中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

基于LSTM神经网络模拟的陇中黄土高原 沟壑区保护性耕作下土壤贮水量变化

王钧, 李广, 刘强

引用本文:
王钧, 李广, 刘强. 基于LSTM神经网络模拟的陇中黄土高原 沟壑区保护性耕作下土壤贮水量变化[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(8): 1226−1237.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180949

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同耕作措施下旱作农田土壤团聚体中有机碳和全氮分布特征

Distribution characteristics of organic carbon and total nitrogen in dry farmland soil aggregates under different tillage methods in the Loess Plateau of central Gansu Province

中国生态农业学报. 2015(3): 276−284 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.140863

耕作方法对黄土高原旱作玉米产量和土壤水温特性的影响

Effect of different tillage practice on rain−fed maize yield and soil water/temperature characteristics in the Loess Plateau

中国生态农业学报. 2015(11): 1384−1393 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.150021

不同耕作措施对旱作农田土壤水稳性团聚体稳定性的影响

Effect of tillage practices on soil water−stable aggregate stability in dry farmlands in the Loess Plateau, Central Gansu Province

中国生态农业学报. 2018, 26(3): 329−337 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.171094

黄土高原旱地麦田26年免耕覆盖对土壤肥力及原核微生物群落多样性的影响

Effect of long−term no−tillage with stubble on soil fertility and diversity of prokaryotic microbiome in dryland wheat soils on the Loess Plateau, China

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(3): 358−368 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180604

耕作措施对旱作农田土壤颗粒态有机碳的影响

Distribution of soil particulate organic carbon fractions as affected by tillage practices in dry farmland of the Loess Plateau of central Gansu Province

中国生态农业学报. 2018, 26(5): 728−736 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180076

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.180949

王钧, 李广, 刘强. 基于 LSTM 神经网络模拟的陇中黄土高原沟壑区保护性耕作下土壤贮水量变化[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(8): 1226−1237
WANG J, LI G, LIU Q. Soil water storage under conservation tillage based on LSTM neural network simulation in the Loess Plateau Gully Region of central Gansu[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(8): 1226−1237

基于 LSTM 神经网络模拟的陇中黄土高原沟壑区保护性耕作下土壤贮水量变化*

王 钧[1,2], 李 广[1**], 刘 强[2]

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

摘 要: 为分析陇中黄土高原沟壑区不同保护性耕作措施的贮水效果, 本研究利用春小麦/豌豆(W/P)、豌豆/春小麦(P/W)轮作的长期定位试验, 分别设置传统耕作(T)、免耕(NT)、传统耕作秸秆覆盖(TS)和免耕覆盖(NTS)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、月作物耗水量为输入因子, 以月土壤贮水量为输出, 建立基于长短期记忆(Long Short-Term Memory, LSTM)神经网络的土壤贮水量预测模型, 并对该模型的有效性进行评估。研究结果表明: 1)基于 LSTM 神经网络建立的土壤贮水量模型对陇中黄土高原沟壑区保护性耕作下土壤贮水量预测具有较好的适用性, 模型模拟结果的平均均方根误差为 7.76 mm, 平均绝对误差为 6.95 mm, 相对误差控制在−5%~+5%的范围内。2)P/W 轮作序列中各处理的土壤贮水量均比 W/P 轮作序列增加 1.09%~1.43%。3)不同轮作序列, NTS 处理的贮水效果均优于其他 3 种耕作措施, 在 W/P 轮作序列中, NTS 处理的年均土壤贮水量比 T、NT 和 TS 分别增加 2.89%、1.70%和 2.46%; 在 P/W 轮作序列中, NTS 处理的年均土壤贮水量比 T、NT 和 TS 分别增加 3.03%、1.91%和 2.57%。4)不同降水年型, NTS 处理的土壤贮水量最高, 且干旱年效果更加显著, 其中丰水年 NTS 处理的土壤贮水量比 T、NT 和 TS 平均增加 2.71%、1.48%和 2.19%, 而干旱年平均增加 3.97%、2.54%和 3.64%。5)保护性耕作措施的贮水效果随季节发生变化, 作物生长前期(3—5 月)保护性耕作措施的贮水优势较为明显, 进入作物生长旺盛期(5—6 月)保护性耕作措施与传统耕作的贮水效果差异不显著, 而作物生长后期(7 月)保护性耕作措施较传统耕作土壤贮水量明显增加。基于 LSTM 神经网络模拟环境下免耕覆盖的贮水保墒效果最好, 为陇中黄土高原沟壑区最适宜的保护性耕作措施。

关键词: 保护性耕作; 春小麦/豌豆轮作; 土壤贮水量; LSTM 神经网络; 预测模型; 陇中黄土高原沟壑区

中图分类号: S157.4+2

文章编号: 2096-6237(2019)08-1226-12 开放科学码(资源服务)标识码(OSID):

Soil water storage under conservation tillage based on LSTM neural network simulation in the Loess Plateau Gully Region of central Gansu*

WANG Jun[1,2], LI Guang[1**], LIU Qiang[2]

(1. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. College of Information Science and Technology,

* 甘肃农业大学学科建设基金(GAU-XKJS2018258, GAU-XKJS2018254, GAU-XKJS2018255)、国家自然科学基金项目(31560343, 31560378)和甘肃农业大学青年导师基金项目(GAU-QNDS-201702)资助

** **通信作者**: 李广, 主要研究方向为水土保持与荒漠化研究。E-mail: lig@gsau.edu.cn
王钧, 研究方向为水土保持与荒漠化防治。E-mail: julianwong82@163.com

收稿日期: 2018-10-26 **接受日期**: 2019-03-25

* This study was supported by the Subject Construction Fund of Gansu Agricultural University (GAU-XKJS2018258, GAU-XKJS2018254, GAU-XKJS2018255), the National Natural Science Foundation of China (31560343, 31560378) and the Youth Tutor Fund Project of Gansu Agricultural University (GAU-QNDS-201702).

** Corresponding author, E-mail: lig@gsau.edu.cn

Received Oct. 26, 2018; accepted Mar. 25, 2019

Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to analyze the effects of soil water storage for four different tillage measures [traditional tillage (T), no-tillage with no straw cover (NT), traditional tillage with straw incorporation (TS) and no-tillage with straw cover (NTS)], the field research was conducted in the Loess Plateau Gully Region of central Gansu. The objectives of the study were to establish a prediction model for soil water storage based on Long Short-Term Memory (LSTM), and to evaluate the model's effectiveness using the long-term positioning experiment of the rotation sequence for spring wheat/pea (W/P) and pea/spring wheat (P/W) crops. In the experiment, monthly average temperature, monthly precipitation, monthly average radiation, monthly average evaporation and monthly crop water consumption constituted input factors, and value for soil water storage constituted the output factor in the prediction model. The results of the present study showed that: 1) The water storage model based on LSTM neural network showed good applicability for predicting soil water storage, particularly in conservation tillage practice, in the Loess Plateau Gully Region of central Gansu. The average root mean square error and mean absolute error of the model simulation were 7.76 mm and 6.95 mm, respectively; moreover, the relative error was controlled between −5% and +5%. 2) In P/W rotation sequence, the soil water storage of various treatments increased by 1.09%−1.43% as compared to W/P. 3) Within different rotation sequences, water storage effect of NTS treatment turned out to be better than those for other three tillage measures. In W/P rotation sequence, the annual average soil water storage of NTS treatment was 2.89%, 1.70% and 2.46% higher than that of T, NT, and TS, respectively. In P/W rotation sequence, the average annual soil water storage of NTS treatment increased by 3.03%, 1.91% and 2.57%, respectively, compared to that of T, NT, and TS. 4) In the years with different precipitation, the soil water storage of NTS treatment was the highest, and this effect was markedly more significant in the dry year. The soil water storage of NTS treatment increased by 2.71%, 1.48% and 2.19%, on average, in the wet year, and it increased by 3.97%, 2.54% and 3.64%, on average, in the dry year as compared to the values recorded for T, NT and TS. 5) The water storage effect for conservation tillage measures varied with the season. There was obvious water storage advantage of conservation tillage measures during the early stages of crop growth (March–May). However, there was not significant between the results of conservation tillage measures and traditional tillage during the full growth stage (May–June). Nevertheless, the soil water storages for conservation tillage increased significantly during the late stage of crop growth (July). Going by the effect on soil water storage based on LSTM neural network, no-tillage mulching remains the best practice as well as the most suitable measure of protective tillage in the Loess Plateau Gully Region of central Gansu.

