

# 基于历法的冬季输水气象特征指标相关性研究

练继建<sup>1,2</sup>, 张玥<sup>1,2</sup>, 赵新<sup>1,2</sup>

(1. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300350; 2. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300350)

**摘要:** 气象是长距离输水渠道冬季安全运行的重要影响因素, 预测影响冰情产生和发展的冬季输水气象特征指标是实现渠道冬季安全高效输水的一个重点。通过探索中国传统历法在辐射、气温分析中的作用, 以南水北调中线北段沿线邢台站、保定站和北京站为研究对象, 对比不同历法下入冬前气温与冬季输水气象特征指标间相关性的优劣, 并利用 LSTM 预测模型对公历、干支历和阴历 3 种坐标系下冬季输水气象特征指标进行预测, 来研究不同历法对冬季输水气象特征指标分析和预测的影响。结果表明: 阴历坐标系下入冬前气温与冬季输水气象特征指标相关性更强; 采用阴历在构建气象、冰情预测模型的过程中, 较公历、干支历具有显著的优越性, 可显著提高预测模型的准确性。

**关键词:** 历法; 冬季输水; 气象特征指标; LSTM 预测模型; 南水北调工程

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2022)04-0108-09

## Correlation study of meteorological characteristic indices of winter water conveyance based on different calendars

LIAN Jijian<sup>1,2</sup>, ZHANG Yue<sup>1,2</sup>, ZHAO Xin<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

**Abstract:** Meteorology is an important factor that affects the safe operation of long-distance water conveyance channels, the prediction of the meteorological characteristic indices that affects the ice generation and development is critical for safe and efficient water conveyance in winter. To explore the traditional Chinese calendar's role in the analysis of radiation and temperature, taking Xingtai, Baoding and Beijing stations in the South-to-North Water Diversion Project as research objects, this study compares the correlation between the pre-winter temperature and the characteristic indices under different calendars. Then the LSTM model is used to predict the characteristic indices under three different systems: the Gregorian calendar, the Sexagenary cycle calendar and the lunar calendar, so as to examine their influences on the analysis and prediction of the characteristic indices. The results show that the correlation between pre-winter temperature and characteristic indices is stronger in lunar calendar system, and the meteorology and ice prediction model has better accuracy and superiority in the lunar calendar than in the Gregorian and the Sexagenary cycle calendar.

**Key words:** calendar; water conveyance in winter; meteorological characteristic index; LSTM prediction model; South-to-North Water Diversion Project

## 1 研究背景

南水北调中线工程是解决我国水资源分布不均问题的战略性特大型跨流域调水工程, 提高南水北调中线工程冬季输水效率迫在眉睫<sup>[1-4]</sup>。辐射和气

温是影响水温及冰情变化的重要因素<sup>[5-8]</sup>, 其中冬季输水气象特征指标是反映冰情产生和发展的重要指标<sup>[9-11]</sup>, 常见的冬季输水气象特征指标有最低气温出现日、气温稳定转负日及稳定负温持续时间等。对于河渠水流而言, 当气温稳定低于 0℃ 后, 水体处

收稿日期: 2022-04-15; 修回日期: 2022-06-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51909186、U20A20316)

作者简介: 练继建(1965-), 男, 福建建瓯人, 博士, 教授, 主要从事工程水力学与水利水(风)电工程安全研究。

通讯作者: 赵新(1984-), 男, 辽宁开原人, 讲师, 主要从事输水工程水动力学、冰水动力学仿真和控制研究。

于持续失热的状态,冰情开始产生、发展并最终逐渐趋于稳定;当气温升高转正时,水体吸收热量逐渐升温,进入开河期。在最低气温日前后冰情发展较为迅速,可以反映出整个冰期的发展强度。更准确地了解辐射及气温的变化规律并对气象特征指标进行预测对于提高冬季输水效率有着重要意义<sup>[12-14]</sup>。

