

## 基于 SPEI 的内蒙古东部干旱诊断与预测

赵紫竹<sup>1</sup>, 张宝林<sup>1,2,3\*</sup>, 潘丽杰<sup>1</sup>, 牛潘婷<sup>1</sup>, 郭建鹏<sup>1</sup>

(1.内蒙古师范大学 化学与环境科学学院, 内蒙古 呼和浩特 010020; 2.内蒙古节水农业工程研究中心, 内蒙古 呼和浩特 010020; 3.内蒙古自治区环境化学重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010020)

**摘要:**在气候变化背景下,开展粮食主产区干旱演变特征分析及预测研究具有重要意义。基于1960—2021年标准化降水蒸散指数(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI),对内蒙古东部42个气象站点进行凝聚聚类分析和M-K突变检验(Mann-Kendall Test),并利用LSTM(Long Short-Term Memory)和CNN(Convolutional Neural Networks)-LSTM,对不同时间尺度SPEI进行预测。结果表明:研究区以阿尔山—索伦—扎赉特旗一线为界分为南、北部旱区。近62年干旱变化可分为3阶段:20世纪80年代以前,南北旱情较为一致且旱情较轻;20世纪80年代到21世纪,南北旱情不同,南部出现了连旱;21世纪后,南北旱情变化较为一致,区域干旱频率增加,旱情加重。近62年,南部在春、夏、秋季有变干趋势,夏、秋季最为显著;北部在春、夏和秋季变干趋势较为一致,冬季则向湿润发展。在干旱预测中,LSTM和CNN-LSTM模型精度随时间尺度的增加而提高,LSTM模型优于CNN-LSTM模型。LSTM可以作为单一特征区域长期干旱预测的有效方法,为制定防旱、抗旱、治旱对策提供科学依据,以期减少因旱灾造成的损失。

**关键词:**内蒙古东部;聚类分析;干旱;LSTM;CNN-LSTM

**中图分类号:**Q948 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-6830(2023)07-0039-10

**Droughts diagnosis and prediction using SPEI in eastern Inner Mongolia.** ZHAO Zi-zhu<sup>1</sup>, ZHANG Bao-lin<sup>1,2,3\*</sup>, PAN Li-jie<sup>1</sup>, NIU Pan-ting<sup>1</sup>, GUO Jian-peng<sup>1</sup> (1. College of Chemistry and Environmental Sciences, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010020, China; 2. Inner Mongolia Water-saving Agriculture Engineering Research Center, Hohhot 010020, China; 3. Inner Mongolia Key Laboratory of Environmental Chemistry, Hohhot 010020, China). *Environmental Ecology*, 2023, 5(7), 39~48.

**Abstract:** Under the background of climate change, the study on the changes and forecast of droughts in major grain-producing areas is of great importance. In this paper, 42 meteorological stations were chosen to project droughts characteristics in eastern Inner Mongolia by SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index) for the period 1960—2021. Agglomerative clustering and Mann-Kendall Test were used to identify the spatial and seasonal peculiarities of drought characteristics, and LSTM and CNN-LSTM were adopted to predict drought trends at different timescales. The study area was divided into two droughts sub-regions: south and north sub-region, according to Aershan—Suolun—Jalaid Banner. Droughts changes in the last 62 years can be divided into three stages. Droughts in the two sub-regions showed similar and not severe patterns before 1980s, different patterns from 1980s to 2000s, and similar, frequent and severe patterns after 2000s. Seasonal (spring, summer and autumn) patterns, especially summer and autumn, showed intensification of droughts severity in the south sub-region. Seasonal patterns in spring, summer and autumn showed similar drying trends, but humid in winter in the north sub-region. In droughts prediction, LSTM and CNN-LSTM showed higher accuracy in larger timescale, but LSTM showed better performance than CNN-LSTM. Therefore, LSTM could be used to predict droughts hazard, vulnerability and risk in eastern Inner Mongolia, and could provide scientific basis for combating against droughts and reducing drought loss.

**Key words:** Eastern Inner Mongolia; clustering analysis; droughts; LSTM; CNN-LSTM

在气候变化背景下,干旱区的扩大和干旱化的加剧,对灾害风险管理发起了严重的挑战<sup>[1]</sup>,成为全球关注的问题。干旱发展缓慢,特征不易量化<sup>[2]</sup>。因此,干旱的量化研究有助于了解干旱的

时空特征,提高干旱监测和预报能力,制定干旱管理和应对策略,对防旱、抗旱具有重要意义<sup>[3]</sup>。

干旱类型可分为气象干旱、农业干旱、水文干旱和社会经济干旱等。持续、不正常的干燥天气会引

收稿日期:2023-03-08

基金项目:内蒙古自然科学基金项目(2022LHMS03009);内蒙古师范大学基本科研业务费专项资金(2022JBTD009)资助。

作者简介:赵紫竹(1998-),女,陕西榆林人,硕士生,主要从事环境遥感研究。

通讯作者:张宝林, E-mail: zhangbl@imnu.edu.cn。

发气象干旱,干旱程度可以用干旱指数进行定量评价<sup>[4,5]</sup>,如降水量、标准化降水蒸散指数(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI)<sup>[6-10]</sup>、帕尔默干旱指数(Palmer Drought Severity Index, PDSI)<sup>[11-14]</sup>、标准化降水指数(Standardized Precipitation Index, SPI)<sup>[9,15-17]</sup>和综合气象干旱指数(CI)<sup>[18,19]</sup>等。SPEI综合了降水和温度因素,通过气候水平衡与平均状态的偏离程度,对干旱进行表征<sup>[20,21]</sup>,既考虑了干旱对潜在蒸散发的敏感性,又考虑了多时间尺度的干旱评估方法,具有极强的适用性和独到的优势<sup>[22,23]</sup>,在中国也得到广泛的应用<sup>[24]</sup>。

关于干旱预测的模型很多,如灰色预测模型<sup>[25]</sup>、ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average Model)<sup>[26]</sup>、人工神经网络(ANN, Artificial Neural Network)<sup>[27,28]</sup>、支持向量机(SVM, Support Vector Machine)<sup>[29,30]</sup>、循环神经网络(RNN, Recurrent Neural Networks)<sup>[31]</sup>、长短时记忆神经网络(LSTM, Long Short-Term Memory)<sup>[32-36]</sup>、深度置信网络(Deep Belief Networks)<sup>[37,38]</sup>以及模型整合等<sup>[30,39]</sup>。杨慧荣等<sup>[40]</sup>将SPEI实际值与预测值进行对比,认为ANN模型的预测精度优于ARIMA模型。RNN具有短期记忆功能,但随着时间间隔的增大,存在梯度消失和爆炸问题<sup>[40,41]</sup>。LSTM是RNN的变体,通过输入门、遗忘门和输出门来确定信息的丢弃、更新和输出<sup>[42]</sup>,但可能会出现训练不稳定性、梯度消失的现象。利用卷积神经网络(CNN, Convolutional Neural Networks)可提取特征向量,形成时序序列<sup>[43]</sup>,再输入LSTM构造CNN-LSTM模型,可提高短期预测精度<sup>[44]</sup>。CNN-LSTM模型在多因素、非线性序列预测中表现良好。例如,大豆生长发育受气候、环境等多种因素影响,在产量预测中,CNN-LSTM模型预测性能优于CNN和LSTM<sup>[44]</sup>。