Keywords: Conservation tillage; Spring wheat/pea rotation; Soil water storage; LSTM neural network; Prediction model; Loess Plateau Gully Region of central Gansu

陇中黄土高原沟壑区土壤水资源十分匮乏，土壤水分作为作物根系生长的重要影响因素，是作物生长发育、产量形成的决定性因素[1]。土壤贮水作为作物耗水的重要来源之一，在作物生长发育过程中起到非常重要的作用[2-5]。保护性耕作作为节水增效的重要措施，可以有效增加土壤的贮水保墒能力，提高作物产量和水分利用效率[6-7]。大量研究结果表明，保护性耕作措施可以增加土壤有机质，改善土壤结构，提高土壤饱和导水率，在降低作物生育期间棵间蒸发和雨后土壤蒸发等方面效果明显[8-9]。彭正凯等[10]研究了不同耕作措施对陇中旱作农田土壤水分入渗、蒸发和蒸腾的影响。殷文等[11]研究了不同耕作措施条件下农田土壤的水分利用特征。但由于陇中黄土高原沟壑区降水量年际波动大，不同保护性耕作间的贮水效果差异明显，且受大田试验周期长、难度大的影响，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保护性耕作措施的贮水保墒效应缺乏深入系统研究。而预测模型则为陇中黄土高原沟壑区土壤水分动态变化规律的研究提供了一种新的研究方法。目前，土壤贮水保墒预测模型主要有多元回归模型、土壤水动力模型以及作物模型等。Qiu 等[12]利用土地和地形指数建立多元线性回归模型，实现了黄土高原沟壑区土壤水分的预测。尹笑笑等[13]通过表层土壤含水量与深层土壤贮水量的数量关系建立了土壤贮水量预测模型。周良臣[14]利用土壤水动力学模型预测了麦田土壤水分的动态变化情况。李广等[15]对 APSIM 模型模拟黄土丘陵沟壑区不同耕作措施的土壤贮水量变化情况进行了适应性研究。丁晋利等[16]利用 RZWQM 模型研究了耕作方式转变对土壤分层水分的影响。赵引等[17]利用 AquaCrop 模型模拟了西北旱区覆膜和灌水处理下玉米(*Zea mays* L.)地土壤水分的变化情况。不同预测模型有其各自特点，预测结果也存在一定的差异，而模型参数和边界条件是影响上述土壤水分预测模型精度的主要因素，模

型参数和边界条件设置的不合理, 将严重影响模型的预测结果, 使其在实际使用过程中受到一定的制约。

近几年, 随着深度学习技术的不断成熟, 一些国内外研究学者将基于深度学习的 BP、RBF 神经网络应用于土壤贮水量预测[18-19], 然而该方法存在长期记忆能力不足的问题, 只能实现土壤贮水量的短期预测。长短期记忆(Long Short-Term Memory, 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距离时间相关数据的有效地利用[20-21]。

本研究基于 LSTM 神经网络模型分析陇中黄土高原沟壑区不同保护性耕作措施的土壤贮水量变化特征, 旨在探明不同轮作体系、不同降水年型和不同种植作物条件下不同保护性耕作措施的贮水保墒效果, 为陇中黄土高原沟壑区节水农业发展提供有效的科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于甘肃省定西市安定区李家堡镇, 属于典型黄土高原丘陵沟壑地区, 平均海拔 2 000 m, 多年平均降雨量 395 mm, 年均蒸发量 1 540 mm, 年平均气温 6.5 ℃, 为典型半干旱雨养农业区。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、全磷以及有机质含量分别为 0.76 g·kg^{-1}、1.77 g·kg^{-1}、12.01 g·kg^{-1}, 土壤容重如表 1 所示。

表 1 试验田 **0~200 cm** 土层土壤容重

Table 1 Soil bulk density in 0–200 cm soil layers of the experimental field

土层 Soil layer (cm)	0~5	5~10	10~30	30~50	50~80	80~110	110~140	140~170	170~200
容重 Soil bulk density (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

试验始于 2002 年。采用春小麦(*Triticum aestivum* L., W)、豌豆(*Pisum sativum* L., P)双序列轮作(W/P、P/W), 共设 4 个耕作处理: 传统耕作(T)、免耕(NT)、传统耕作秸秆覆盖(TS)和免耕覆盖(NTS), 每个处理重复 4 次。

传统耕作(T): 在 8 月前茬作物收获后, 将秸秆移出, 并进行第 1 次耕深为 20 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 次耕作后对试验地耱 1 次, 10 月冻结前再耱 1 次。

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)覆盖于原试验小区。

传统耕作秸秆覆盖(TS): 同处理 T, 但在第 1 次耕作后将前茬秸秆翻埋入土中。

免耕不覆盖(NT): 同处理 NTS, 但秸秆移出不覆盖。

1.3 供试材料

试验采用随机区组排列, 试验地小区面积为 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 kg·hm^{-2} 和 180 kg·hm^{-2}。肥料作为基肥在播种时施入, 其中春小麦 4 个处理各施纯 N 105 kg·hm^{-2}, P_2O_5 105 kg·hm^{-2}; 豌豆 4 个处理各施纯 N 20 kg·hm^{-2}, P_2O_5 105 kg·hm^{-2}。

1.4 测定项目和分析方法

1.4.1 气候资料观测

气象站设置在距试验地西北 2 km 处, 使用澳大利亚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、最高气温和最低气温)。本研究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, 其他气象数据为日平均值, 即当月该气象数据之和/当月天数。

1.4.2 土壤属性测定及方法

试验期间每年 1—12 月每隔 15 d 对各处理 0~200 cm 土层土壤含水量进行观测。其中, 0~5 cm、5~10 cm 土层土样用土钻在小区内随机取样 3 次, 并将各小区同一土层的 3 个土样混合均匀后装入铝盒称重, 然后, 使用烘干法将土样放置于 110 ℃的烘箱内烘干至恒重, 土壤质量含水量(%)=[(湿重−干重)/干重×100%]; 10~30 cm、30~50 cm、50~80 cm、80~110 cm、110~140 cm、140~170 cm 和 170~200 cm 土层的土壤体积含水量用中子仪沿小区对角线方向均匀测量 3 次, 并将 3 次测量的土壤体积含水量的平均值转换为土壤质量含水量, 土壤质量含水量(%)=(水容重/土壤容重)×土壤体积含水量(其中水容重为 1.0 g·cm^{-3})。本研究将每月测得的两次土壤质量含水量的平均值作为当月土壤质量含水量。

1.4.3 土壤贮水量计算

$$W_i = 10 \times \mathrm{BD}_i \times H_i \times V_i \quad (1)$$

$$W_{\text{ave}} = \sum_{i=1}^{9} W_i \times H_i / \sum_{i=1}^{9} H_i \quad (2)$$

式中: W_i 为各土层土壤贮水量, W_{ave} 为多土层土壤平均贮水量, BD_i 为各土层土壤容重, V_i 为各土层土壤质量含水量, H_i 为各土层厚度。

