

刘佩,高茂盛,王百灵,等. 基于BP神经网络的陕西春季浅层地温预测模型[J]. 陕西气象,2024(4):45-52.

文章编号:1006-4354(2024)04-0045-08

# 基于BP神经网络的陕西春季浅层地温预测模型

刘佩<sup>1,2</sup>,高茂盛<sup>1,2,3</sup>,王百灵<sup>1,2,3</sup>,周忠玉<sup>1,2,3</sup>,李建科<sup>1,3</sup>,李燕赞<sup>1,2,3</sup>,郑倩<sup>4</sup>

(1. 杨凌气象局,陕西杨凌 712100;

2. 陕西省气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室,西安 710016;

3. 杨凌高新农业气象技术联合研示中心,陕西杨凌 712100;4. 衢州市气象局,浙江衢州 324000)

**摘要:**利用2016—2021年春季(3—5月)陕西98个国家级地面气象观测站逐日观测资料,运用BP神经网络构建了陕西春季不同区域(陕北、关中、陕南)不同月份(3、4、5月)不同土壤深度(5、10、15、20 cm)地温预测模型,并利用2022年数据进行模型预测检验。研究表明:模型预测的各深度日平均地温在陕北、关中、陕南地区预测准确率 $>95\%$ ,且整体表现出土壤深度越深预测准确率越高的趋势,10 cm日平均地温预测准确率 $>98\%$ ,15、20 cm日平均地温预测准确率 $>99\%$ ;各深度日平均地温在陕北、关中、陕南地区预测值与实测值的均方根误差 $\leq 1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、平均绝对误差 $\leq 0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,均方根误差和平均绝对误差整体表现出土壤深度越深误差值越小的趋势;模型预测精度比较理想,可用于陕西春季浅层地温预报业务,为春播及果树花期预报提供技术支持。

**关键词:**BP神经网络;浅层地温;预测模型;春季;陕西省

**中图分类号:**P468.021:TP183

**文献标识码:**A

地温是指地表面及其以下不同深度土壤温度的统称,包括地面温度(0 cm)、浅层地温(距离地面5、10、15、20 cm)和深层地温(距离地面40、80、160、320 cm),是地-气系统的重要参数<sup>[1-2]</sup>,也是农业生产中的重要气象要素。已有的研究表明,地温的变化与作物的生长发育及产量形成关系密切<sup>[3-8]</sup>,地温不仅决定了作物的适宜播种期<sup>[9-11]</sup>,也直接影响着作物生育期长短<sup>[12-13]</sup>、作物干物质积累及产量形成<sup>[14]</sup>,同时也影响着作物对土壤水分及养分的吸收利用<sup>[8]</sup>;因此,在分析研究地温与气象要素关系的基础上,开展地温预报,对于科学合理安排农业生产具有重要决策意义。

国内外学者主要通过利用气象因子构建地温预报模型进行研究<sup>[15-23]</sup>,建模的方法主要有回归分析<sup>[15-18]</sup>、机器学习<sup>[20-23]</sup>、遥感+机器学习<sup>[19]</sup>,国

内研究的区域主要集中在东北<sup>[15-17]</sup>、内蒙古河套地区<sup>[10]</sup>、贵州<sup>[18]</sup>、青海<sup>[23]</sup>、新疆<sup>[9]</sup>、安徽<sup>[20]</sup>、甘肃<sup>[21]</sup>。相关学者对比研究了不同建模方法的准确率,结果表明神经网络方法在学习、理解非线性复杂数据集和准确预测方面优势明显<sup>[19]</sup>,对日最高、最低地表温度的模拟效果明显好于逐步回归<sup>[21]</sup>。综上可知,通过气象因子预测地温是可行的,且神经网络方法的模拟预测效果较好。陕西是我国重要的农业基地,通过地温预报确保春播作物播种安全及有效防御果树花期冻害对陕西农业健康发展具有重要意义,但该方面的研究未见相关报道。本文在分析春季浅层地温变化规律的基础上,运用BP神经网络方法,通过常规地面气象观测资料预测春季浅层地温,同时对预测效果及误差进行统计分析,以期对陕西农业生产管理