现有的冬季输水气象特征指标分析及预测研究基本都建立在公历时间坐标系上,多年来中国传统历法在气象、水文、农业和生活中的应用经验证明其在气象规律分析及预测中可能有更好的表现,这为开展气象特征指标预测提供了新思路<sup>[15]</sup>。现在世界上常用的历法有许多,如公历、伊斯兰历、佛历、伊朗历和农历等<sup>[16-17]</sup>,我国常用历法为公历、阴历、干支历和农历<sup>[18]</sup>。阴历年称为平均历年,以月相朔望变化周期为一个月,地月关系的变化对小区域气象影响很大;干支历为阳历,将太阳回归年划分为二十四节气,依据历年气候变化总结划分,更加直观地表现了一年四时气候的进展与演变,如春分、秋分、夏至和冬至反映了太阳高度的变化;农历为阴阳历,是基于天文运行规律的、适应于我国气候气象变化的历法<sup>[19-20]</sup>,阴历和阳历两部分分别运算同时通过设置闰月来进行协调<sup>[21-22]</sup>。

冬至日作为干支历的起点<sup>[23]</sup>,在传统气候变化预测中有重要意义。如“冬至在月头,大寒年夜交;冬至在月中,天寒也无霜;冬至在月尾,大寒正二月。”描述了冬至日的阴历日期的早晚与寒冷天气来临早晚的关系,冬至过后进入数九寒天,数九歌<sup>[24]</sup>直接反映了气候冰情发展变化的情况。所以,基于中国传统历法坐标对冬季输水气象特征指标进行分析和预测为研究气象规律提供了一个更好的方向。在中国传统历法坐标基础上建立气象预测模型的研究已有一定探索,如王涛等<sup>[25]</sup>建立了经 Levenberg-Marquardt 算法改进的 BP 神经网络模型,对比了气温稳定转负日期预测能力在干支历坐标系和

公历坐标系下的区别,表明干支历对气象预测有明显优越性。因此,进一步分析中国传统历法坐标系下冬季输水气象特征指标变化规律,分析气象特征指标与入冬前气温之间的相关性,对比干支历、阴历与公历坐标系的气象特征指标预测结果,对提高冬季气象预测准确度有重要意义。

随着机器学习的不断发展和研究的逐渐深入,气象预测开始进入机器学习算法预测时代<sup>[26-30]</sup>。其中的一种循环神经网络 RNN (recurrent neural network) 模型展现出其在时间序列数据处理问题上的巨大优势,其变体长短期记忆 LSTM (long short-term memory) 模型更是改进了 RNN 长期依赖能力的不足和存在梯度消失等缺点<sup>[31-34]</sup>。现有研究已经证明利用 LSTM 模型进行气象预测的可行性较强、准确性较好<sup>[35]</sup>。

本文以南水北调中线冰情出现较早且形势较为严峻的邢台站、保定站和北京站为研究对象,分别建立以公历、干支历和阴历为时间轴的3种坐标系,分析冬季输水气象特征指标在不同历法下的变化规律,对比各历法下入冬前气温值与当年冬季输水气象特征指标之间的相关性,并建立 LSTM 气象预测模型对比不同历法下气象特征指标预测能力的优劣。

## 2 数据来源

气象数据来源于国家气象科学数据中心 (<http://data.cma.cn>),太阳辐射数据选用2018-2021年滹沱河倒虹吸、漕河渡槽渠段和北拒马河暗渠前渠段3测站实测值,气温数据选用1994-2020年南水北调沿线邢台站(53798)、保定站(54602)和北京站(54511)3站实测值。图1为2018-2021年滹沱河倒虹吸、漕河渡槽渠段和北拒马河暗渠前渠段3测站辐射实测值,图2为1994-2020年南水北调沿线邢台、保定和北京3站气象特征指标最低气温出现日、气温稳定转负日及稳定负温持续时间统计情况。