内蒙古东部是中国重要的农牧业区,干旱是对区域生态环境和社会发展影响最大的自然灾害之一,且干旱呈现加重趋势<sup>[43]</sup>。基于SPEI,研究内蒙古东部干旱演变的时空特征,利用LSTM和CNN-LSTM模型进行干旱的预测与评价,明确干旱历史演变规律及未来干旱发生的可能性,为御旱、抗旱工作提供科学依据。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区概况

内蒙古东部包括呼伦贝尔市、兴安盟、通辽市、

赤峰市(图1),国土总面积约为 $462.4 \times 10^3 \text{ km}^2$ 。气候类型主要为寒温带和中温带大陆性季风气候<sup>[45]</sup>,年均气温 $1.5 \sim 3.4 \text{ }^\circ\text{C}$ ,年均降水量 $345 \sim 628 \text{ mm}$ <sup>[20]</sup>。

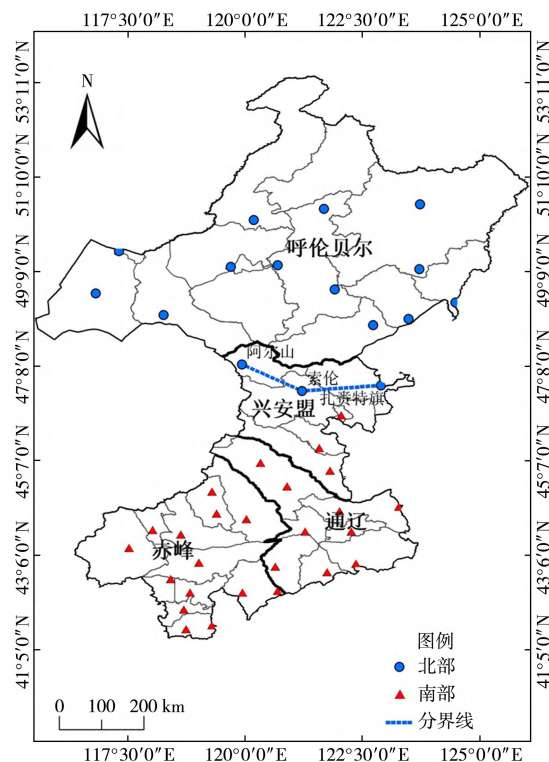


图1 气象站点分布及基于SPEI的凝聚层次聚类

Fig.1 Meteorological stations and SPEI-based agglomerative clustering

### 1.2 数据来源

数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),剔除缺失数据严重的站点,选取42个气象站点1960—2021年的月值气象数据(温度、降水量等),计算SPEI。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 SPEI计算

SPEI通过气候水平衡与平均状态的偏离程度表征干旱<sup>[10]</sup>。首先计算潜在蒸散发值(Potential Evapotranspiration, PET)<sup>[46]</sup>,基于月降水量与PET的差值,建立水分盈/亏累计序列,经标准正态分布转换,得到SPEI:

$$\text{SPEI} = W - (C_0 + C_1 W + C_2 W^2) / (1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3) \quad (1)$$

$$P = 1 - F(x) \quad (2)$$

$$F(x) = [1 + \alpha/(\beta - \gamma)]^{-1} \quad (3)$$

式中, $W$ 为概率加权矩; $F(x)$ 为log-logistic概率分布累积函数; $P$ 为标准分布函数;常数项 $C_0 = 2.515\ 517$ ,  $C_1 = 0.802\ 853$ ,  $C_2 = 0.010\ 328$ ,  $d_1 =$

1.432 788,  $d_2=0.1892\ 69$ ,  $d_3=0.001\ 308$ <sup>[4]</sup>;  $\alpha$  为尺度参数,  $\beta$  为形状参数,  $\gamma$  为位置参数, 可通过线性矩的方法拟合获得。当  $P \leq 0.5$  时,  $W = \sqrt{-2\ln(P)}$ ;  $P > 0.5$  时,  $W = \sqrt{-2\ln(1-P)}$ , SPEI 符号逆转。

计算 1、3、6、12、24 个月时间尺度的 SPEI, 得到 SPEI1、SPEI3、SPEI6、SPEI12 和 SPEI24, 用 5、8、11 月和次年 2 月的 SPEI 分别评价春季、夏季、秋季和冬季的干旱状况, 用 SPEI12 评价年际干旱变化。利用 Climate Indices<sup>[47]</sup> 计算 SPEI, 依据国家气象干旱等级标准 (GB/T 20481—2017)<sup>[48]</sup> 对干旱进行表征: 无旱,  $-0.5 < \text{SPEI}$ ; 轻旱,  $-1.0 < \text{SPEI} \leq -0.5$ ; 中旱,  $-1.5 < \text{SPEI} \leq -1.0$ ; 重旱,  $-2.0 < \text{SPEI} \leq -1.5$ ; 特旱,  $\text{SPEI} \leq -2.0$ 。

### 1.3.2 聚类分析

由于涉及气象站点较多, 基于 42 个站点 1960—2021 年 SPEI12 进行凝聚层次聚类, 减少研

究对象数量<sup>[49]</sup>。采用 ward 最小方差法计算样本间距离, 对 1960—2021 年 42 个气象站点的 SPEI12 相似性进行层次聚类分析<sup>[50]</sup>, 分类探讨干旱变化趋势。

### 1.3.3 Mann-Kendall 检验

采用 Mann-Kendall (M-K) 检验法对季节性 SPEI 变化进行分析。M-K 检验法不要求样本必须遵循某种形式的分布, 可避免少数异常值的干扰<sup>[20]</sup>。

### 1.3.4 CNN-LSTM 模型构建

利用 CNN 模型, 采用局部连接和共享权值方法, 交替使用卷积层和池化层, 自动提取有效特征向量<sup>[51,52]</sup>。LSTM 是 RNN 的延伸, 在隐藏模块中增加了遗忘门、输入门和输出门<sup>[34]</sup> (图 2)。遗忘门决定被保留或被遗忘的信息; 输入门用于更新单元格状态并决定需要更新哪些值; 输出门是一个过滤器, 根据单元格状态选择输出部分<sup>[53,54]</sup>。