**收稿日期:**2023-06-01

**作者简介:**刘佩(1994—),女,汉族,陕西岐山人,硕士,工程师,从事农业气象预报研究。

**通信作者:**高茂盛(1981—),男,汉族,内蒙古土左旗人,博士,高工,从事农业气候资源高效利用研究。

**基金项目:**陕西省重点研发项目(2021ZDLNY03-02);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2017JQ3025);陕西省气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室开放基金课题(2023K-3;2021G-9)

和相关气象灾害防御提供参考。

## 1 资料与方法

### 1.1 研究区域概况

陕西省位于我国内陆腹地(105°29′~111°15′E, 31°42′~39°35′N),地域南北长、东西窄,地势南北高、中间低,从南到北跨越秦巴山地、关中平原和黄土高原3种地貌类型。省内南北气候差异大,陕南为亚热带湿润气候区,关中为暖温带半湿润气候区,陕北为暖温带向中温带过渡的半干旱气候区<sup>[24-25]</sup>。本研究中陕北地区包括陕西北部的榆林和延安2个地级市所有区县,关中包括陕西中部的宝鸡、西安、咸阳、渭南和铜川5个地级市所有区县,陕南包括陕西南部的汉中、安康和高洛3个地级市所有区县。

### 1.2 资料来源

研究所用气象数据均来源于陕西省气象信息中心。所用资料为陕西省2016—2022年春季(3—5月)98个国家级地面气象观测站(陕西省共99个国家站,研究中不包含无地温观测的“华山站”)逐日数据,主要包括平均气温、最高气温、最低气温、平均相对湿度、降水量、平均风速、5~20 cm平均地温(全文均指5、10、15、20 cm平均地温)等气象要素(全文所有气象要素数据无特别指出均为日值)。陕北、关中、陕南地区的站点分布数量分别为25、45、28站。

### 1.3 研究方法

运用数理统计方法分析陕北、关中、陕南地区3—5月5~20 cm平均地温变化规律,利用BP神经网络方法构建地温预测模型并对预测结果进行检验。

**1.3.1 BP神经网络模型** 研究采用BP神经网络方法构建地温预测模型。BP神经网络模型包括输入层、隐含层、输出层3层结构,以及输入数据的正向传播和误差的反向传播订正2个主要计算过程(图1)。当完成一次正向传播后,模型计算误差,并将误差反向传递至输入层,同时改变各步骤的相应权重,再次进行训练。模型不断重复上述过程,直到达到一定设定条件时停止训练。

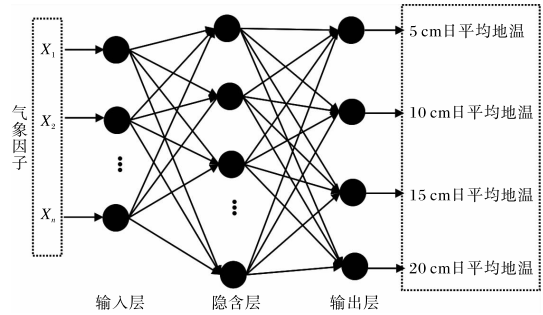


图1 基于BP神经网络的陕西春季浅层地温预测模型结构

**1.3.2 模型输入因子的选取** 用斯皮尔曼相关性分析方法,计算2016—2022年3—5月陕西省98个国家气象站当日和前一日平均气温、最高气温、最低气温、平均相对湿度、降水量、平均风速及前一日的5~20 cm平均地温共16个因子与当日5~20 cm平均地温的相关性。结果显示,当日和前一日的平均气温、最高气温、最低气温以及前一日的5~20 cm平均地温共10个因子与当日5~20 cm平均地温的相关性较高,相关系数均大于0.74,且均为正相关,并通过0.01的显著性检验(表1);因此,研究中选用以上10个气象因子作为模型的输入因子。

**1.3.3 模型构建** 用经过归一化处理的2016—2021年气象数据逐月分区域(陕北、关中、陕南)进行训练建模。模型隐含层为1层,输出层分别为5、10、15、20 cm平均地温。隐含层和输出层的传递函数均采用Leaky ReLU函数(式(1)),此函数具有ReLU函数的计算效率高、允许网络快速收敛等特点,同时又解决了ReLU函数的神经元死亡问题。训练方法为梯度下降法,权重初始化用Kaiming初始化方法<sup>[26]</sup>,训练次数为500。学习率( $\alpha$ )采用指数衰减法确定(式(2)),其中,初始学习率为0.01,衰减系数为0.99,控制衰减速度的步长为5<sup>[27]</sup>。隐含层节点数( $l$ )根据式(3)的取值范围经过多次试验确定,取训练完成后用2022年气象数据预测的5~20 cm平均地温与实测地温的总体均方根误差( $E_{RMS}$ ,式(4))最小时所用节点数。表2为模型隐含层节点数分别设置为5~13时模型训练完成后预测陕北、关中、陕南