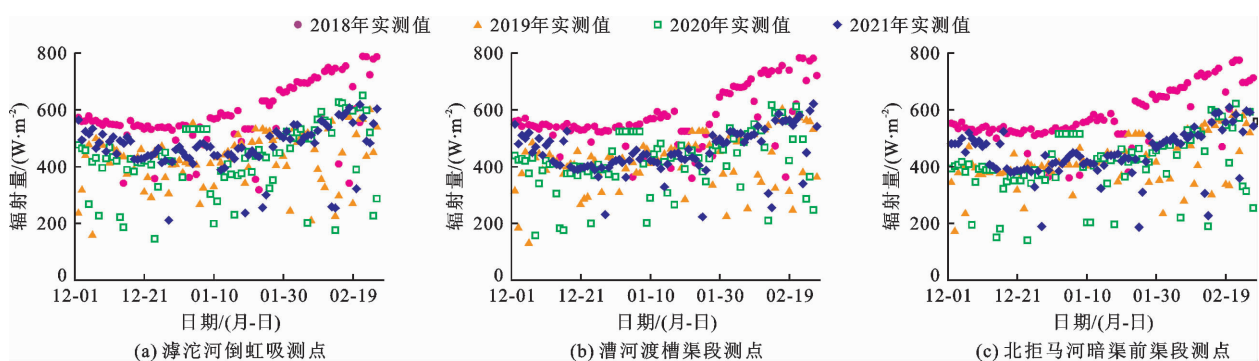


图1 2018-2021年3测站冬季辐射量实测值

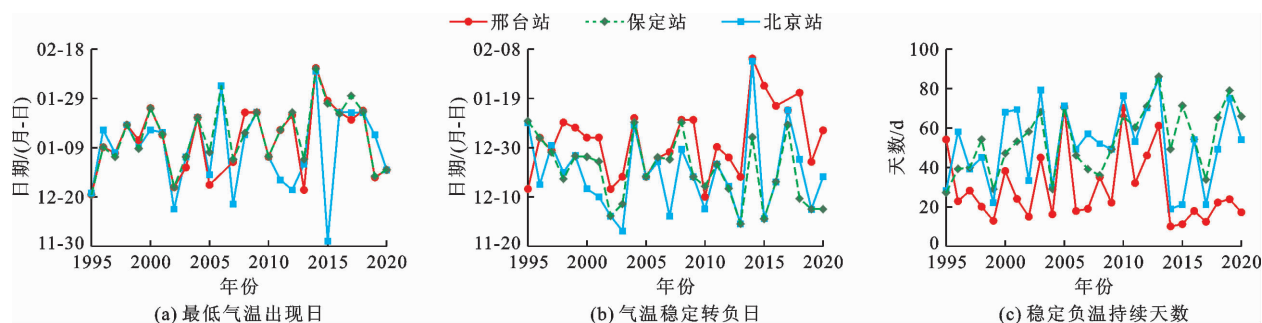


图2 1995—2020年3站气象特征指标统计情况

为了进一步分析稳定负温持续时间在不同典型年下的变化特征,根据最新颁布的《暖冬等级》(GB/T 21983—2020)<sup>[36]</sup>及《冷冬等级》(GB/T 33675—2017)<sup>[37]</sup>规范分别划分1995—2020年邢台站、保定站及北京站冬季典型年状态,结果如图3所示。

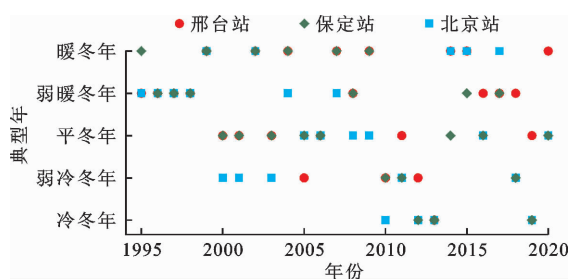


图3 1995—2020年3站典型年划分

### 3 从数据相关性角度进行历法比较

#### 3.1 基于中国传统历法的气象分析

图4为2018—2021年每年12月—次年2月3测站上界直接辐射计算值曲线。从图4可以发现,各年份3测站的辐射最低值均出现在冬至日前后。在一个回归年中,冬至日是太阳直射点到达地球南回归线开始北返的转折点,我国领土位于地球北半球,辐射值会在冬至日左右达到最低,日照时数在冬至日最少。

辐射是影响气温的重要原因之一,辐射量的减少会造成气温明显下降。冬至日作为年辐射最低值的标志日,可能对年统计气象特征指标变化规律有特殊意义,因而干支历冬至日与阴历历时之间的关系值得关注。图5为邢台站、保定站和北京站在阴历坐标下最低气温出现日与当年冬至日在阴历坐标中历时的关系。由图5可以看出,若当年冬至日在阴历上的日期较早,则最低气温出现日也较早;若当年冬至日在阴历上的日期较晚,则最低气温出现日同样较晚,在阴历坐标下,最低气温日出现时间的早晚变化与当年冬至日出现的早晚步调一致。冬至