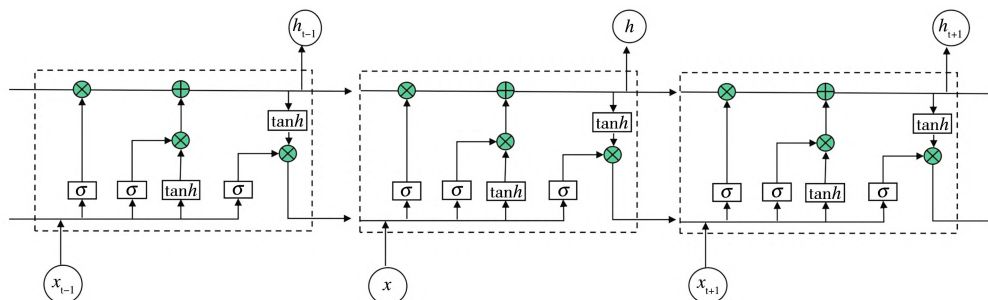


图 2 LSTM 模型结构

Fig.2 Structure of LSTM

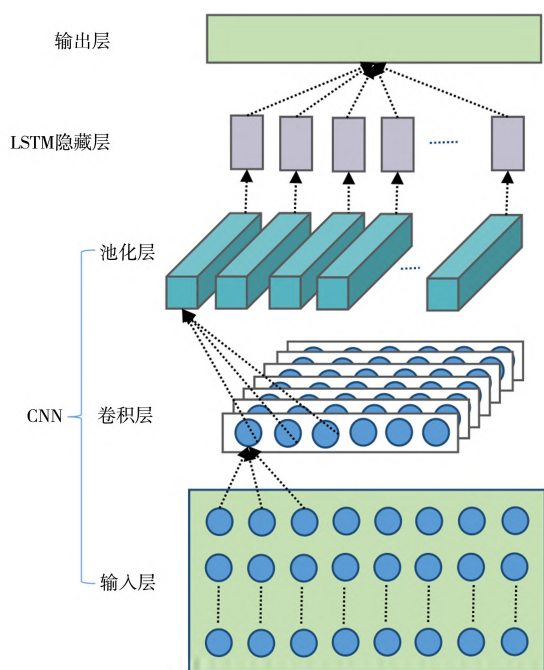


图 3 CNN-LSTM 结构图

Fig.3 Structure of CNN-LSTM

CNN 多用于图像特征提取, 而 LSTM 则用于处理时序数据。在 LSTM 隐藏层之前加入卷积层和池化层 (图 3), 构造 CNN-LSTM 模型。

### 1.3.5 模型评价

选用平均绝对误差 MAE (Mean Absolute Error)、均方根误差 RMSE (Root Mean Squared Error) 和决定系数 (R-Squared,  $R^2$ ) 对模型进行评价<sup>[55]</sup>。评价指标计算方法如下:

$$\text{MAE} = 1/n \sum_{i=1}^n |\hat{y}_i - y_i| \quad (4)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{1/n \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (5)$$

$$R^2(y, \hat{y}_i) = 1 - \left[ \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \right] / \left[ \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right] \quad (6)$$

式中,  $y_i$  为在时间  $i$  处的观测值;  $\hat{y}_i$  为在时间  $i$  处的预测值, 即 SPEI 值;  $\bar{y}$  为真实观测值的平均值;  $i$  为时间,  $n$  为样本数。

## 2 结果与分析

### 2.1 内蒙古东部地区气象干旱的年尺度评价

对研究区 SPEI12 进行凝聚层次聚类, 发现内蒙



古东部 42 个气象站点可以分为 2 个簇(图 4)。通过对 2 个簇站点的空间分析,以阿尔山—索伦—扎赉特旗一线为界,将所有站点分为北部旱区和南部旱区(图 1)。

北部旱区包括呼伦贝尔市和兴安盟北部,南部旱区包括通辽市、赤峰市和兴安盟中南部。

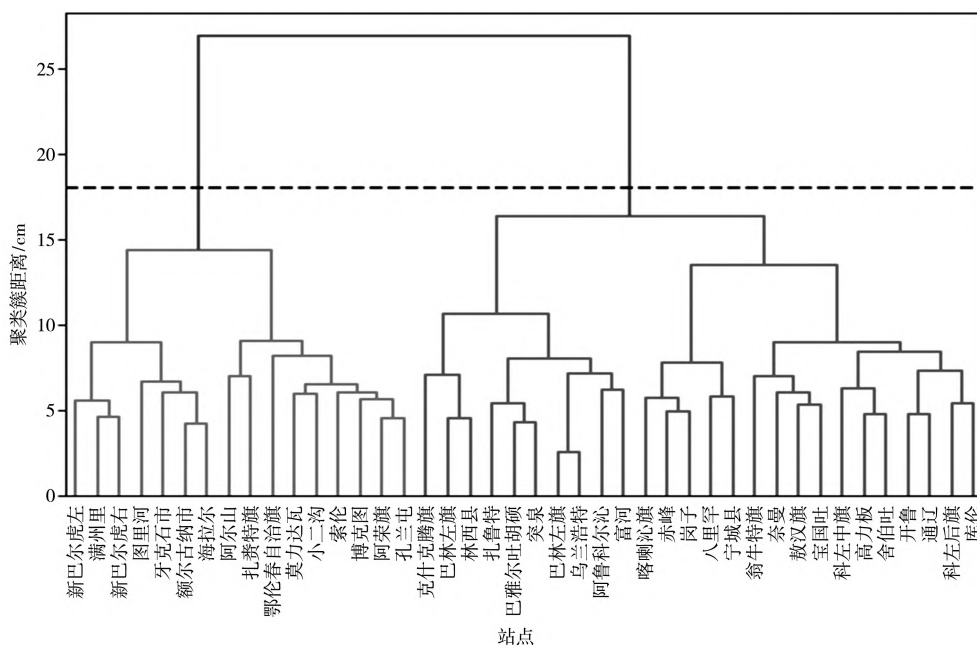


图 4 内蒙古东部 SPEI12 凝聚层次聚类

Fig.4 Agglomerative clustering dendrogram of SPEI12 in eastern Inner Mongolia

分区域计算年和季节尺度 SPEI,根据干旱等级划分标准<sup>[48]</sup>,南部区域干旱频率为 28.43%,高于北部的 22.47%,2 区均以中旱和轻旱频率占比

表 1 内蒙古东部不同区域的干旱频率分析

Table 1 Analysis of drought frequency in different regions of eastern Inner Mongolia

区域	频率/%				干旱频率/%
	特旱	重旱	中旱	轻旱	
南部	0	0.42	7.07	20.94	28.43
北部	0.14	1.39	7.35	13.59	22.47

较大(表 1)。

20 世纪 80 年代以前,南北部 SPEI 变化趋势较为一致,但南部 SPEI 变化幅度大于北部;干旱发生的年份较少(1968 年和 1972 年中旱),且干旱主要发生在南部。20 世纪 80 年代到 21 世纪,发生的多为轻度干旱,出现了南、北部旱情不一致现象,南部在 1980—1983 年、1988—1990 年出现了连旱,北部发生了多年轻旱。进入 21 世纪以后,旱情变化较为一致,区域干旱频率增加、旱情加重,21 世纪初出现了连旱,2007—2008 出现了特旱(图 5)。