表 1 2016—2022 年 3—5 月陕西 98 个国家站 5~20 cm 平均地温与气象因子的相关系数

气象因子	平均地温			
	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm
平均气温	0.962	0.950	0.933	0.915
最高气温	0.888	0.859	0.827	0.797
最低气温	0.821	0.839	0.849	0.852
平均相对湿度	-0.026	0.013	0.048	0.080
降水量	-0.098	-0.046	-0.001 <sup>ns</sup>	0.035
平均风速	-0.055	-0.053	-0.053	-0.057
平均气温(前一日)	0.900	0.920	0.928	0.928
最高气温(前一日)	0.843	0.853	0.851	0.842
最低气温(前一日)	0.743	0.772	0.793	0.808
平均相对湿度(前一日)	-0.019	-0.004 <sup>ns</sup>	0.012	0.031
降水量(前一日)	-0.110	-0.095	-0.077	-0.053
平均风速(前一日)	-0.109	-0.102	-0.096	-0.093
5 cm 地温(前一日)	0.938	0.962	0.974	0.978
10 cm 地温(前一日)	0.934	0.962	0.977	0.984
15 cm 地温(前一日)	0.926	0.955	0.973	0.983
20 cm 地温(前一日)	0.916	0.946	0.966	0.980

注:ns 表示未通过显著性检验,其余均通过 0.01 的显著性检验。

表 2 模型隐含层节点数分别设置为 5~13 时模型预测的 2022 年 3—5 月 5~20 cm

平均地温与实测地温的总体  $E_{RMS}$

单位:℃

月份	地区	节点数								
		5	6	7	8	9	10	11	12	13
3	陕北	0.84	0.88	0.83	0.83	0.97	0.82	0.84	0.83	0.83
	关中	0.73	0.63	0.74	0.63	0.73	0.63	0.63	0.63	0.63
	陕南	0.66	0.78	0.64	0.64	0.75	0.64	0.79	0.66	0.65
4	陕北	0.82	0.71	0.73	0.72	0.73	0.71	0.71	0.72	0.72
	关中	0.66	0.76	0.76	0.77	0.80	0.65	0.65	0.65	0.65
	陕南	0.68	0.73	0.68	0.68	0.68	0.67	0.72	0.73	0.69
5	陕北	0.76	0.76	0.70	0.75	0.71	0.70	0.74	0.71	0.75
	关中	0.86	0.76	0.75	0.77	0.76	0.75	0.75	0.78	0.79
	陕南	0.84	0.73	0.79	0.70	0.73	0.70	0.81	0.78	0.70

2022 年 3—5 月 5~20 cm 平均地温与实测地值的总体  $E_{RMS}$ 。可以发现节点数设置为 10 时地温

预测值与实测值的总体  $E_{RMS}$  最小,因此隐含层节点数取 10。

$$f(x) = \begin{cases} x, & x > 0 \\ ax, & x \leq 0 \end{cases}, \quad (1)$$

式中,  $a$  取 0.01<sup>[28]</sup>,  $x$  为输入值。

$$\alpha = \alpha_0 \times \beta^{(\frac{l}{p})}, \quad (2)$$

式中,  $\alpha_0$  为初始学习率,  $\beta$  为衰减系数,  $l$  为训练迭代轮数,  $p$  为控制衰减速度的步长<sup>[27]</sup>。

$$l = \sqrt{(m+n)} + k, \quad (3)$$

式中:  $m$  为输入层节点数;  $n$  为输出层节点数;  $k$  为调节数, 取值范围是 1~10<sup>[29]</sup>。

$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}, \quad (4)$$

式中,  $S_i$  为模型预测值,  $O_i$  为实测值,  $n$  为样本数。

1.3.4 模型检验 模型检验主要为模型预测值与实测值的误差分析, 分为训练集检验和预测集检验, 训练集采用 2016—2021 年数据资料, 预测集采用 2022 年数据资料。主要采用均方根误差 ( $E_{\text{RMS}}$ )、平均绝对误差 ( $E_{\text{MA}}$ )、决定系数 ( $R^2$ )、准确率 ( $A$ ) 等进行检验 (式(4)~式(7))。

$$E_{\text{MA}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |S_i - O_i|, \quad (5)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2}. \quad (6)$$