日前后辐射值达全年最低,冬至日出现的早晚意味着辐射最低值出现的早晚。冬至日在阴历冬月(农历十一月)内不断变化,结合辐射对气温的影响作用,冬月的气温值及其变化走向在一定程度上可以反映出冬季低温期来临的早晚。

图6为1995—2020年3站各类冬季典型年气温稳定转负日和稳定负温持续天数。由图6可得,以冬至日为时间界限,在同种典型年状态下,如果气温稳定转负日出现在冬至日之前,则稳定低温持续时间通常较长;如果气温稳定转负日出现在冬至日之后,稳定低温持续时间则相对较短。冬至日前后辐射值较低,这时气温如果已经进入负温状态,则大气通过太阳辐射获得热量较少,会导致稳定负温持续时间较长。冬至日前气温状态及变化趋势在一定程度上预示着气温未来的变化形势。以上分析表明,冬至日前及阴历初的气温值及变化形势在气温变化分析及预测中具有独特的意义。

#### 3.2 相关性分析结果及讨论

由3.1节分析可知,中国传统历法坐标系下气温有着更加明显的变化规律,为了确定传统历法坐标系下入冬前气温数据与冬季输水气象特征指标之间是否存在更好的内在关系,分别建立公历坐标系、干支历坐标系和阴历坐标系进行相关性分析。当相关性分析的自变量为多元自变量时,采用复相关分析模型(最小二乘法),相关性程度的描述选用决定系数及修正决定系数共同表示。

设置因变量1995—2020年26a冬季输水气象特征指标为 $y_n$ ,其中 $n$ 为 $1, 2, \dots, j$ ;自变量气温数据为 $x_m^n$ ,其中 $m$ 为 $1, 2, \dots, i$ ,即 $x_1^n, x_2^n, \dots, x_i^n$ (单位:  $^{\circ}\text{C}$ );权重分别为 $b_1, b_2, \dots, b_i$ ,建立多元线性回归模型如下:

$$\hat{y} = \begin{bmatrix} 1 & x_1^1 & x_2^1 & \cdots & x_i^1 \\ 1 & x_1^2 & x_2^2 & \cdots & x_i^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_1^j & x_2^j & \cdots & x_i^j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