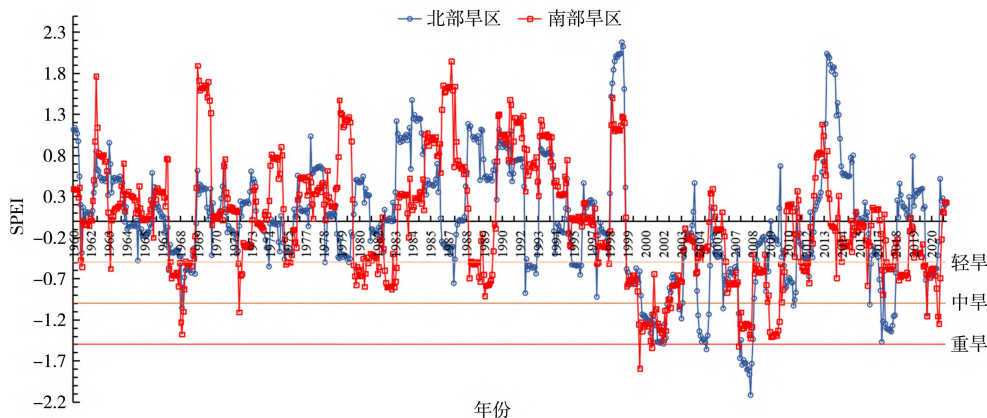


图 5 1960—2021 年内蒙古东部不同区域 SPEI12 的变化

Fig.5 SPEI12 changes in eastern Inner Mongolia from 1960 to 2021

## 2.2 内蒙古东部季节性干旱评价

根据内蒙古东部 42 个站点的干旱分区(图 1), 分别计算 SPEI 均值, 分析 1960—2021 年季节干旱特征(图 6)。

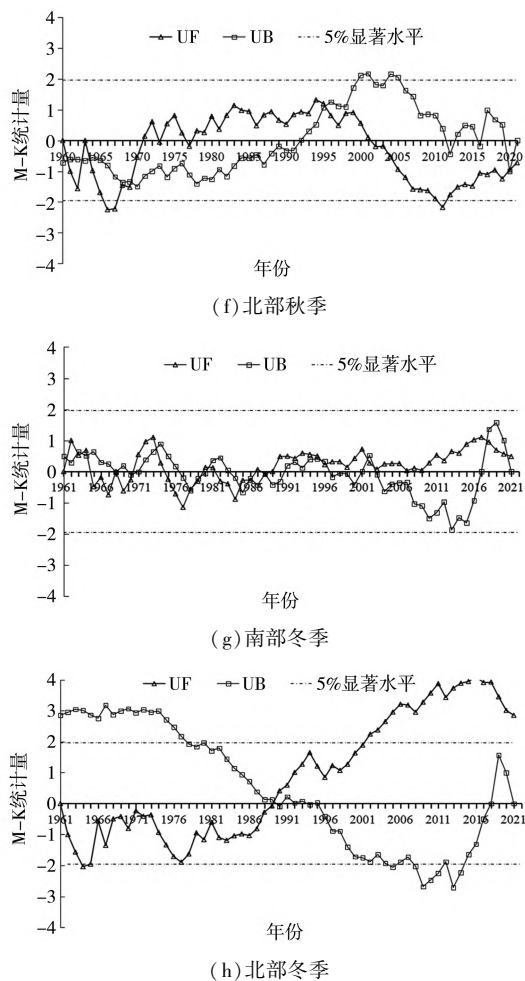
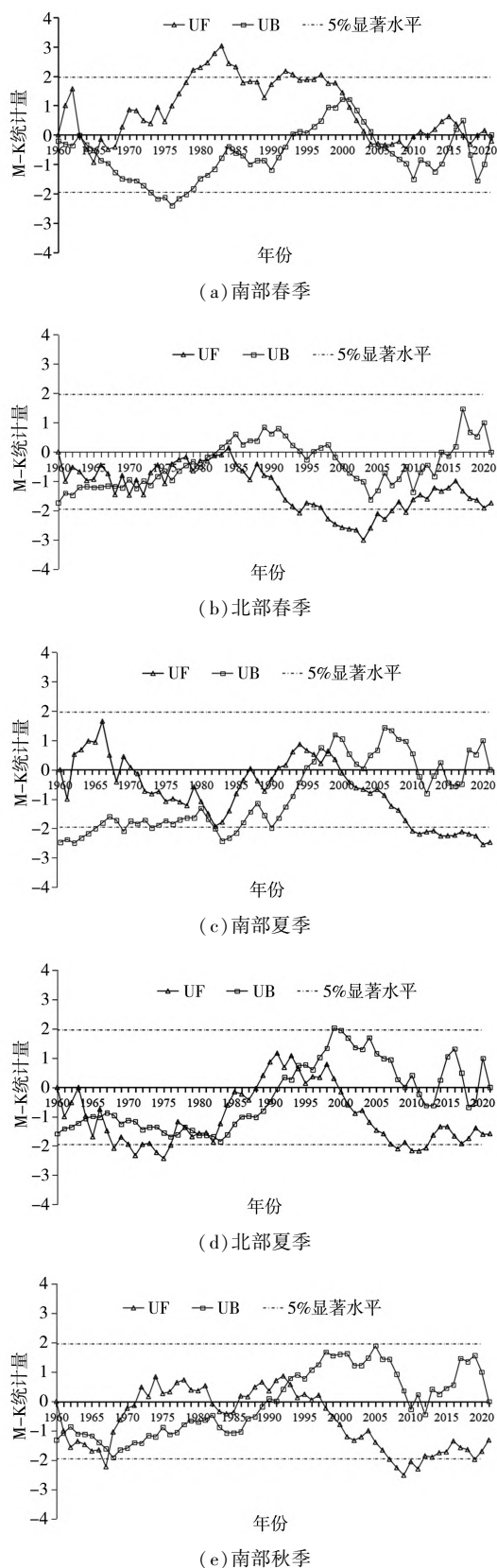


图 6 内蒙古东部季节 SPEI 的 M-K 突变检验

Fig.6 M-K test of seasonal SPEI in eastern Inner Mongolia

1969—2003 年,南部 UF 值增大,春季呈湿润化趋势,并在 1979—1985 年达到 5% 显著性水平;2000 年 SPEI 发生突变后,春季呈干旱化趋势。1984 年以前,北部春季 UF 值呈上升趋势,突变发生在 1980 年;1984 年后 UF 值呈下降趋势,北部趋向干旱化,并在 1997—2007 年达到 5% 的显著性水平。南、北部春季均出现过湿润—干旱的变化过程,且北部干旱化的发生早于南部(图 6)。

近 60 余年,南、北部 UF 值夏季变化规律较为一致(图 6)。南部夏季 UF 值大致呈降低—升高—降低的变化趋势,即气候呈干旱—湿润—干旱的变化过程,1999 年 SPEI 发生突变后,UF 值呈下降趋势,表明南部夏季向干旱化方向发展,并于 2010 年后呈现显著干旱化趋势( $\alpha=5\%$ ,  $\alpha$  为显著性水平)。北部夏季 UF 值也基本呈降低—升高—降低变化趋势,气候呈干旱—湿润—干旱的变化趋势;20 世纪 70 年代,北部 UF 值显著降低,1994 年发生突变后,UF 值呈降低趋势,2008—2012 年显著降低( $\alpha=$