式(5)~式(6)中,  $\bar{O}_i$  为实测值的平均值。

$$A = \frac{n_{|S_i - O_i| \leq 2}}{n}. \quad (7)$$

式中,  $n_{|S_i - O_i| \leq 2}$  为模型预测值与实测值差的绝对值  $\leq 2$  °C 的数量 (参考气象业务中以预报误差  $\leq 2$  °C 作为温度预报正确的检验标准)。

## 2 结果分析

### 2.1 地温变化规律分析

表 3 给出了 2016—2022 年 3—5 月陕北、关中、陕南 5~20 cm 月平均地温情况。可以发现: 陕北、关中、陕南相同月份、相同深度的月平均地温由北向南逐渐增大; 同一地区、相同深度的月平均地温随月份逐渐升高; 同一地区、相同月份土壤深度越深, 月平均地温越低。在陕北、关中、陕南选取 3 个代表性站点研究地温日变化规律, 图 2 为分别选取的榆林、宝鸡、安康站 2022 年 3 月 1

日—5 月 31 日 5~20 cm 日平均地温变化情况。可以发现 3 个站点的地温均表现出以下规律: 在明显的升温过程中, 各层日平均地温达到最高时, 土壤深度越深, 地温越低; 在明显的降温过程中, 各层日平均地温达到最低时, 土壤深度越深, 地温越高。总体来看, 在明显的升降温过程中, 土壤深度越深, 温度变化幅度越小。

表 3 2016—2022 年 3—5 月陕北、关中、陕南 5~20 cm 月平均地温 单位: °C

地区	月份	月平均地温			
		5 cm	10 cm	15 cm	20 cm
陕北	3	7.3	6.9	6.5	6.1
	4	14.6	14.3	13.9	13.6
	5	20.2	19.8	19.4	19.0
关中	3	10.8	10.6	10.4	10.1
	4	16.7	16.4	16.1	15.7
	5	21.6	21.3	20.9	20.5
陕南	3	12.5	12.4	12.2	12.1
	4	18.0	17.8	17.5	17.1
	5	22.5	22.2	21.9	21.5