1.4.4　作物耗水量计算

$$\text{ET} = P + I + \Delta S - R - D \quad (3)$$

式中: ET 为作物月耗水量, P 为月降水量, I 为月灌溉量, R 为月地表径流, D 为月土壤水渗透量, ΔS 为相邻两个月土壤贮水量之差。试验地所处环境条件下, I=0, 而 R 和 D 可忽略不计。因此, 作物月耗水量的实际计算公式为:

$$\text{ET} = P + \Delta S \quad (4)$$

1.5　基于 LSTM 神经网络的土壤贮水量模型

LSTM 神经网络是一种特殊的循环神经网络(Recurrent Neural Network, RNN), 可以学习长距离时间序列数据。基于 LSTM 神经网络的土壤贮水量模型由输入层、隐藏层和输出层组成, 其结构如图 1 所示。输入层利用公式 $x'=(x-\min)/(\max-\min)$分别对月平均气温、月降水量、月平均辐射量、月平均蒸发量、月作物耗水量进行“归一化”处理, 并按 7∶3 的比例将实测数据划分为训练集和测试集, 处理完的数据将被传送到由 LSTM 细胞单元组成的隐藏层。隐藏层主要负责完成土壤贮水量的计算, 并将计算结果传输到输出层。输出层对隐藏层产生的数据进行“去归一化”处理后得到最终的土壤贮水量预测结果。

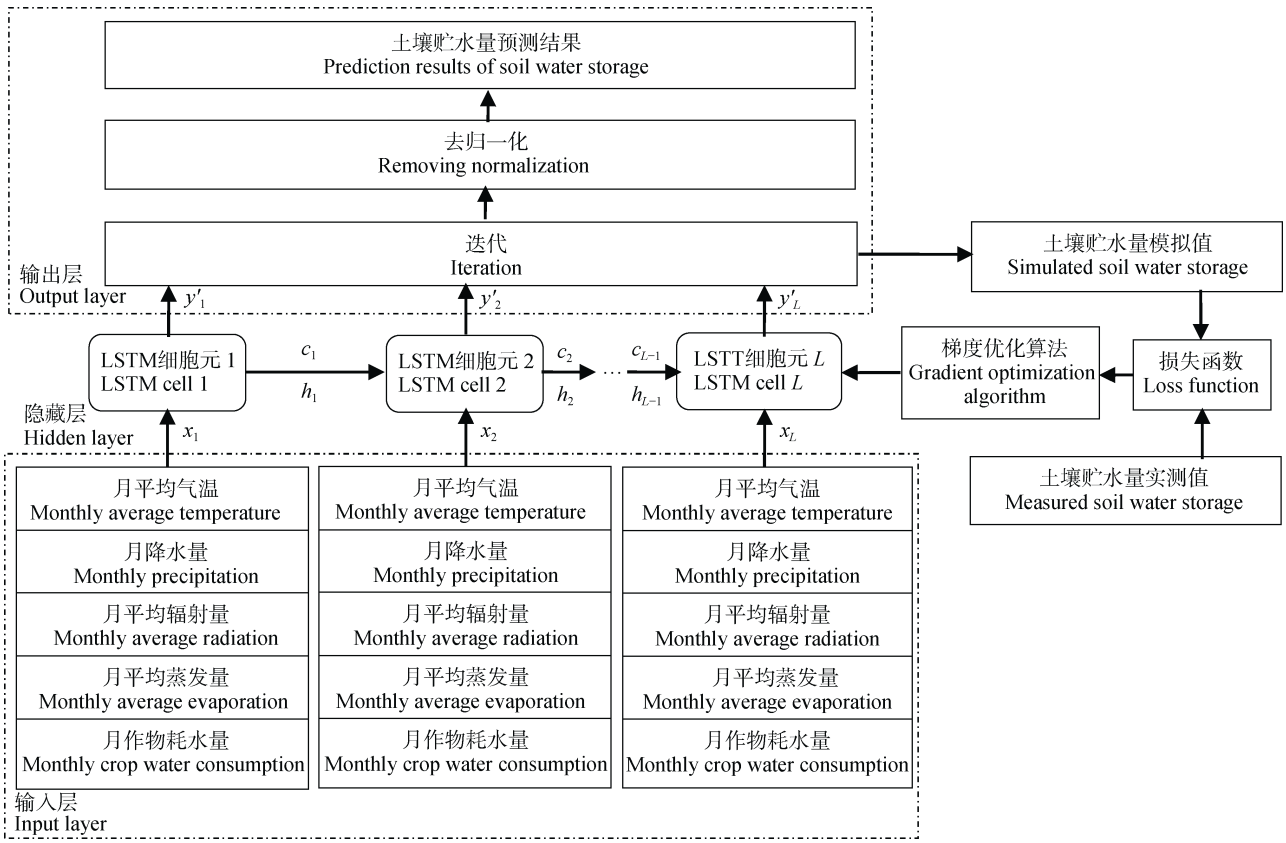

图 1　基于 LSTM 神经网络的土壤贮水量模型示意图

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

隐藏层是整个 LSTM 神经网络的核心, 由多个细胞单元构成, 细胞单元的结构如图 2 所示。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 神经网络具有长期记忆信息的能力[15]。根据 LSTM 神经网络细胞单元的结构, 得到输入门、输出门和遗忘门的表达式如下:

$$i_t = \sigma(w_i \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_i) \quad (5)$$

$$f_t = \sigma(w_f \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_f) \quad (6)$$

$$\tilde{c}_t = \tanh(w_c \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_c) \quad (7)$$

$$c_t = f_t \cdot c_{t-1} + i_t \cdot \tilde{c}_t \quad (8)$$

$$o_t = \sigma(w_o \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_o) \quad (9)$$

$$h_t = o_t \cdot \tanh(c_t) \quad (10)$$

式中: i_t 为输入门, h_{t-1} 为上一细胞单元的输出值, h_t 为本细胞单元的输出值, x_t 为本细胞单元的输入值, b_i 为输入门偏置, b_f 为遗忘门偏置, b_c 为本输入单元偏置, b_o 为输出门偏置, f_t 为遗忘门, o_t 为输出门, w_i

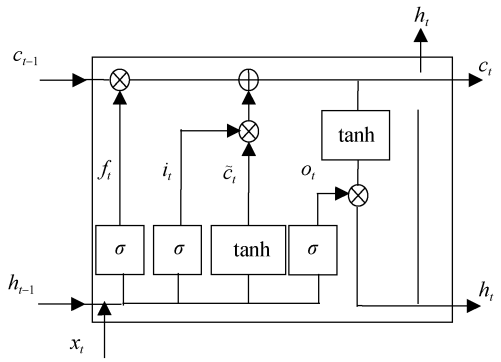

图 2 **LSTM** 神经网络细胞结构图
Fig. 2 Cell structure of LSTM neural network

为输入门权重矩阵, w_f为遗忘门权重矩阵, w_c为本输入单元权重矩阵, w_o为输出门权重矩阵, c_{t-1}为上一细胞单元结构状态, c_t为本细胞单元结构状态, $\tilde{c}_t$为要加入 LSTM 神经网络的细胞结构状态, σ 代表 sigmoid 函数, tanh 代表双曲正切激活函数[22]。

基于 LSTM 神经网络的土壤贮水量模型的具体预测过程为:

1)利用正交初始化完成隐藏层网络权值 w_f的初始化。

2)将输入层归一化后的训练序列 x_t 输入到隐藏层, 其中 $1 \le t \le L$。

3)隐藏层各个细胞单元根据上一细胞单元的细胞状态 c_{t-1}, 输出值 h_{t-1}, 以及本细胞的输入值 x_t, 按照公式(1)-(6)计算出本细胞单元的细胞状态 c_t 和输出值 h_t, 并将贮水量模拟结果 y_t'输出到输出层。

4)在时间和网络层两个反向传播方向上, 利用损失函数 $\text{Loss} = \sum_{i=1}^{L}(y_i' - y_i)^2 / L$ 计算贮水量模拟值 y_t'与实测值 y_t的反向误差大小。