5%),说明出现了明显的夏季干旱过程。

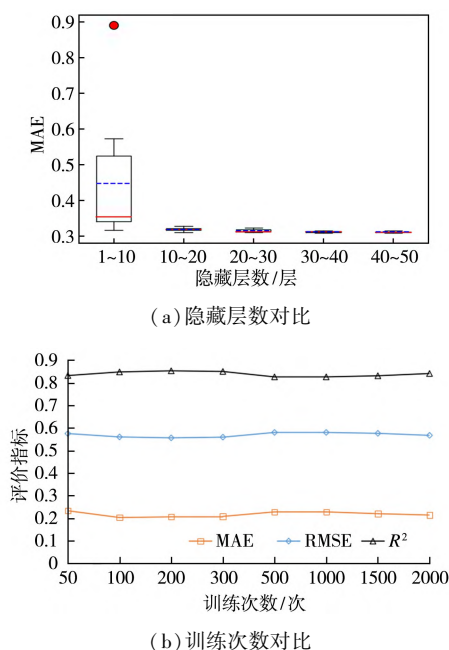
南部秋季 UF 值呈现降低—升高—降低变化趋势,且在 1992—1993 年发生突变后,下降趋势明显,2007—2011 年秋季干旱化趋势显著。北部秋季 SPEI 在 1992 年前基本呈上升趋势,此后出现下降趋势,且在 2011 年达到 5% 的显著性水平,此后干旱趋势有所缓解。近 60 余年,南、北部秋季 SPEI 变化规律较为一致(图 6)。

1960—2021 年,南部冬季 SPEI 的 UF 值波动相对较小,表明冬季干湿变化趋势不明显。北部冬季 UF 值呈波动上升趋势,1990 年发生突变,2001 年后湿润化趋势显著(图 6)。

## 2.3 基于 SPEI-LSTM 干旱预测

### 2.3.1 SPEI 模型优化

(1) LSTM 模型优化:利用 LSTM 进行 SPEI1、SPEI3、SPEI6、SPEI9、SPEI12 和 SPEI24 拟合建模。对输入数据进行归一化处理 (MinMaxScaler),使用 Adam 优化器,选择 relu 函数作为激活函数,搭建 LSTM 网络。设置迭代次数为 200,隐藏层数量为 40 时,MAE 值最低(图 7)。经过交叉验证,将 70% 的数据作为训练集,30% 的数据作为测试集,LSTM 预测值与 SPEI 真实值吻合程度较高,不同时间尺度的 LSTM 模型预测的评价结果如图 7 所示。



注:图中圆圈为异常值。

图 7 LSTM 模型参数设置

Fig.7 Parameters of LSTM model

(2) CNN-LSTM 模型优化:通过反复测试,设置 time\_step=1,卷积核个数为 64 个(kernel\_size=5),

迭代次数为 100。选择最大池化和最佳卷积核尺寸,完成模型构建(图 8)。当池化层中卷积核大小为 15 时, $R^2$  最大为 0.772。交叉验证中,70% 的数据作为训练集,30% 的数据作为测试集。

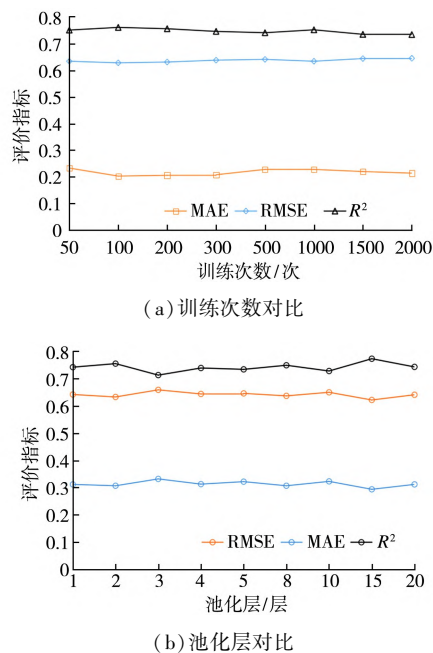


图 8 CNN-LSTM 模型的参数设置

Fig.8 Parameters of CNN-LSTM model

通过对不同时间尺度的 LSTM 模型预测结果进行评价发现,2 个区域的 LSTM 模型在 24 个月尺度的预测精度最高,南部模型的  $R^2=0.881$ ,北部模型的  $R^2=0.928$ 。随着时间尺度的增加, $R^2$  增大,预测精度提高,说明 LSTM 模型的预测精度与时间尺度

表 2 不同时间尺度 LSTM 与 CNN-LSTM 模型评价

Table 2 Tests of LSTM and CNN-LSTM with different time scales

模型	区域	评价指标	SPEI1	SPEI3	SPEI6	SPEI9	SPEI12	SPEI24
LSTM	南部	RMSE	0.910	0.797	0.748	0.624	0.502	0.419
		MAE	0.650	0.490	0.396	0.271	0.179	0.121
		$R^2$	-0.191	0.354	0.407	0.558	0.767	0.881
	北部	RMSE	0.954	0.873	0.789	0.684	0.553	0.486
		MAE	0.731	0.604	0.457	0.339	0.200	0.172
		$R^2$	-0.098	0.293	0.491	0.675	0.857	0.928
CNN-LSTM	南部	RMSE	0.881	0.810	0.765	0.657	0.55	0.505
		MAE	0.612	0.510	0.447	0.319	0.247	0.210
		$R^2$	-0.082	0.310	0.353	0.457	0.664	0.749
	北部	RMSE	0.941	0.855	0.812	0.730	0.635	0.595
		MAE	0.724	0.592	0.504	0.408	0.308	0.290
		$R^2$	-0.039	0.349	0.430	0.580	0.750	0.832



密切相关;LSTM 模型比 CNN-LSTM 模型的预测精度高,SPEI9、SPEI12、SPEI24 3 个时间尺度 LSTM 模型的预测精度优于 CNN-LSTM 模型(表 2)。结果表明,LSTM 可较高精度地预测 SPEI 单一特征的变化情况,比 CNN-LSTM 模型的预测效果好,适用于单一特征的气象干旱预测。

### 2.3.2 基于 LSTM 模型的旱情预测

时间尺度为 12 个月 SPEI 预测表明,2021—2022 年内蒙古东部气候将会介于正常和湿润之间,旱情影响较小。基于 LSTM 模型对 SPEI12 进行预测表明,测试真实值与预测值重合较好(图 9)。南部预测 2022 年  $SPEI12 = 0.351$ ,北部预测 2022 年  $SPEI12 = 0.062$ (表 3),结合干旱等级划分,2022 年内蒙古东部属无旱年份。