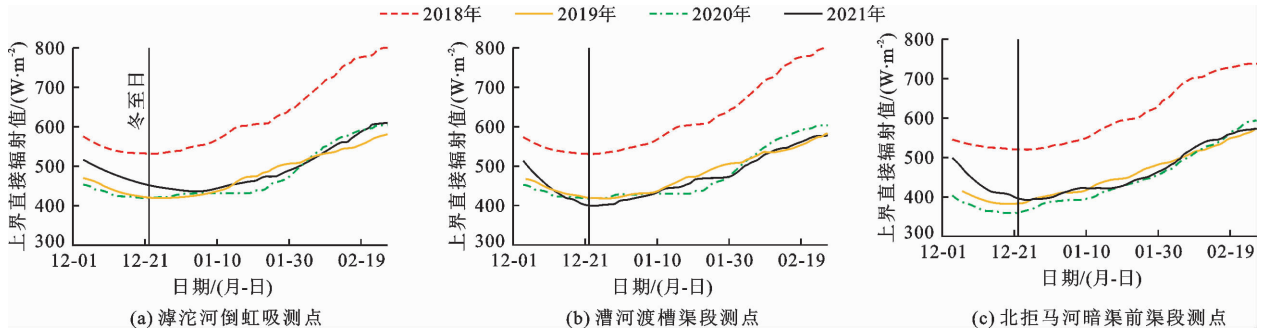


图 4 2018 - 2021 年每年 12 月 - 次年 2 月 3 测站上界直接辐射计算值曲线

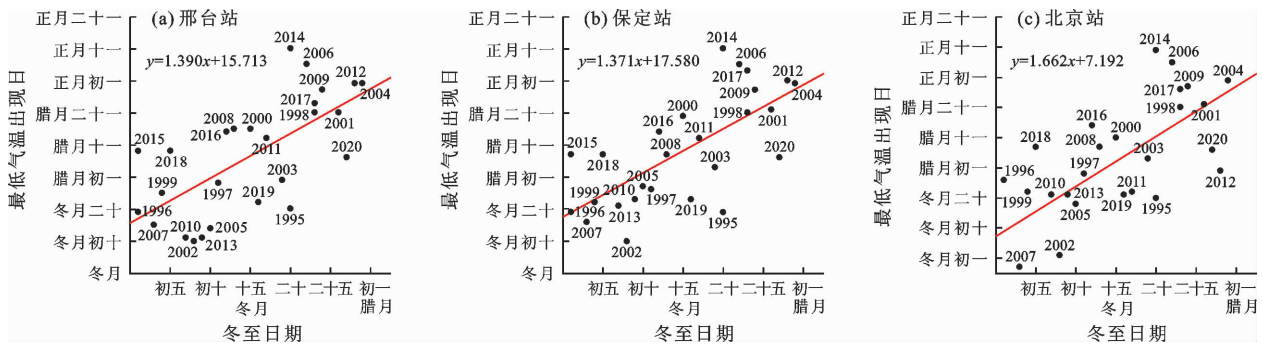


图 5 1995 - 2020 年阴历坐标下最低气温出现日与当年冬至日关系

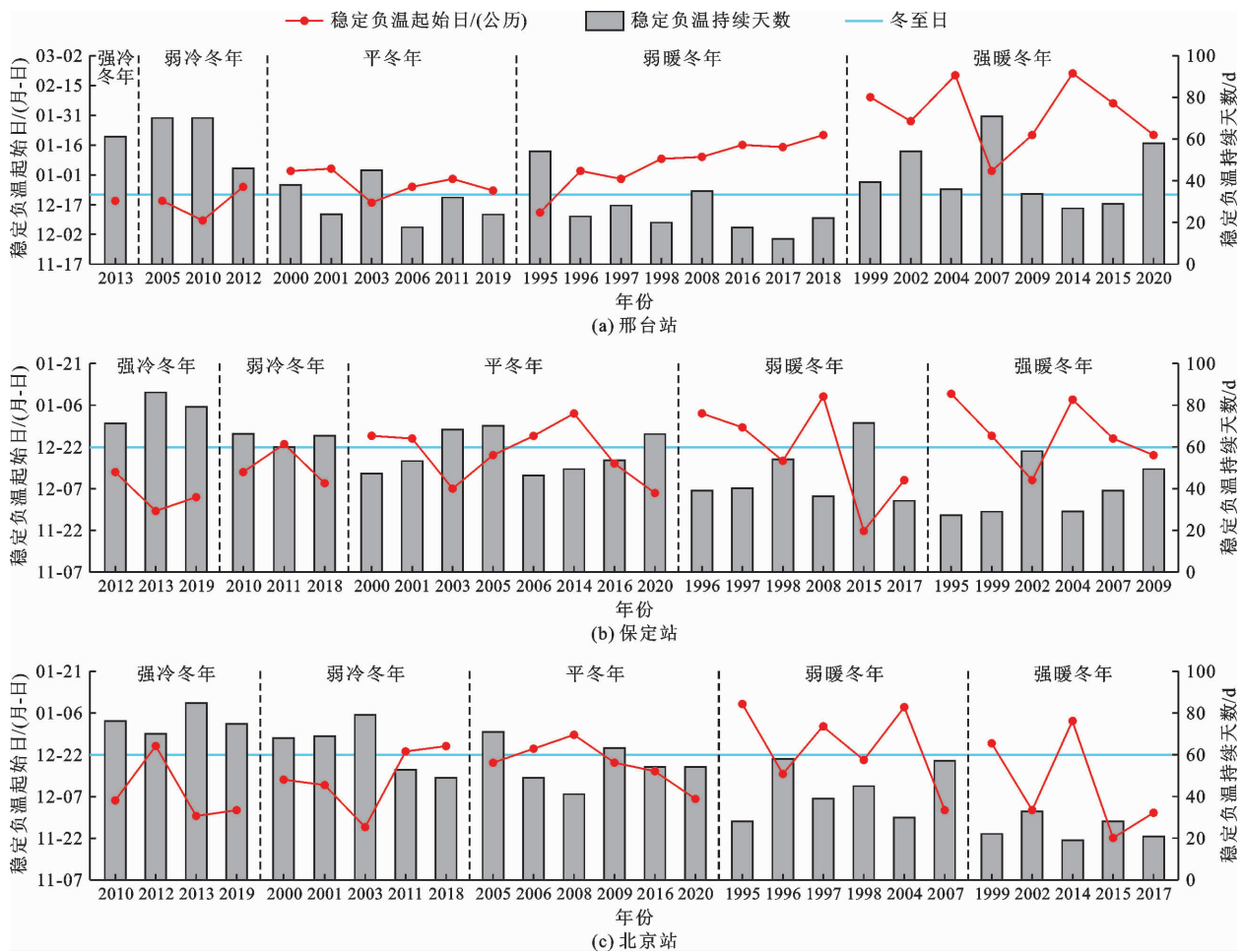


图 6 1995 - 2020 年各类冬季典型年状态下 3 站气温稳定转负日和稳定负温持续天数

决定系数  $R^2$  计算公式为:

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} = \frac{\sum (\hat{y}_j - \bar{y})^2}{\sum (y_j - \bar{y})^2}$$

$$= 1 - \frac{\sum (\hat{y}_j - y_j)^2}{\sum (y_j - \bar{y})^2} \quad (2)$$