5)求出反向误差对相应权重 w_f的梯度。

6)基于梯度优化算法反复迭代, 不断对权重 w_f 进行更新, 降低损失函数误差, 直到 LSTM 神经网络模型收敛, 网络训练结束。

7)利用实测数据验证 LSTM 神经网络模型的适应性。

8)将月平均气温、月降水量、月平均辐射量、月平均蒸发量、月作物耗水量输入到通过验证的 LSTM 神经网络模型, 完成土壤贮水量的预测。

1.6 数据处理

本研究利用 Matlab R2018a 作为 LSTM 神经网络模型的实验仿真环境, 将试验地 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 5 个因子作为输入 x_t, 将传统耕作(T)、免耕(NT)、传统耕作秸秆覆盖(TS)和免耕覆盖(NTS)条件下土壤贮水量的实测数据作为输出 y_t, 训练 LSTM 神经网络模型, 利用 2012—2013 年 1—12 月的试验数据对训练完毕的土壤贮水量模型进行适应性验证。该模型以损失函数 mse 达到最小为优化目标, 在设定网络初始学习率(η)、批尺寸(batch size)以及最大迭代次数(step)的条件下, 利用 Adadelta 下降优化算法经反复迭代更新网络权重系数矩阵, 从而降低损失函数 Loss 的值, 最终完成 LSTM 神经网络模型的建立, LSTM 神经网络模型参数如表 2 所示。

表 2 基于 **LSTM** 神经网络的土壤贮水量模型参数
Table 2 Parameters of LSTM neural network model for soil water storage

参数 Parameter	值 Value
隐藏层数 Hidden layer	20
最大迭代次数 Maximum iterations	50
批尺寸 Batch size	5
损失函数 Loss function	mse
下降方式 Descent method	Adadelta optimization algorithm
学习速率 Learning rate	0.001

2 结果与分析

2.1 LSTM 神经网络模型适应性分析

利用 LSTM 神经网络模型对 2012—2013 年 1—12 月 0~200 cm 土层土壤贮水量进行模拟, 为了验证模拟效果, 运用相关分析法对模拟值与实测值进行统计分析, 结果表明 LSTM 神经网络模型的模拟值与实测值呈正相关, 且相关系数大于 0.98, 平均均方根误差(RMSE)为 7.76 mm, 平均绝对误差(MAE)为 6.95 mm, 表明LSTM神经网络模型对陇中黄土高原沟壑区 W/P 和 P/W 轮作序列不同保护性耕作措施的土壤贮水量有较高的模拟性(表 3)。LSTM 神经网络模型的模拟值和实测值分布在 1∶1 实线左右(图 3), 具有很好的一致性, 相对误差被控制在–5%~+5%的范围内, 表明 LSTM 神经网络模型对土壤贮水量的模拟具有较高的精度。

2.2 基于 LSTM 神经网络模型模拟的土壤贮水量动态分异规律分析

2.2.1 土壤贮水量的年际变化

2002—2017 年土壤贮水量的年际变化如图 4 所示。不同轮作体系下, 4 种耕作措施的土壤贮水量与降水量存在较强的相关性, 在 W/P 轮作序列中, T、NT、TS 和 NTS 处理的土壤贮水量与降水量的相关性分别为 0.599、0.580、0.593 和 0.577; 在 P/W 轮作序列中, T、NT、TS 和 NTS 处理的土壤贮水量与

表 3　不同春小麦(W)/豌豆(P)轮作序列不同耕作措施下土壤贮水量 LSTM 神经网络模型模拟值与实测值的统计指标
Table 3　Statistical indices of LSTM neural network simulated and observed values of soil water storage under different tillage measures and different sequences of spring wheat (W) and pea (P) rotation

序列 Sequence	处理 Treatment	模拟平均值 Simulated average (mm)	实测平均值 Measured average (mm)	相关系数 Correlation coefficient	均方根误差 Root mean square error (mm)	平均绝对误差 Mean absolute error (mm)
W/P	T	322.90	322.17	0.99	7.02	6.02
	NT	327.57	326.85	0.99	7.26	6.23
	TS	324.59	323.15	0.99	7.19	6.16
	NTS	332.01	330.79	0.99	7.52	6.76
P/W	T	326.40	325.95	0.99	8.09	7.33
	NT	329.60	328.81	0.99	8.24	7.68
	TS	327.63	326.28	0.99	8.22	7.67
	NTS	334.77	333.40	0.99	8.56	7.78

T: 传统耕作; NT: 免耕; TS: 传统耕作秸秆覆盖; NTS: 免耕秸秆覆盖。T: traditional tillage; NT: no-tillage with no straw cover; TS: traditional tillage with straw incorporation; NTS: no-tillage with straw cover.

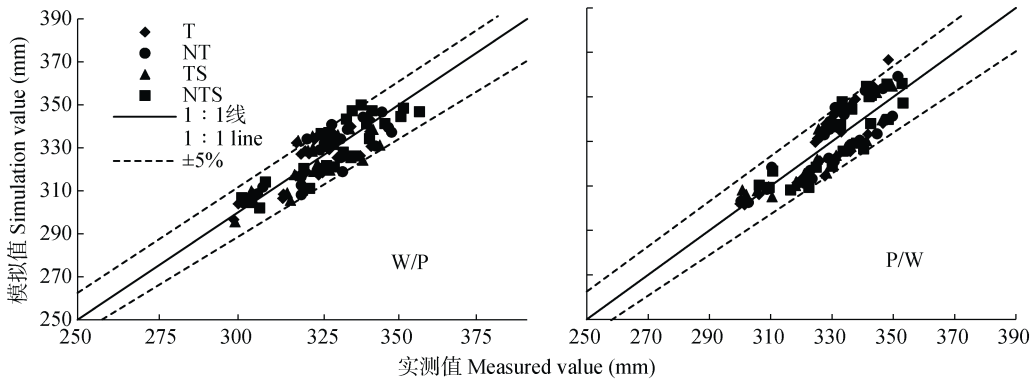

图 3　不同春小麦(W)/豌豆(P)轮作序列不同耕作措施的土壤贮水量模拟值与观测值相关分析
Fig. 3　Correlation analysis of LSTM neural network simulated and observed values of soil water storage under different tillage measures and different sequences of spring wheat (W) and pea (P) rotation

T: 传统耕作; NT: 免耕; TS: 传统耕作秸秆覆盖; NTS: 免耕秸秆覆盖。T: traditional tillage; NT: no-tillage with no straw cover; TS: traditional tillage with straw incorporation; NTS: no-tillage with straw cover.

降水量的相关性分别为 0.604、0.588、0.594 和 0.579。相关性分析表明, 不同轮作体系下, 降水对 4 种耕作措施的土壤贮水量年际变化影响较大。

W/P 轮作序列中, NTS 处理的年均土壤贮水量比 T、NT 和 TS 处理分别增加 2.89%、1.70%和 2.46%, 差异显著(P<0.05); P/W 轮作序列中, NTS 处理的年均土壤贮水量比 T、NT 和 TS 处理分别增加 3.03%、1.91%和 2.57%, 差异显著(P<0.05)。

P/W 轮作序列中 4 种耕作措施的土壤贮水量均高于 W/P 轮作序列中相应耕作措施的土壤贮水量, 与 W/P 轮作序列中 T、NT、TS 和 NTS 处理相比, P/W 轮作序列中 4 种耕作措施的土壤贮水量分别增加 1.19%、1.09%、1.16%和 1.43%。

2.2.2　土壤贮水量的季节变化规律

2002—2017 年 1—12 月的月平均土壤贮水量变化趋势如图 5 所示。不同轮作体系下, 4 种耕作措施的土壤贮水量变化趋势基本保持一致, 1—12 月的月平均土壤贮水量在 285~360 mm 的范围内变化, 其中最低值出现在 6—7 月, 最高值出现在 10 月。土壤贮水量的年内变化可以划分为 3 个阶段:

1)土壤水分缓慢消耗阶段(1—5 月): 该阶段的平均降水量为 57.75 mm。W/P 轮作序列中, NTS 处理的土壤贮水量比 T、NT 和 TS 处理分别增加 3.04%、1.86%和 2.64%, 差异性显著(P<0.05), T、NT、TS 和 NTS 处理的土壤贮水量变化率分别为–0.80%、–0.71%、–0.76%和–0.60%; P/W 轮作序列中, NTS 处理的土壤贮水量比 T、NT 和 TS 处理分别增加 3.27%、2.16%和 2.82%, 差异性显著(P<0.05), T、NT、TS 和 NTS 处理的土壤贮水量变化率分别为–0.84%、–0.73%、–0.81%和–0.63%。

2)土壤水分大量损耗阶段(5—6 月): 该阶段的平均降水量为 105.78 mm。W/P 轮作序列中, NTS 处

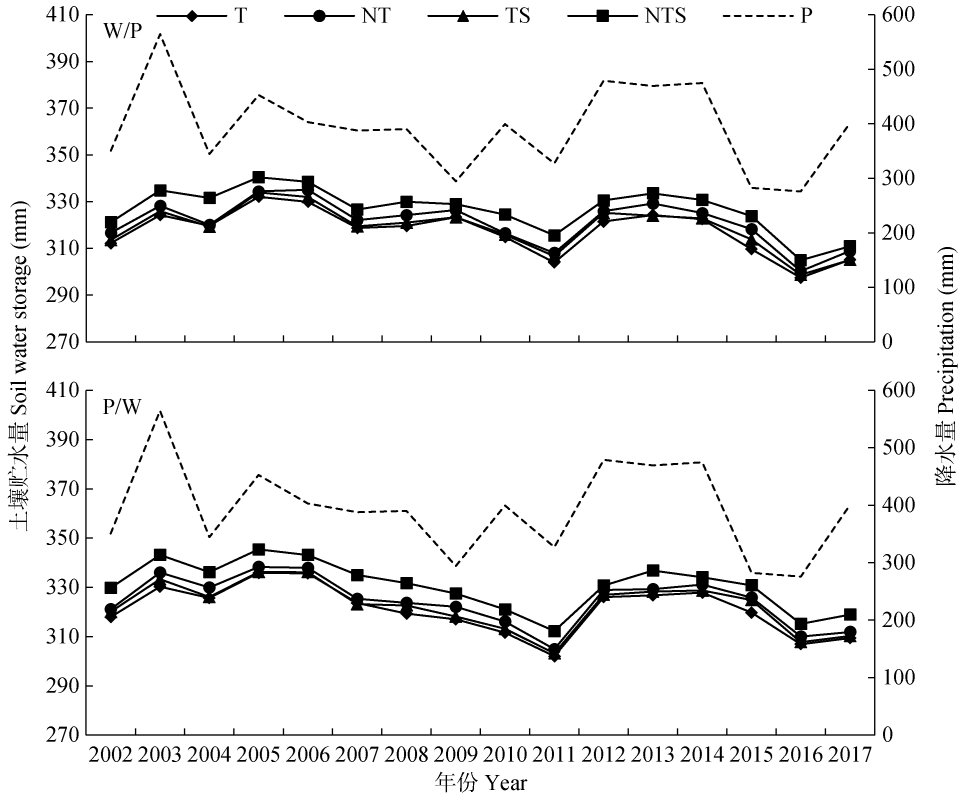

图 4 2002—2017 年春小麦(W)/豌豆(P)轮作序列不同耕作措施土壤贮水量与年降水量的关系

Fig. 4 Relationship between soil water storage and annual precipitation of different tillage measures under different sequences of spring wheat (W) and pea (P) rotation from 2002 to 2017

T: 传统耕作; NT: 免耕; TS: 传统耕作秸秆覆盖; NTS: 免耕秸秆覆盖; P: 降水量。T: traditional tillage; NT: no-tillage with no straw cover; TS: traditional tillage with straw incorporation; NTS: no-tillage with straw cover; P: precipitation.

理的土壤贮水量比 T、NT 和 TS 处理分别增加 2.28%、1.28%和 2.04%, 差异性不显著, T、NT、TS 和 NTS 处理的土壤贮水量变化率分别为–7.29%、–7.48%、–7.41%和–8.65%; P/W 轮作序列中, NTS 处理的土壤贮水量比 T、NT 和 TS 处理分别增加 2.54%、1.46%和 2.26%, 差异性不显著, T、NT、TS 和 NTS 处理的土壤贮水量变化率分别为–7.36%、–7.60%、–7.71%和–8.80%。

3)土壤水分恢复阶段(7—12 月): 该阶段的平均降水量为 200.54 mm。W/P 轮作序列中, NTS 处理的土壤贮水量比 T、NT 和 TS 处理分别增加 2.98%、1.72%和 2.43%, 差异性显著(P<0.05), T、NT、TS 和 NTS 处理的土壤贮水量变化率分别为 3.33%、3.54%、3.41%和 3.87%; P/W 轮作序列中, NTS 处理的土壤贮水量比 T、NT 和 TS 处理分别增加 3.06%、1.91%和 2.54%, 差异性显著(P<0.05), T、NT、TS 和 NTS 处理的土壤贮水量变化率分别为 3.42%、3.64%、3.58%和 4.03%。

不同轮作体系下, 年内 4 种耕作措施的土壤贮水量随季节发生变化。其中, 土壤水分缓慢消耗阶段, NTS 处理的水分消耗最小; 土壤水分大量损耗阶段, 4 种耕作措施的土壤贮水量快速下降, NTS 处理的贮水量降幅最大, 4 种耕作措施的贮水效果差别不大, 尤其在 6—7 月间, W/P 轮作序列中, NTS 处理的土壤贮水量与 T、NT 和 TS 处理相比仅增加 2.12%、0.99%和 1.74%, P/W 轮作序列中, NTS 处理的土壤贮水量与 T、NT 和 TS 处理相比仅增加 2.20%、1.16%和 1.98%, 此阶段 NTS 处理的贮水效果不再显著; 土壤水分恢复阶段, 受降水增多以及作物耗水减小的影响, 4 种耕作措施的土壤贮水量开始回升, NTS 处理的土壤贮水量增幅最为显著。

2.2.3 典型降水年型土壤贮水量的分异特征分析

2002—2017 年试验地的平均降水量为 393.53 mm, 其中 2003 年的降水量最高, 达 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 年的降水量最低, 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。以干旱年(2016 年)和丰水年(2003 年)为例分析春小麦及豌豆农田 0~200 cm 土层土壤贮水量的变化特征, 结果如图 6、图 7 所示。