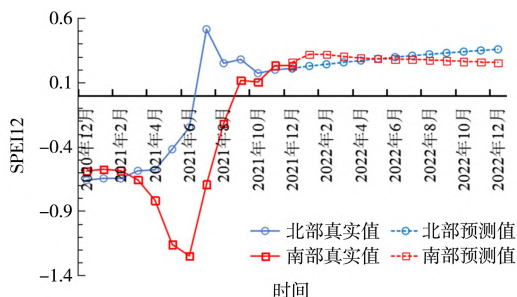


图 9 年尺度 SPEI 预测

Fig.9 SPEI forecasts with a time scale of 12 months

表 3 不同区域 2021—2022 年的 SPEI12 预测

Table 3 SPEI12 forecasts in 2021 and 2022 in different regions

站点	2021 年真实值	2021 年预测值	2022 年预测值
南部	0.228	0.256	0.351
北部	0.208	0.206	0.062

基于 SPEI24 长时间序列数据表明,内蒙古东部由湿润向干旱转变(图 10)。SPEI24 真实值与预测

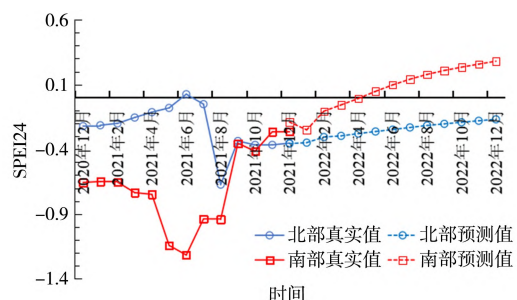


图 10 24 个月尺度的 2021 和 2022 年 SPEI 预测

Fig.10 SPEI forecasts with a time scale of 24 months in 2021 and 2022

值拟合模型  $R^2$  大于 0.88,预测 2022 年南部  $SPEI24 = 0.410$ ,北部  $SPEI24 = -0.215$ (表 4)。根据干旱等级划分可知,2022 年内蒙古东部为无旱年份。基于 SPEI24 干旱状况预测与 SPEI12 的预测结果相同,说明 SPEI 的预测相对可靠,可为政府提供有效的信息。

表 4 不同区域 2021 和 2022 年的 SPEI24 预测

Table 4 SPEI24 forecasts in 2021 and 2022 in different regions

站点	2021 年真实值	2021 年预测值	2022 年预测值
南部	-0.263	-0.152	0.410
北部	-0.353	-0.342	-0.215

## 3 讨论

内蒙古是干旱受灾严重的区域之一<sup>[56]</sup>。与历史旱情相比,本研究表明 SPEI 可较好地表征内蒙古东部旱情的变化,且与 SPEI 适用性研究相一致<sup>[20,57,58]</sup>。SPEI 反映了典型的干旱年份,如 1968、1972、2000—2001、2004、2007、2017 年等。东北地区干旱频率的增加,与降水减少和气温升高密切相关<sup>[59,60]</sup>,而近 30 年东北地区水资源呈减少趋势<sup>[61]</sup>,夏季异常的高温少雨使旱情加重(如 2010 年)<sup>[62]</sup>。干旱的发生也与地理位置有关,在内蒙古东部,海洋气团已成强弩之末,东南季风难以到达<sup>[63]</sup>。文献<sup>[64]</sup>的研究表明,东亚地区 40%~50%降水量是由东亚季风决定的,东亚夏季风于 1986 年经历了一次突变,这与本研究区北部干旱频率开始增加的时间一致。此外,干旱少雨背景下出现环流异常,也会造成异常干旱(如 2004 年春季到初夏)<sup>[65]</sup>。2017 年呼伦贝尔的干旱研究表明,只考虑降水的气象干旱指数无法反映高温等其他气象条件的影响,综合气象干旱指数与监测结果差异较大<sup>[66]</sup>。有研究认为,干旱发生时蒸散量还可能被低估,可能引发骤旱、热浪和农业减产<sup>[67,68]</sup>。因此,在气候变暖背景下,忽略了蒸发的干旱指数,不适合内蒙古东部地区<sup>[23]</sup>,SPEI 则适用性较好<sup>[4,23,66]</sup>。

内蒙古东部可分为春旱区和春夏旱区<sup>[25]</sup>。本研究表明,研究区夏、秋季干旱化趋势明显,其次是春季,而冬季有湿润化趋势。文献<sup>[69]</sup>的研究指出,该区域 NDVI 变化对干旱的响应表明夏旱较为严重,夏季干旱显著加重,秋季次之<sup>[58]</sup>,这与本研究结论基本一致。此外,研究表明东北地区干旱持续的时间由过去以短时段为主,发展成为春夏连旱、夏

秋连旱<sup>[70]</sup>,如2004年的春夏连旱<sup>[65]</sup>。

在气候变暖背景下,我国干旱面积增加,东北大部分地区成为干旱异常区<sup>[71]</sup>,干旱面积呈显著增加趋势<sup>[72]</sup>。SPEI的应用表明,内蒙古东部的干旱化趋势也较为显著<sup>[58,69]</sup>。进入21世纪以后,研究区南、北部旱情变化较为一致,区域干旱频率增加、旱情加重,甚至出现了连旱,这一结论得到了众多研究<sup>[20,23,58,69,73-75]</sup>的支持。1949—2017年东北地区旱灾发生频率增加,几次严重干旱事件都发生在2000年以后,连年干旱造成的影响越来越深远<sup>[70]</sup>,与本研究的结论具用高度一致性。1970—2000年气候干湿状况的研究表明,内蒙古东部兴安盟和呼伦贝尔持续变干,赤峰表现为干旱—湿润—干旱交替变化趋势<sup>[75]</sup>。呼伦贝尔市干燥度也呈增加趋势<sup>[76]</sup>,1960—2015年SPEI表明,呼伦贝尔市呈现不显著的干旱化趋势,干旱频率为33%;进入21世纪后,极端干旱发生频率增加明显<sup>[73]</sup>。谢岷等<sup>[77]</sup>研究认为,赤峰、通辽南部干旱频发,旱灾加重趋势明显;而呼伦贝尔、兴安盟地区呈现变湿趋势,与本研究的结论不完全一致。也有研究表明,近20年内蒙古干旱程度有所缓解<sup>[78]</sup>,与本研究结论不一致,可能是研究的时间尺度不同造成的。

研究表明,LSTM模型能够较为精确地预测旱情<sup>[42,79]</sup>。本研究基于SPEI24的LSTM模型,在内蒙古东部南、北区域的评价指标RMSE、MAE和 $R^2$ 分别为0.419、0.121、0.881和0.486、0.172、0.928,较CNN-LSTM模型在南部的相应指标分别提高了8.6%、8.9%、13.2%,在北部的相应指标分别提高了10.9%、11.8%、9.6%。由基于LSTM模型的干旱预测可知,SPEI的预测精度随着时间尺度的增大而提高,这与其他学者<sup>[42,79,80]</sup>对LSTM的评价结论一致。本研究表明,当输入为单一SPEI特征时,SPEI9、SPEI12、SPEI24 3个时间尺度LSTM模型的预测精度优于CNN-LSTM模型,预测误差相对更小,表明LSTM可较好地预测SPEI单一特征的变化,适用于影响因素较少的干旱预测。

#### 4 结论

在气候变化背景下,开展内蒙古东部干旱演变特征分析及预测研究具有重要的现实意义。在42个站点SPEI凝聚聚类的基础上,分区域分析季节性SPEI变化趋势,并基于LSTM和CNN-LSTM进行干旱预测。研究表明,1960—2021年内蒙古东部旱情变化可分为3阶段:20世纪80年代以前,南、北旱