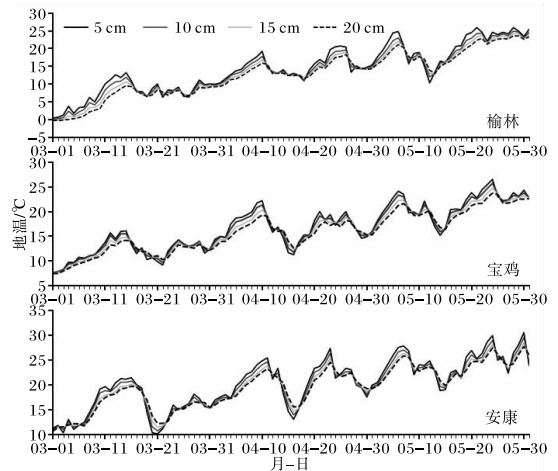


图 2 2022 年 3 月 1 日—5 月 31 日榆林、宝鸡、安康 5~20 cm 日平均地温变化

### 2.2 模型训练结果分析

用 2016—2021 年的气象数据进行模型训练, 将训练结束时的日平均地温预测值 (为了与预测集预测结果区分, 下文将训练集预测结果称为“模

拟值”)与实测值进行对比分析。图 3 为 2016—2021 年 3—5 月关中地区 5~20 cm 日平均地温模拟值与实测值的对比结果,可以看出模拟值与

实测值均匀地分布在 1:1 线附近,且  $R^2 > 0.93$ 。陕北、陕南模拟值与实测值对比结果均与关中类似, $R^2 > 0.92$ (图略)。

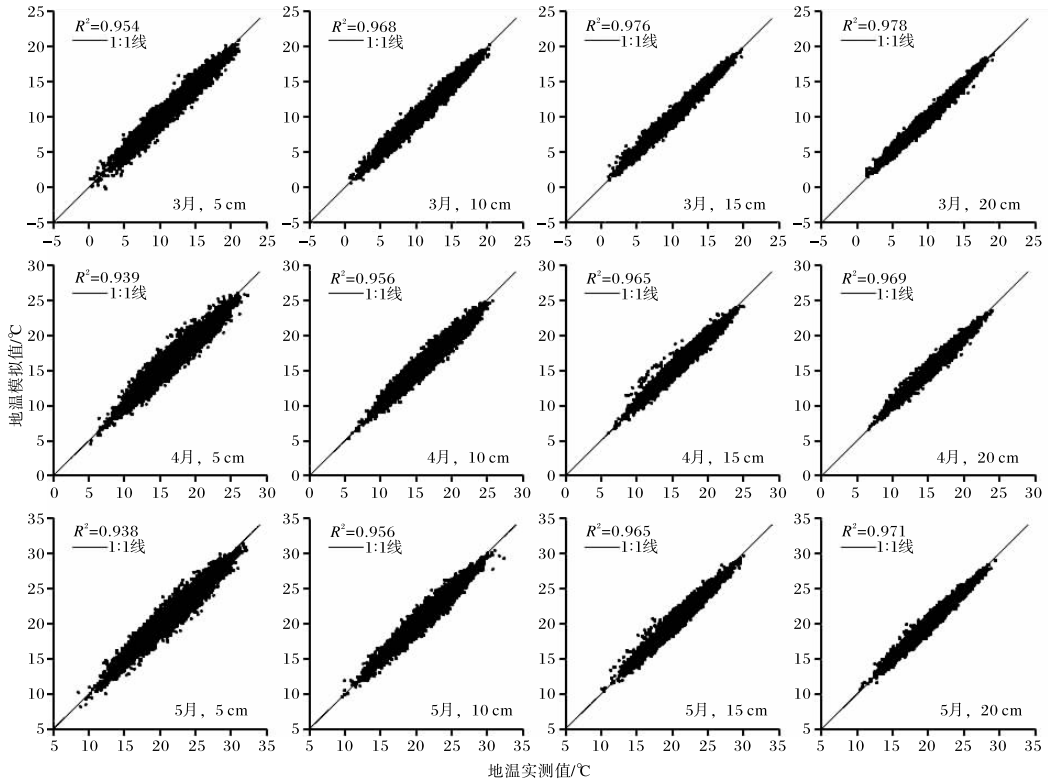


图 3 2016—2021 年 3—5 月关中 5~20 cm 日平均地温模拟值与实测值对比

表 4 给出了 2016—2021 年 3—5 月陕北、关中、陕南地区 5~20 cm 日平均地温模拟值与实测

值的  $E_{RMS}$  和  $E_{MA}$ 。可以看出,各深度的  $E_{RMS} \leq 0.9 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $E_{MA} \leq 0.7 \text{ }^\circ\text{C}$ 。总体来看,土壤深度越深,  $E_{RMS}$  和  $E_{MA}$  越小。

表 4 2016—2021 年 3—5 月陕北、关中、陕南 5~20 cm 平均地温模拟值与实测值的  $E_{RMS}$  和  $E_{MA}$  单位:  $^\circ\text{C}$

月份	地区	$E_{RMS}/E_{MA}$			
		5 cm	10 cm	15 cm	20 cm
3	陕北	0.8/0.6	0.7/0.5	0.6/0.4	0.5/0.4
	关中	0.7/0.6	0.6/0.4	0.5/0.3	0.4/0.3
	陕南	0.7/0.5	0.5/0.4	0.5/0.4	0.4/0.3
4	陕北	0.9/0.7	0.7/0.5	0.6/0.5	0.5/0.4
	关中	0.9/0.7	0.7/0.5	0.5/0.4	0.5/0.4
	陕南	0.8/0.6	0.6/0.5	0.5/0.4	0.5/0.4
5	陕北	0.9/0.7	0.7/0.6	0.6/0.5	0.6/0.5
	关中	0.9/0.7	0.7/0.5	0.6/0.4	0.5/0.4
	陕南	0.8/0.6	0.6/0.5	0.6/0.4	0.5/0.4