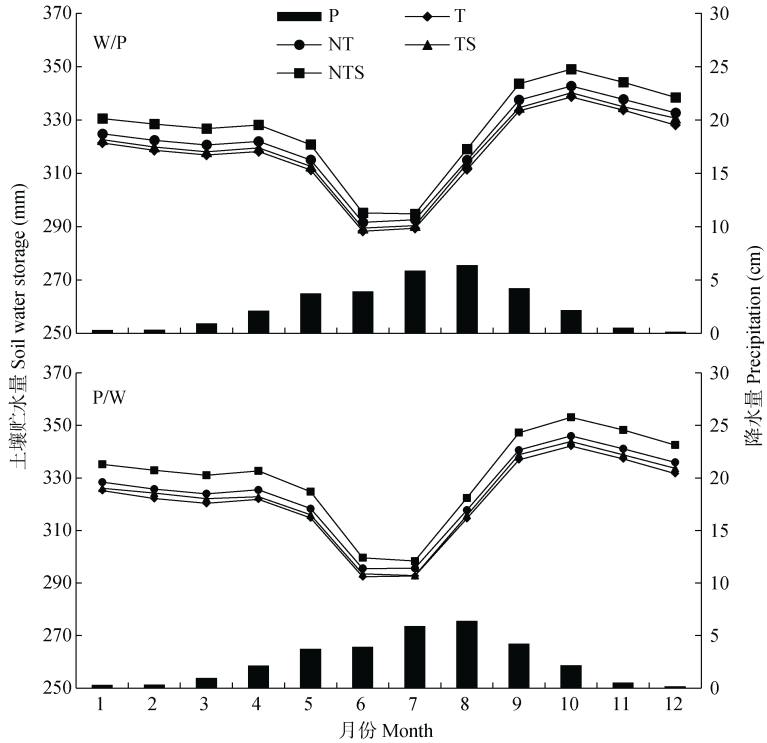

图 5　2002—2017 年春小麦(W)/豌豆(P)轮作序列不同耕作措施下各月土壤贮水量的变化

Fig. 5　Monthly changes of soil water storage of different tillage measures under different sequences of spring wheat (W) and pea (P) rotation from 2002 to 2017

T: 传统耕作; NT: 免耕; TS: 传统耕作秸秆覆盖; NTS: 免耕秸秆覆盖; P: 降水量。T: traditional tillage; NT: no-tillage with no straw cover; TS: traditional tillage with straw incorporation; NTS: no-tillage with straw cover; P: precipitation.

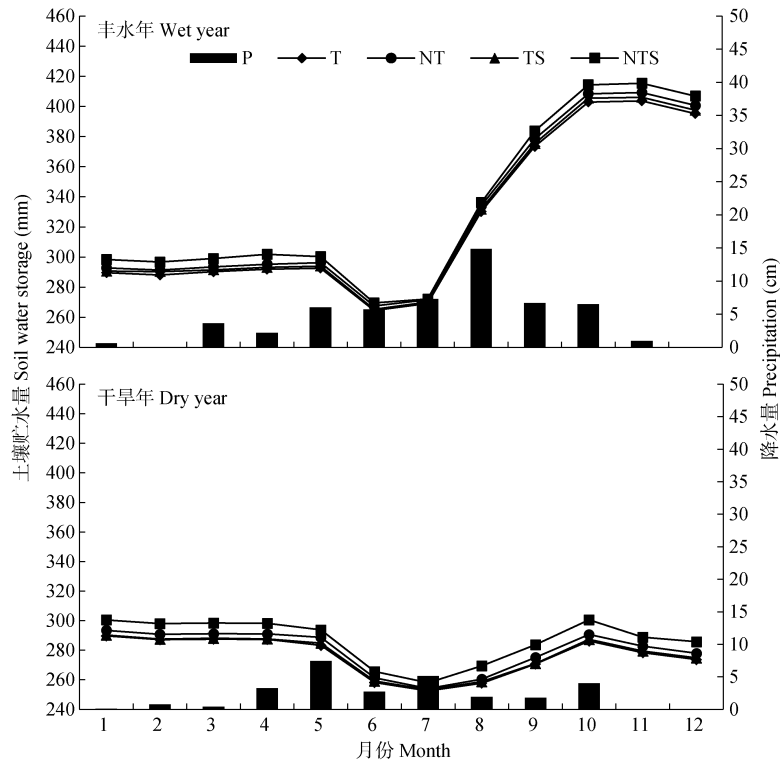

图 6　不同耕作措施下春小麦/豌豆轮作系统(W/P)春小麦农田月平均土壤贮水量在丰水年和干旱年的变化特征

Fig. 6　Monthly changes of soil water storage of spring wheat farmland of spring wheat/pea rotation sequence (W/P) in wet and dry years under different tillage measures

T: 传统耕作; NT: 免耕; TS: 传统耕作秸秆覆盖; NTS: 免耕秸秆覆盖; P: 降水量。T: traditional tillage; NT: no-tillage with no straw cover; TS: traditional tillage with straw incorporation; NTS: no-tillage with straw cover; P: precipitation.

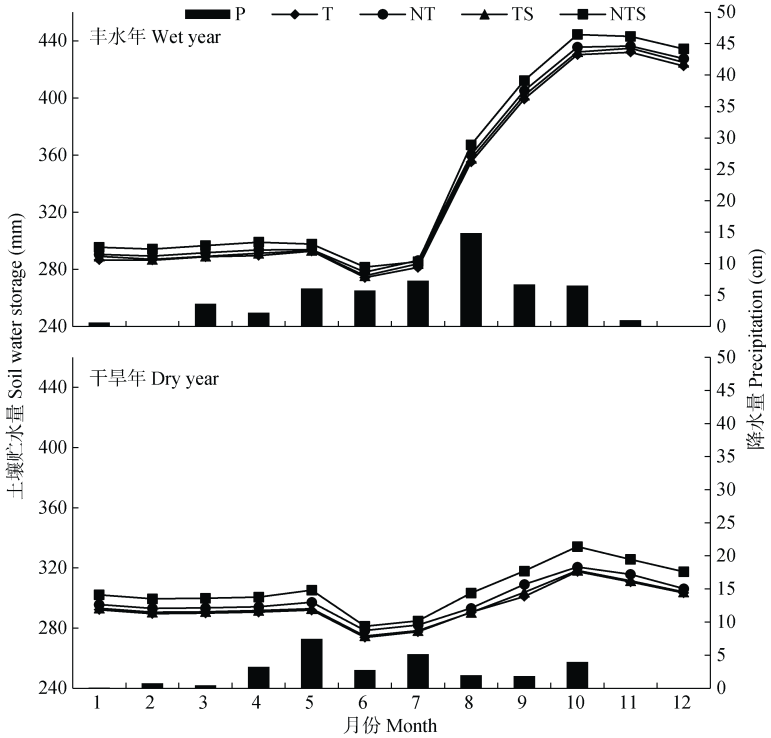

图 7 不同耕作措施下豌豆/春小麦轮作系统(P/W)豌豆农田月平均土壤贮水量在丰水年和干旱年的特征

Fig. 7 Monthly changes of soil water storage of pea farmland of pea/spring wheat rotation sequence (P/W) in wet and dry years under different tillage measures

T: 传统耕作; NT: 免耕; TS: 传统耕作秸秆覆盖; NTS: 免耕秸秆覆盖; P: 降水量。T: traditional tillage; NT: no-tillage with no straw cover; TS: traditional tillage with straw incorporation; NTS: no-tillage with straw cover; P: precipitation.

两种典型降水年型条件下, 4 种耕作措施的土壤贮水量依次为: NTS>NT>TS>T。丰水年 NTS 处理的贮水量比 T、NT 和 TS 处理分别增加 2.71%、1.48%和 2.19%。其中, 春小麦农田 NTS 处理的土壤贮水量比 T、NT 和 TS 处理分别增加 2.64%、1.40%和 2.13%, 豌豆农田 NTS 处理的土壤贮水量比 T、NT 和 TS 处理分别增加 2.78%、1.55%和 2.24%。干旱年 NTS 处理的土壤贮水量比 T、NT 和 TS 处理分别增加 3.97%、2.54%和 3.64%。其中, 春小麦农田 NTS 处理的土壤贮水量比 T、NT 和 TS 处理分别增加 3.88%、2.48 %和 3.56%, 豌豆农田 NTS 处理的土壤贮水量比 T、NT 和 TS 处理分别增加 4.05%、2.60%和 3.72%。

降水年型不同、种植作物相同的条件下, 丰水年 4 种耕措施间的贮水效果差别不大; 干旱年 4 种耕作措施间的贮水效果差别明显, NTS 处理的贮水效果明显优于其他 3 种处理。降水年型相同、种植作物不同的条件下, 由于豌豆的耗水强度小于春小麦, 因此豌豆农田 4 种耕作措施的土壤贮水量高于春小麦农田, 在休闲期降水较少的年份里可以选择豌豆作为前茬作物来增加土壤内贮存的水分。

