CHEN Silong, CHEN Suying, SUN Hongyong. Effect of different tillages on soil evaporation and water use efficiency of winter wheat in the field[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(4): 817–820. (in Chinese)
- [40] 李玲玲, 黄高宝, 张仁陟, 等. 不同保护性耕作措施对旱作农田土壤水分的影响[J]. *生态学报*, 2005, 25(9): 2326–2332.
LI Lingling, HUANG Gaobao, ZHANG Renzhi, et al. Effects of conservation tillage on soil water regimes in rainfed areas[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(9): 2326–2332. (in Chinese)