### 2.3 模型预测结果分析

2.3.1 模型预测结果检验 用 2022 年气象数据进行模型预测结果检验,表 5 给出了 2022 年 3—5 月陕北、关中、陕南地区 5~20 cm 日平均地温预测值与实测值的  $E_{RMS}$  和  $E_{MA}$ 。可以看出,各深度的  $E_{RMS} \leq 1.0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $E_{MA} \leq 0.8 \text{ }^\circ\text{C}$ , 15、20 cm 平均地温的  $E_{RMS} \leq 0.7 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $E_{MA} \leq 0.6 \text{ }^\circ\text{C}$ 。总体来看,土壤深度越深,  $E_{RMS}$  和  $E_{MA}$  越小。

图 4 给出了 2022 年 3—5 月陕西 98 个国家站 5~20 cm 日平均地温模型预测值与实测值的  $E_{RMS}$ 。可以看出,所有站点 3—5 月各深度平均地温的  $E_{RMS} < 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 。其中:5、10、15、20 cm 平均地温的  $E_{RMS}$  分别主要分布在  $0.5 \sim 1.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $0 \sim 1.5 \text{ }^\circ\text{C}$ (以  $0.5 \sim 1.0 \text{ }^\circ\text{C}$  居多)、 $0 \sim 1.5 \text{ }^\circ\text{C}$ (以  $0 \sim$

**表 5 2022 年 3—5 月陕北、关中、陕南地区 5~20 cm 平均地温预测值与实测值的  $E_{RMS}$  和  $E_{MA}$**   
单位:  $^{\circ}C$

月份	地区	$E_{RMS}/E_{MA}$			
		5 cm	10 cm	15 cm	20 cm
3	陕北	1.0/0.8	0.9/0.7	0.7/0.6	0.7/0.5
	关中	0.8/0.6	0.6/0.5	0.5/0.4	0.5/0.4
	陕南	0.7/0.5	0.6/0.5	0.6/0.5	0.5/0.4
4	陕北	0.9/0.7	0.7/0.6	0.6/0.5	0.6/0.4
	关中	0.8/0.6	0.6/0.5	0.6/0.4	0.6/0.4
	陕南	0.9/0.8	0.6/0.5	0.6/0.4	0.5/0.4
5	陕北	0.8/0.6	0.7/0.5	0.6/0.5	0.7/0.5
	关中	1.0/0.8	0.8/0.6	0.6/0.5	0.6/0.5
	陕南	0.9/0.7	0.7/0.5	0.6/0.5	0.6/0.5

1.0  $^{\circ}C$  居多)、0~1.5  $^{\circ}C$  (以 0~1.0  $^{\circ}C$  居多)。

表 6 给出了 2022 年 3—5 月陕北、关中、陕南地区 5~20 cm 日平均地温模型预测值误差不超过 2  $^{\circ}C$  的准确率。可以看出,各深度平均地温预

测准确率 > 95%, 10 cm 平均地温预测准确率 > 98%, 15、20 cm 平均地温预测准确率 > 99%, 其中 3 月陕南地区、4 月陕北和陕南地区的 20 cm 平均地温预测准确率均达 100%。总体来看,土壤深度越深,平均地温预测准确率越高。

**表 6 2022 年 3—5 月陕北、关中、陕南地区 5~20 cm 日平均地温模型预测准确率**

月份	地区	日平均地温预测准确率			
		5 cm	10 cm	15 cm	20 cm
3	陕北	0.965	0.983	0.997	0.999
	关中	0.986	0.994	0.996	0.998
	陕南	0.988	0.996	0.996	1.000
4	陕北	0.975	0.992	0.999	1.000
	关中	0.996	0.999	0.997	0.999
	陕南	0.973	0.998	0.998	1.000
5	陕北	0.983	0.992	0.997	0.999
	关中	0.973	0.994	0.999	0.997
	陕南	0.959	0.995	0.998	0.999



图 4 2022 年 3—5 月陕西 98 个国家站 5~20 cm 日平均地温模型预测值与实测值的  $E_{RMS}$  (审图号为 GS(2024)0650 号)