3 讨论

土壤水分与土壤初始含水量、耕作措施、降水量、蒸发量以及作物蒸腾等之间存在着复杂的非线性关系, 探明这种非线性关系对土壤贮水量的准确预测起着至关重要的作用。本文基于 LSTM 神经网络, 建立了不同耕作措施的土壤贮水量与月平均气温、月降水量、月平均辐射量、月平均蒸发量、月作物耗水量的非线性模型, 模型的平均均方根误差为 7.76 mm, 平均绝对误差为 6.95 mm, 相对误差控制在–5%~+5%的范围内。因此, 该模型可以在较长时间内实现陇中黄土高原沟壑区不同耕作措施条件下 0~200 cm 土层土壤贮水量的准确预测。但所建模型的模拟结果均高于实测值, 主要是由于模型仅将气象因素和作物耗水作为输入因子, 没有考虑土壤特征值等其他限制性因素的影响。此外, 模型的预测误差会随预测值增大而变大, 在后期的研究过程中, 可以通过增加新的约束条件来解决模型误差随输出结果被放大的问题。

李小涵等[23]研究表明, 豆科作物与禾谷类作物轮作可以优化土壤水分利用。郭清毅等[24]研究表明, P/W 轮作序列中 4 种保护性耕作措施 0~50 cm 土壤

贮水量均比 W/P 轮作序列中相应耕作措施的土壤贮水量有所增加, 增幅为 0.33%~0.62%。而本研究表明, P/W 轮作序列中各处理 0~200 cm 土层土壤贮水量均比 W/P 轮作序列中各处理的土壤贮水量有所增加, 增幅为 1.09%~1.43%, 造成两者存在差异的主要原因除了土层厚度、降水和耕作措施不同外, 模型本身也存在着预测结果偏大的问题。免耕覆盖可通过降低土壤容重、提高土壤孔隙度、促进土壤水稳性团聚体的形成, 提高土壤的贮水能力[25]。李俊红等[26]研究结果表明, 免耕覆盖能显著增强土壤的贮水量, 平均贮水量高于传统耕作 8.56%。Fabrizzi 等[27]研究发现, 免耕覆盖的土壤贮水保墒效果优于免耕和传统耕作。晋小军等[28]研究结果表明, 不同耕作措施中免耕的土壤贮水量最高, 而免耕秸秆覆盖和传统耕作秸秆覆盖的土壤贮水量最低。而本研究表明, 在不同轮作体系、不同降水年型和不同种植作物条件下, 免耕覆盖的土壤贮水效果均优于其他 3 种耕作措施, 4 种耕作措施的土壤贮水量依次为 NTS>NT>TS>T。与免耕相比, 免耕覆盖可以增加土壤有机质, 使土壤具有较好的渗透性能, 同时覆盖有助于减小地表径流和蒸发, 甚至有研究表明免耕会使深层土壤含水量降低, 而免耕覆盖深层土壤含水量则较高[29-31]。余海英等[32]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两者间的差异更为显著。吕美蓉等[33]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, 免耕和免耕覆盖在干旱年的贮水效果更加显著, 这与丁晋利等[34]研究结果一致。

贺立恒等[35]研究结果表明, 土壤贮水量随生育期推后而减少。陈四龙等[36]研究表明, 免耕覆盖可以起到作物生长前期贮水后期充分供水的作用, 同时耕作方式对土壤贮水作用的差异主要发生在作物生育前期。本研究结果表明, 免耕覆盖在作物生长前期(3—5 月)贮水效果最佳, 当作物生长进入旺盛期(5—6 月), 土壤耗水以作物蒸腾为主, 4 种耕作措施的贮水效果开始明显减弱, 同时免耕覆盖条件下作物的耗水量高于其他耕作措施, 造成免耕覆盖的土壤贮水量降幅最为明显, 与其他 3 种耕作措施的贮水效果差异不显著[37-38]。王蕾等[39]研究表明, 夏闲期降雨后保护性耕作措施可以提高土壤贮水能力。本研究表明, 作物生长后期(7 月)降水增多, 4 种耕作措施的土壤贮水量大幅增加, 免耕覆盖的贮水效果明显优于其他 3 种耕作措施。郑洪兵等[40]研究表明, 土壤贮水量随季节变化呈先增后降的趋势。而本研究表明, 4 种耕作措施的土壤贮水量呈“减少-增加”的变化趋势, 造成研究结果差异的主要因素是降水, 本研究试验地前期降水偏少致使土壤一直处于失墒状态, 而后期(7 月)随降水的大幅增加、作物耗水的减弱, 土壤贮水量快速增加, 并在 10 月达年内最高。

4　结论

基于 LSTM 神经网络模型对陇中黄土高原沟壑区不同轮作体系、不同降水年型和不同种植作物条件下保护性耕作措施的贮水效果进行差异性研究。主要结论有:

1)LSTM 神经网络模型对陇中黄土高原沟壑区土壤贮水量预测具有较好的适用性, 模型模拟结果的平均均方根误差为 7.76 mm, 平均绝对误差为 6.95 mm, 且相对误差控制在−5%~+5%的范围内。

2)陇中黄土高原沟壑区 P/W 轮作序列中 4 种耕作措施的土壤贮水量均比 W/P 轮作序列中 4 种耕作措施的土壤贮水量增加 1.09%~1.43%。两种轮作体系下, 免耕覆盖的贮水效果均优于传统耕作、免耕和传统耕作秸秆覆盖。W/P 轮作序列中, 免耕覆盖的年均土壤贮水量比传统耕作、免耕和传统耕作秸秆覆盖分别增加 2.89%、1.70%和 2.46%; P/W 轮作序列中, 免耕覆盖的年均土壤贮水量比传统耕作、免耕和传统耕作秸秆覆盖分别增加 3.03%、1.91%和 2.57%。

3)陇中黄土高原沟壑区免耕覆盖在干旱年的贮水保墒效果更为显著。丰水年, 免耕覆盖的土壤贮水量比传统耕作、免耕和传统耕作秸秆覆盖分别增加 2.71%、1.48%和 2.19%; 干旱年, 免耕覆盖的土壤贮水量比传统耕作、免耕和传统耕作秸秆覆盖分别增加 3.97%、2.54%和 3.64%。

4)陇中黄土高原沟壑区保护性耕作措施的贮水效果随季节发生变化, 作物生长前期保护性耕作措施的贮水优势明显, 免耕、传统耕作秸秆覆盖和免耕覆盖的土壤贮水量比传统耕作平均提高 1.12%、0.42%和 3.16%; 作物生长旺盛期, 保护性耕作措施与传统耕作的差异不显著, 免耕、传统耕作秸秆覆盖和免耕覆盖的土壤贮水量比传统耕作平均提高 1.02%、0.24%和 2.41%; 作物生长后期, 保护性耕作的贮水效果开始显著增强, 免耕、传统耕作秸秆覆盖和免耕覆盖的土壤贮水量比传统耕作平均提高 1.18%、0.52%和 3.02%。

参考文献 References

[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 J C, JIANG D, CAO W X, 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

[2] 邓振镛, 张强, 王强, 等. 黄土高原旱塬区土壤贮水量对冬小麦产量的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(18): 5281–5289
DENG Z Y, ZHANG Q, WANG Q, et al. Influence of water storage capacity on yield of winter wheat in dry farming area in the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(18): 5281–5289

[3] 林祥, 王东, 谷淑波. 播种期补灌对土壤含水量和小麦籽粒产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(12): 1700–1711
LIN X, WANG D, GU S B. Effects of supplemental irrigation at sowing stage on soil moisture and grain yield of wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2015, 35(12): 1700–1711