情较为一致,干旱发生较少;20世纪80年代到21世纪多发轻旱,南、北部旱情不同,南部出现了连旱;进入21世纪以后,南、北部旱情变化较为一致,干旱频率增加、旱情加重。南、北2区域近62年春季均出现过湿润—干旱的变化过程,且北部干旱化趋势的发生早于南部。南、北部夏、秋季干旱变化过程较为一致,20世纪90年代后夏季呈现干旱化趋势,南部干旱化趋势更显著。南部冬季SPEI变化不显著,但北部冬季则湿润化趋势明显。基于SPEI24的干旱预测表明,LSTM表现优于CNN-LSTM,且在北部的适用性更好,能够更好地描述单一特征的动态和非线性变化规律,可用于指导防旱、抗旱政策的制定。

#### 参考文献

- [1] KREIBICH H, VAN LOON A F, SCHROTER K, et al. The challenge of unprecedented floods and droughts in risk management [J]. *Nature*, 2022, 608 (7921): 80-86.
- [2] 张乐园, 王弋, 陈亚宁. 基于SPEI指数的中亚地区干旱时空分布特征 [J]. *干旱区研究*, 2020, 37 (2): 331-340.
- [3] 王青, 严登华, 翁白莎, 等. 北美洲干旱灾害应对策略及其对中国的启示 [J]. *干旱区地理*, 2012, 35 (2): 332-338.
- [4] 沈国强, 郑海峰, 雷振锋. SPEI指数在中国东北地区干旱研究中的适用性分析 [J]. *生态学报*, 2017, 37 (11): 3787-3795.
- [5] 张菡, 张喜亮, 李金建, 等. 基于SPEI的四川省盆地区季节性干旱时空变化特征分析 [J]. *干旱地区农业研究*, 2018, 36 (5): 242-250.
- [6] 李增. 东北地区干旱特征及预测模型研究 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2021.
- [7] 蔡思扬, 左德鹏, 徐宗学, 等. 基于SPEI干旱指数的东北地区干旱时空分布特征 [J]. *南水北调与水利科技*, 2017, 15 (5): 15-21.
- [8] 张玉静, 王春乙, 张继权. 基于SPEI指数的华北冬麦区干旱时空分布特征分析 [J]. *生态学报*, 2015, 35 (21): 7097-7107.
- [9] 杜波波, 王宁, 林克剑. 基于SPI/SPEI的锡林郭勒盟干旱变化特征 [J]. *水电能源科学*, 2022, 40 (4): 14-18.
- [10] VICENTE-SERRANO S M, BEGUERIA S, LOPE-MORENO J I. A multiscale drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index [J]. *Journal of Climate*, 2010, 23 (7): 1696-1718.
- [11] 刘庚山, 郭安红, 安顺清, 等. 帕默尔干旱指标及其应用研究进展 [J]. *自然灾害学报*, 2004, 13 (4): 21-27.
- [12] 胡嘉佳, 赵磊. 修正的帕尔默干旱指数在昆明地区的应



- 用研究[J].水利技术监督,2020(1):181-184.
- [13] 范嘉泉,郑剑非.帕尔默气象干旱研究方法介绍[J].气象科技,1984(1):63-71.
- [14] PALMER W C. Meteorological drought[R]. Washington D. C.: U.S. Weather Bureau, 1965.
- [15] 林盛吉,许月萍,田烨,等.基于 Z 指数和 SPI 指数的钱塘江流域干旱时空分析[J].水力发电学报,2012,31(2):20-26.
- [16] 张旭煜.基于 SPI 和 SPEI 中国秋季干旱检测与归因[D].南京:南京信息工程大学,2022.
- [17] MCKEE T B, DOESKEN N J, KLEIST J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C]. Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, 1993.
- [18] 王盈.五种干旱指数在呼和浩特市地区的适用性研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2020.
- [19] 袁志伟.基于 CI 指数的阿克苏市气象干旱分析[J].广东水利水电,2021(3):35-37.
- [20] 彭健.内蒙古东部气象干旱时空演变特征及预估[D].呼和浩特:内蒙古师范大学,2021.
- [21] XU D, ZHANG Q, DING Y, et al. Application of a hybrid ARIMA-LSTM model based on the SPEI for drought forecasting[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(3):4128-4144.
- [22] DIKSHIT A, PRADHAN B, HUETE A. An improved SPEI drought forecasting approach using the long short-term memory neural network[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 283(10):111979.
- [23] 关祥琪.内蒙古东部三市一盟干旱发生规律及干旱指标适用性研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2018.
- [24] 王林,陈文.标准化降水蒸散指数在中国干旱监测的适用性分析[J].高原气象,2014,33(2):423-431.
- [25] 李晶.内蒙古自治区干旱灾害时空分布规律及预测研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2010.
- [26] 白致威,张雷,王杰,等.基于 ARIMA 模型的云南气象干旱预测研究[J].人民长江,2015,46(15):6-9.
- [27] VIDYARTHI V K, JAIN A. Knowledge extraction from trained ANN drought classification model[J]. Journal of Hydrology, 2020, 585(3):124804.
- [28] KAUR A, SOOD S K. Deep learning based drought assessment and prediction framework[J]. Ecological Informatics, 2020, 57(9):101067.
- [29] 华亚婕.基于 GWO-DE-SVM 模型的降水预测研究[D].南京:南京信息工程大学,2022.
- [30] BALTI H, ABBES A B, MELLOULI N, et al. Big data based architecture for drought forecasting using LSTM, ARIMA, and Prophet: Case study of the Jiangsu Province, China[C]. 2021 International Congress of Advanced Technology and Engineering (ICOTEN). IEEE, 2021:1-8.
- [31] TSCHAND A. Semi-supervised machine learning analysis of crop color for autonomous irrigation[J]. Smart Agricultural Technology, 2023, 3:100116.
- [32] DIKSHIT A, PRADHAN B, HUETE A. An improved SPEI drought forecasting approach using the long short-term memory neural network[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 283(10):111979.
- [33] ZHANG N, DAI X, EHSAN M A, et al. Development of a drought prediction system based on long short-term memory networks (LSTM), Cham, 2020[C]. Cairo: Springer International Publishing, 2020.
- [34] DIKSHIT A, PRADHAN B, ALAMRI A M. Long lead time drought forecasting using lagged climate variables and a stacked long short-term memory model[J]. Science of The Total Environment, 2021, 755(Pt2):142638.
- [35] LI Y, WANG B, GONG Y, et al. Drought assessment based on data fusion and deep learning[J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2022, 57(17):1-11.
- [36] KRATZERT F, KLOTZ D, BRANDSTETTER J, et al. Using LSTMs for climate change assessment studies on droughts and floods[C]. NeurIPS 2019: Vancouver, Canada, 2019.
- [37] AGANA N A, HOMAIFAR A. A deep learning based approach for long-term drought prediction[C]. SoutheastCon 2017, 2017.
- [38] XU L, MO K C. A preliminary study of deep learning based drought forecast[C]. 44th NOAA Annual Climate Diagnostics and Prediction Workshop: Durham, NC, 2019.
- [39] XU D, ZHANG Q, DING Y, et al. Application of a hybrid ARIMA-LSTM model based on the SPEI for drought forecasting[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(3):4128-4144.
- [40] 杨慧荣,张玉虎,崔恒建,等. ARIMA 和 ANN 模型的干旱预测适用性研究[J]. 干旱区地理, 2018, 41(5):945-953.
- [41] 张建海,张棋,许德合,等. ARIMA-LSTM 组合模型在基于 SPI 干旱预测中的应用——以青海省为例[J]. 干旱区地理, 2020, 43(4):1004-1013.
- [42] 张建海,张棋,许德合,等. EBK 和 LSTM 模型在气象干旱时空预测中的应用[J]. 人民黄河, 2020, 42(8):77-82.
- [43] YANG Z, WEI Y, FU G, et al. Decreased precipitation in the late growing season weakens an ecosystem carbon sink in a semi-arid grassland[J]. Journal of Applied Ecology, 2021, 58(10):2101-2112.
- [44] SUN J, DI L, SUN Z, et al. County-level soybean yield prediction using deep CNN-LSTM model[J]. Sensors, 2019, 19(20):4363.