2.3.2 模型预测误差的区域差异 由表5可以看出,2022年3月陕北地区5~20 cm日平均地温模型预测值与实测值的 $E_{RMS}$ 和 $E_{MA}$ 整体均大于关中、陕南地区。这可能是由于3月陕北地区仍较冷,5~20 cm不同土壤深度间的地温差异较关中、陕南更大(表7),使模型预测难度增大导致。4、5月10~20 cm平均地温 $E_{RMS}$ 和 $E_{MA}$ 的区域差异整体较小;而5 cm平均地温的区域差异较大,4月关中地区5 cm平均地温 $E_{RMS}$ 和 $E_{MA}$ 明显小于陕北、陕南地区。表8给出了2022年3—5月陕西平均气温、最高气温相对前一日变温为负值的样本总占比,以及5 cm平均地温相对于前一日变温情况的标准差。可以发现:4月陕北地区负变温占比最高,降温更频繁;陕南5 cm平均地温变温标准差最大,温度波动更大。这些均可导致模型对4月陕北、陕南5 cm平均地温的预测难度增大。5月陕北地区5 cm平均地温 $E_{RMS}$ 和 $E_{MA}$

明显小于关中、陕南,此时关中、陕南地区5 cm平均地温变温标准差较陕北更大(表8),同样导致模型预测难度增大。

表7 2022年3—5月陕北、关中、陕南地区5~20 cm月平均地温 单位:℃

月份	地区	月平均地温			
		5 cm	10 cm	15 cm	20 cm
3	陕北	7.9	7.4	7.0	6.5
	关中	11.6	11.4	11.2	10.9
	陕南	13.5	13.3	13.1	12.9
4	陕北	14.8	14.5	14.1	13.8
	关中	17.2	16.9	16.6	16.2
5	陕南	18.8	18.5	18.2	17.9
	陕北	20.3	19.9	19.4	18.9
	关中	21.9	21.5	21.1	20.7
	陕南	22.8	22.4	22.0	21.6

表8 2022年3—5月陕北、关中、陕南地区日平均气温、最高气温负变温总占比及5 cm日平均地温变温标准差

地区	日平均气温、最高气温负变温总占比/%			5 cm日平均地温变温标准差/℃		
	3月	4月	5月	3月	4月	5月
陕北	47	41	38	1.94	1.94	2.07
关中	47	40	39	1.42	1.95	2.15
陕南	47	38	38	1.73	2.21	2.44

### 3 结论与讨论

根据2016—2022年春季陕西98个国家气象站数据,分析5~20 cm地温变化规律;利用2016—2021年气象数据,运用BP神经网络方法,分区域、按月进行5~20 cm日平均地温预测训练,建立陕西春季浅层地温预测模型,并用2022年数据进行模型预测检验,主要结论如下。

(1)陕北、关中、陕南3—5月土壤深度越深,5~20 cm月平均地温越低。5~20 cm日平均地温在明显升降温过程中,土壤深度越深,温度变化幅度越小。

(2)2016—2021年3—5月陕北、关中、陕南地区5~20 cm日平均地温模型模拟值与实测值基本均匀分布在1:1线附近,决定系数 $>0.92$ 。

(3)2022年3—5月陕北、关中、陕南地区5~20 cm日平均地温模型预测值与实测值的 $E_{RMS} \leq$

1.0℃、 $E_{MA} \leq 0.8$ ℃,陕西98个国家气象站的 $E_{RMS} < 2$ ℃。

(4)2022年3—5月陕北、关中、陕南地区5~20 cm日平均地温模型预测准确率 $>95\%$ ,10 cm平均地温预测准确率 $>98\%$ ,15、20 cm平均地温预测准确率 $>99\%$ 。总体上,土壤深度越深,预测准确率越高。

(5)模型整体预报误差较小,预报精度较理想,可用于陕西地区春季浅层地温预报业务,为春播及果树花期预报提供技术支持。

(6)研究中模型预测检验所用输入因子资料为实况数据,而实际业务运用中为预报数据,因此地温的预报质量也依赖于输入因子相关气象要素的预报质量,地温的实际预报准确率也会小于文章中的检验结果。