[4] 陈宁宁, 李军, 吕薇, 等. 不同轮耕方式对渭北旱塬麦玉轮作田土壤物理性状与产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(9): 1102–1111
CHEN N N, LI J, LYU W, et al. Effects of different rotational tillage patterns on soil physical properties and yield of winter wheat-spring maize rotation field in Weibei highland[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(9): 1102–1111

[5] 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): 243–245
SHAO X M, YAN C R. 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): 243–245

[6] 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 and Tillage Research, 2014, 136: 76–83

[7] PALM C, BLANCO-CANQUI H, DECLERCK F, et al. Conservation agriculture and ecosystem services: An overview[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2014, 187: 87–105

[8] MITCHELL J P, SINGH P N, WALLENDER W W, et al. No-tillage and high-residue practices reduce soil water evaporation[J]. California Agriculture, 2012, 66(2): 55－61

[9] 杨长刚, 柴守玺. 秸秆带状覆盖对旱地冬小麦产量及土壤水热利用的调控效应[J]. 应用生态学报, 2018, 29(10): 3245–3255
YANG C G, CHAI S X. Regulatory effects of bundled straw covering on winter wheat yield and soil thermal-moisture utilization in dryland[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(10): 3245–3255

[10] 彭正凯, 李玲玲, 谢军红. 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 Z K, LI L L, XIE J H. Effects of conservational tillage on water characteristics in dryland farm of central Gansu, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(12): 4022–4028

[11] 殷文, 柴强, 胡发龙, 等. 干旱内陆灌区不同秸秆还田方式下春小麦田土壤水分利用特征[J]. 中国农业科学, 2019, 52(7): 1247–1259
YIN W, CHAI Q, HU F L, et al. Characteristics of soil water utilization in spring wheat field with different straw retention approaches in dry inland irrigation areas[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(7): 1247–1259

[12] 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

[13] 尹笑笑, 王东. 两种土壤质地麦田贮水量与表层土壤水分的关系[J]. 麦类作物学报, 2018, 38(7): 841–853
YIN X X, WANG D. Relation of the soil water storage in a certain soil depth to the soil water content in the surface layer in two different soil texture wheat fields[J]. Journal of Triticeae Crops, 2018, 38(7): 841–853

[14] 周良臣. 利用土壤水动力学模型预测麦田土壤水分的研究[J]. 节水灌溉, 2007, (3): 10–13
ZHOU L C. Study on estimation of soil-water content by using soil-water dynamics model[J]. Water Saving Irrigation, 2007, (3): 10–13

[15] 李广, 黄高宝, BELLOTTI W, 等. APSIM 模型在黄土丘陵沟壑区不同耕作措施中的适用性[J]. 生态学报, 2009, 29(5): 2655–2663
LI G, HUANG G B, BELLOTTI W, et al. Adaptation research of APSIM model under different tillage systems in the Loess hill-gullied region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(5): 2655–2663

[16] 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]. 农业机械学报, 2016, 47(4): 136–145
DING J L, WU J C, YANG Y H, et al. Simulation of effects of tillage pattern transformation on soil water conservation with RZWQM model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(4): 136–145

[17] 赵引, 毛晓敏, 薄丽媛. 覆膜和灌水处理下土壤水分动态与玉米生长模拟研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(9): 195–204
ZHAO Y, MAO X M, BO L Y. Simulation of soil moisture dynamics and seed-maize growth under different mulching and irrigation conditions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 195–204

[18] 武文红, 杜贞栋, 刘现伟, 等. 基于 BP 神经网络的土壤贮水量预报模型研究[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(15): 8211–8212
WU W H, DU Z D, LIU X W, et al. Based on BP neural network forecasting model of soil water storage[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(15): 8211–8212

[19] 陈昌华, 谭俊, 尹健康, 等. 基于 PCA-RBF 神经网络的烟田土壤水分预测[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 85–90
CHEN C H, TAN J, YIN J K, et al. Prediction for soil moisture tobacco fields based on PCA and RBF neural network[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(8): 85–90

[20] LÄNGKVIST 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: 11–24

[21] LECUN Y, BENGIO Y, HINTON G. Deep learning[J]. Nature, 2015, 521(7553): 436–444

[22] 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): 772–784
WANG X, WU J, LIU C, 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): 772–784

[23] 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 X H, WANG Z H, HAO M D, 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

[24] 郭清毅, 黄高宝, LI G D, 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 Q Y, HUANG G B, LI G D, 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

[25] 王秋菊, 张敬涛, 盖志佳, 等. 长期免耕秸秆覆盖对寒地草甸土土壤物理性质的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(9): 2943–2948
WANG Q J, ZHANG J T, GAI Z J, et al. Effect of long-term straw mulching and no-tillage on physical properties of meadow soil in cold region[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(9): 2943–2948

[26] 李俊红, 吕军杰, 丁志强, 等. 保护性耕作冬小麦产量及土壤水分变化研究[J]. 土壤通报, 2014, 45(6): 1343–1348
LI J H, LYU J J, DING Z Q, et al. Study of conservation tillage on winter wheat yield and soil moisture[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, 45(6): 1343–1348

[27] FABRIZZI K P, GARCÍA F O, COSTA J L, et al. Soil water dynamics, physical properties and corn and wheat responses to minimum and no-tillage systems in the southern Pampas of Argentina[J]. Soil and Tillage Research, 2005, 81(1): 57–69

[28] 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 X J, HUANG G B. 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

[29] 高建华, 张承中. 不同保护性耕作措施对黄土高原旱作农田土壤物理结构的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(4): 192–196
GAO J H, ZHANG C Z. The effects of different conservation tillage on soil physical structures of dry farmland in the Loess Plateau[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(4): 192–196

[30] 蔡立群, 罗珠珠, 张仁陟, 等. 不同耕作措施对旱地农田土壤水分保持及入渗性能的影响研究[J]. 中国沙漠, 2012, 32(5): 1362–1368
CAI L Q, LUO Z Z, ZHANG R Z, et al. Effect of different tillage methods on soil water retention and infiltration capability of rainfed field[J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(5): 1362–1368

[31] 刘强, 冯永忠, 杨世琦, 等. 水蚀风蚀交错区坡耕地不同耕作措施水温效应研究[J]. 西北农业学报, 2011, 20(7): 179–186
LIU Q, FENG Y Z, YANG S Q, et al. Effects of different tillage on soil moisture and temperature on sloping farmland in the wind-water erosion crisscross region[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2011, 20(7): 179–186

[32] 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 H Y, PENG W Y, MA X, et al. Effects of no-tillage on soil water content and physical properties of spring corn fields in semiarid region of northern China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(1): 99–104

[33] 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
LYU M R, LI Z J, ZHANG T, 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

[34] 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 J L, WEI H Y, YANG Y H, 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

[35] 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 L H, GAO Z Q, SUN M, 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

[36] 陈四龙, 陈素英, 孙宏勇, 等. 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 S L, CHEN S Y, SUN H Y, et al. 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

[37] 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 Z K, LI L L, XIE J H, 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

[38] 孔维萍, 成自勇, 张芮, 等. 保护性耕作在黄土高原的应用和发展[J]. 干旱区研究, 2015, 32(2): 240–250
KONG W P, CHENG Z Y, ZHANG R, et al. Application and development of conservation tillage techniques in the loess plateau[J]. Arid Zone Research, 2015, 32(2): 240–250

[39] 王蕾, 李军, 贾志宽, 等. 渭北旱原夏闲期麦田不同耕作措施的土壤贮水效应[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2009, 37(8): 133–138
WANG L, LI J, JIA Z K, et al. Effect of tillage on soil moisture storage in summer fallow period of winter wheat field in Weibei dry-land[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2009, 37(8): 133–138

[40] 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 H B, LIU W R, LUO Y, 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