- [45] 郭佳. 基于 3S 技术的内蒙古东部玉米热量资源利用评价[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2021.
- [46] THORNTHWAITE C W. An approach toward a rational classification of climate[J]. *Soil Science*, 1948, 66(1): 55-94.
- [47] ADAMS J. Climate\_indices, an open source Python library providing reference implementations of commonly used climate indices[CP/OL]. (2023-1-12). [https://github.com/monocongo/climate\\_indices](https://github.com/monocongo/climate_indices).
- [48] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 气象干旱等级(GB/T 20481—2017)[S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2017.
- [49] 李艳红, 葛刚, 胡春华, 等. 基于聚类分析和因子分析的鄱阳湖流域水质时空变化特征及污染源分析[J]. 南昌大学学报(理科版), 2016, 40(4): 360-365.
- [50] 蹇诗婕, 卢志刚, 姜波, 等. 基于层次聚类方法的流量异常检测[J]. 信息安全研究, 2020, 6(6): 474-481.
- [51] 陈英义, 龚川洋, 刘烨琦, 等. 基于 FTVGG16 卷积神经网络的鱼类识别方法[J]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 223-231.
- [52] LECUN Y, BOTTOU L, BENGIO Y, et al. Gradient-based learning applied to document recognition[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1998, 86(11): 2278-2324.
- [53] 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.
- [54] 武双新. 基于 LSTM 的气温数据建模研究[J]. 数据通信, 2021(2): 47-51.
- [55] 许德合, 张棋, 黄会平. ARIMA-SVR 组合模型在基于标准化降水指数干旱预测中的应用[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(2): 276-282.
- [56] 黄会平. 1949—2005 年全国干旱灾害若干统计特征[J]. 气象科技, 2008, 36(5): 551-555.
- [57] 刘珂, 姜大膀. 基于两种潜在蒸散发算法的 SPEI 对中国干湿变化的分析[J]. 大气科学, 2015, 39(1): 23-36.
- [58] 张煦庭, 潘学标, 徐琳, 等. 基于降水蒸发指数的 1960—2015 年内蒙古干旱时空特征[J]. 农业工程学报, 2017, 33(15): 190-199.
- [59] 马柱国, 符淙斌. 1951—2004 年中国北方干旱化的基本事实[J]. 科学通报, 2006, 51(20): 2429-2439.
- [60] 马柱国, 任小波. 1951—2006 年中国区域干旱化特征[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(4): 195-201.
- [61] 李萌, 申双和, 褚荣浩, 等. 近 30 年中国农业气候资源分布及其变化趋势分析[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(21): 1-11.
- [62] 陈廷芝, 尤莉, 古月, 等. 2010 年夏季内蒙古干旱高温成因分析[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(1): 88-92.
- [63] 李明, 王贵文, 张莲芝. 基于 SPEI 的中国东北地区干旱分区及其气候特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(6): 65-70.
- [64] PEI F, WU C, QU A, et al. Changes in extreme precipitation: A case study in the middle and lower reaches of the Yangtze River in China[J]. *Water*, 2017, 9(12): 943.
- [65] 马清霞, 格日勒, 王星晨, 等. 2004 年内蒙古东部农区异常干旱影响因子分析[C]//中国气象学会. 中国气象学会 2005 年年会论文集. 苏州: 2005.
- [66] 曲学斌, 金林雪, 王颖, 等. 2017 年春夏呼伦贝尔草原干旱过程多种监测指数对比分析[J]. 气象科技, 2019, 47(1): 163-170.
- [67] ZHAO M, A G, LIU Y, et al. Evapotranspiration frequently increases during droughts[J]. *Nature Climate Change*, 2022, 12(11): 1024-1030.
- [68] PASCOLINI-CAMPBELL M. Soil and plants lose more water under drought[J]. *Nature Climate Change*, 2022, 12(11): 969-970.
- [69] 杨舒畅, 杨恒山. 1982—2013 年内蒙古地区干旱变化及植被响应[J]. 自然灾害学报, 2019, 28(1): 175-183.
- [70] 李蓉, 辛景峰, 杨永民. 1949—2017 年东北地区旱灾时空规律分析[J]. 水利水电技术, 2019, 50(S2): 1-6.
- [71] 刘晓云, 李栋梁, 王劲松. 1961—2009 年中国区域干旱状况的时空变化特征[J]. 中国沙漠, 2012, 32(2): 473-483.
- [72] 翟盘茂, 邹旭恺. 1951—2003 年中国气温和降水变化及其对干旱的影响[J]. 气候变化研究进展, 2005, 1(1): 16-18.
- [73] 迟道才, 沙炎, 陈涛涛, 等. 基于标准化降水蒸散指数的干旱敏感性分析——以呼伦贝尔市为例[J]. 沈阳农业大学学报, 2018, 49(4): 433-439.
- [74] 佟斯琴. 气候变化背景下内蒙古地区气象干旱时空演变及预估研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2019.
- [75] 张存厚, 王明玖, 李兴华, 等. 近 30 年来内蒙古地区气候干湿状况时空分布特征[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(8): 70-75.
- [76] 林聪. 呼伦贝尔市近 57 年干燥度变化特征分析[J]. 新农业, 2020(22): 13-14.
- [77] 谢岷, 高聚林, 孙继颖, 等. 基于 SPEI 指数的内蒙古多时空尺度干旱特征分析[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(6): 140-146.
- [78] 汪士为. 近 20 年内蒙古干旱时空动态及其对气候、蒸散发变化的响应[J]. 水土保持研究, 2022, 29(4): 231-239.
- [79] 胡小枫, 赵安周, 相恺政, 等. LSTM 模型在京津冀干旱预测应用中的研究[J]. 西安理工大学学报, 2022, 38(3): 356-365.
- [80] 李艳玲, 巩雅杰. 基于驱动分析的 LSTM 干旱预测模型研究[J]. 数学的实践与认识, 2022, 52(5): 92-102.