式中:  $y_j$  为气象特征指标实际值;  $\bar{y}$  为气象特征指标平均值;  $\hat{y}_j$  为气象特征指标回归模型值。

多元自变量相关性分析存在决定系数  $R^2$  随着参数数量的增加而增大的现象,所以引入修正决定系数  $R^2_{adj}$ ,验证参数数量的扩增对相关性的影响,计算公式如下:

$$R^2_{adj} = 1 - (1 - R^2) \frac{n - 1}{n - m - 1} \quad (3)$$

以当年入冬前气温数据为自变量元素,气温数据的时间起点和选用天数的不同会获得不同的相关性分析结果。为了寻找更优的相关性分析影响因子集,本研究分别选择不同天数的气温数据:即 10、15 和 20 d,同时根据不同历法选择不同日期起点进行分析来确定相关性最好的影响因子选取方案。公历坐标系下 12 - 次年 2 月为冬季,因此选择其 12 月 1 日前 45 d 的气温数据;干支历坐标系选择冬至日前 45 d 的气温数据;阴历坐标系选择腊月初一前 45 d 的气温数据。以邢台站为例,不同时间起点不同选用天数的公历坐标系下、干支历坐标系下及阴历坐标系下各气象特征指标影响因子选取方案结果对比见图 7~9。