## 参考文献:

- [1] 中国气象局. 地面气象观测规范[M]. 北京:气象出版社,2003:85-89.
- [2] 张蕾,郭安红,曹云,等. 1961—2020年中国不同区域0 cm地温时空变化特征[J]. 生态学杂志,2023,42(3):716-724.
- [3] 李青松,高立起,石爱丽,等. 地温与玉米品种出苗关系的研究[J]. 作物杂志,2011(4):89-92.
- [4] 郑和祥,郭克贞,郝万龙. 作物生长指标与土壤水分状况及地温关系研究[J]. 水土保持研究,2011,18(3):210-212.
- [5] SANTOS H O, VASCONCELLOS R C C, PAULI B, et al. Effect of soil temperature in the emergence of maize seeds[J]. Journal of Agricultural Science, 2019, 11(1): 479-484.
- [6] 丁锡强,王冰,姜茹茵,等. 烟台市红富士苹果始花期预报模型研究[J]. 陕西气象,2018(3):33-36.
- [7] 刘红,李德,党晓东. 子长县蚕桑种植适应性气候分析[J]. 陕西气象,2014(1):34-36.
- [8] 张翠华,张文煜. 浅层地温变化对石家庄农作物生长的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2013,41(7):54-59.
- [9] 吉春容,张玲,杨明凤,等. 石河子绿洲棉区覆膜内5 cm地温变化与气温的关系及预报[J]. 沙漠与绿洲气象,2015,9(5):16-21.
- [10] 王萍,李秀芬,王秋京,等. 作物春季播种期土壤温湿因子的分析及预测研究:以内蒙古河套灌区为例[J]. 土壤通报,2016,47(6):1314-1324.
- [11] 李帅,王萍,陈莉,等. 黑龙江省春季浅层(0~20 cm)地温变化特征及预报[J]. 冰川冻土,2014,36(1):55-62.
- [12] 邱嘉琦,房磊,杨健. 基于遥感的东北植被物候沿城乡梯度变化[J]. 生态学杂志,2017,36(6):1699-1707.
- [13] 郑奕,杨莲梅,刘艳. 新疆天山山区禾本科牧草物候区域差异及其驱动力分析[J]. 生态学报,2020,40(4):1281-1294.
- [14] 戴皖宁,王丽学, KHAN I,等. 秸秆覆盖和生物炭对玉米田地温和产量的影响[J]. 生态学杂志,2019,38(3):719-725.
- [15] 宋晓巍,李琳琳,李石,等. 沈阳地区浅层地温变化特征及播种期地温预报研究[J]. 气象与环境学报,2019,35(4):93-99.
- [16] 闫平,季生太,纪仰慧,等. 黑龙江省玉米春播期10 cm地温预测[J]. 农学学报,2021,11(6):78-89.
- [17] 周斌,李辑,李晶,等. 辽西地区地温预测方法探析[J]. 现代农业科技,2015(21):232.
- [18] 罗喜平,周明飞,汪超. 贵州省冬季地表(0 cm)温度预报探讨[J]. 贵州气象,2016,40(4):1-5.
- [19] 周义,覃志豪,包刚. 热红外遥感图像中云覆盖像元地表温度估算初论[J]. 地理科学,2013,33(3):329-334.
- [20] 桂沁园,王学林,曹明. 基于BP神经网络的巢湖市冬季浅层地温预报[J]. 现代农业科技,2018(12):190-192.
- [21] 贾东于,李开明,聂晓英,等. 基于小波变换与神经网络的石羊河流域夏季地温预测模型研究[J]. 冰川冻土,2020,42(2):412-422.
- [22] MADUAKO I,EBINNE E,ZHANG Y,et al. Prediction of land surface temperature(LST) changes within Ikom city in Nigeria using artificial neural network(ANN)[J]. International Journal of Remote Sensing Applications, 2016, 6: 96-107.
- [23] ZHAN S B, WANG X N, BAO Y F. The study of the land surface temperature retrieval with the proposed neural network model[C]//2008 International Conference on Neural Networks and Signal Processing,2008:530-534.
- [24] 申雨晨,李双双,延军平,等. 极点对称模态分解下陕西气候变化特征及影响因素[J]. 干旱区地理,2021,44(1):36-46.
- [25] 王德丽. 全球变暖环境下陕北、关中、陕南气候变化对比研究[D]. 西安:陕西师范大学,2011.
- [26] HE K, ZHANG X Y, REN S Q, et al. Delving deep into rectifiers; Surpassing human-level performance on imagenet classification[C]// Proceedings of the IEEE international conference on computer vision. 2015: 1026-1034.
- [27] 赵杨. 基于长短期记忆网络的土壤温度预测[D]. 长春:长春师范大学,2022.
- [28] MAAS A L, HANNUN A Y, NG A Y. Rectifier nonlinearities improve neural network acoustic models[C]// Proceedings of ICML. 2013: 3.
- [29] 鲁玉军,周世豪,胡小勇. 基于BP神经网络和小波神经网络的太阳辐射强度预测[J]. 软件工程,2023,26(1):5-8.