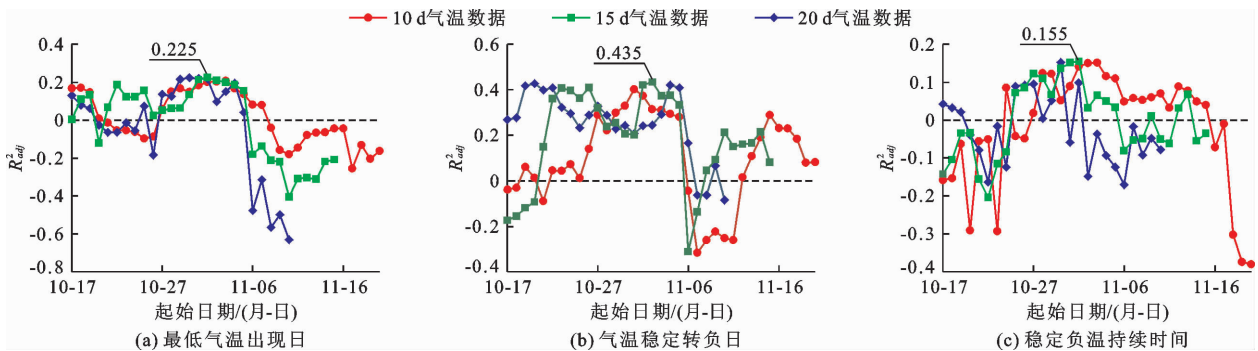


图7 邢台站公历坐标系各气象特征指标影响因子选取方案结果对比图

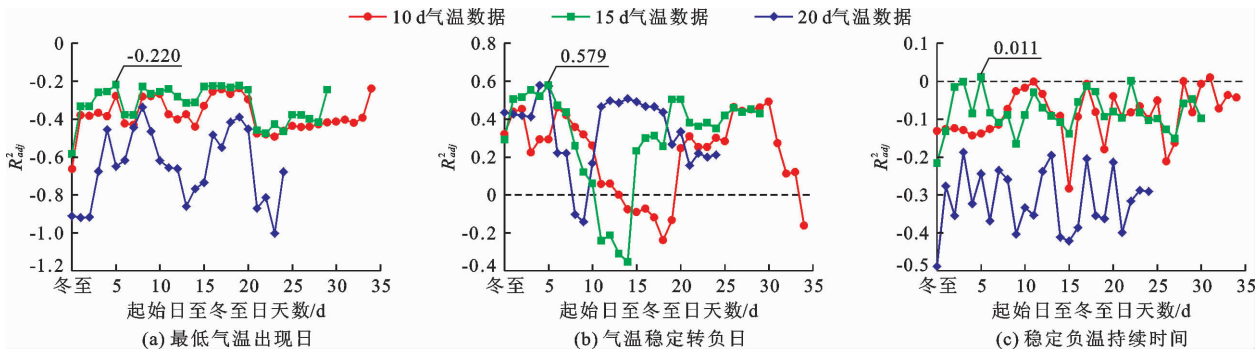


图8 邢台站干支历坐标系各气象特征指标影响因子选取方案结果对比图

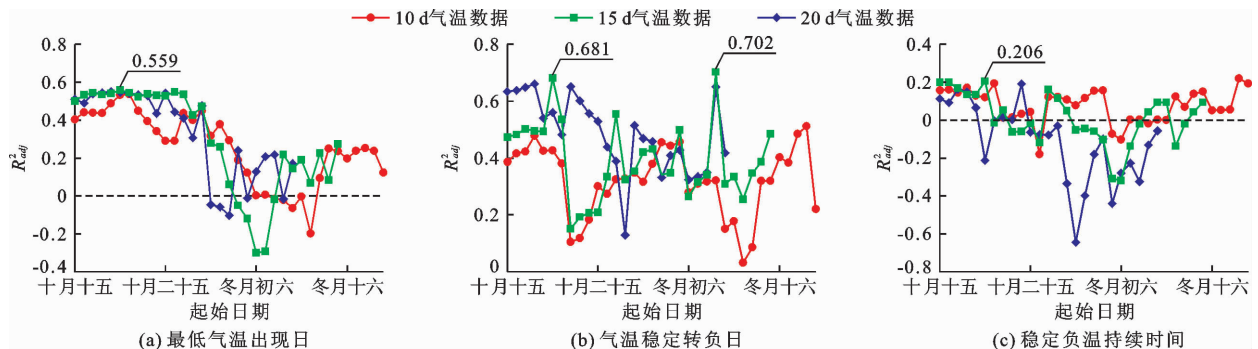


图9 邢台站阴历坐标系各气象特征指标影响因子选取方案结果对比图

由图7~9可知,3项气象特征指标相关性分析结果的最优选用天数均为15 d。公历坐标系下(图7),最低气温出现日和稳定负温持续时间相关性分析结果最优时间段的时间起点为11月1日,气温稳定转负日 $R_{adj}^2$ 值最大的时间起点为11月2日,11月1日次之;干支历坐标系下(图8),3项气象特征指标相关性分析结果最优时间段的时间起点为冬至日前第5 d;阴历坐标系下(图9),最低气温出现日和稳定负温持续时间相关性分析结果最优时间段的时间起点为十月二十。在图9(b)中出现一个异常高值( $R_{adj}^2=0.702$ ),除去该异常值后气温稳定转负日 $R_{adj}^2$ 值的最高值出现在阴历十月二十,在保定站及北京站的相关性分析结果中未出现突变值,气温稳定转负日 $R_{adj}^2$ 值的最高值均出现在阴历十月二十。保定站及北京站结果同邢台站总体相同,最优选用天数均为15 d,但在公历坐标系下气温稳定转负日 $R_{adj}^2$ 值最大的时间起点同其他2项气象特征指标相同,均为11月1日。

以上结果表明,时间长度为15 d气温数据构成的相关性分析因子集与冬季输水气象特征指标的相关性更强。以公历坐标系下11月1日-11月15日、干支历坐标系下冬至日前5~20 d及阴历坐标系下十月二十-冬月初五构成的相关性分析影响因子集与冬季最低气温出现日、气温稳定转负日和稳定负温持续时间之间的相关关系均较强。

为了更直观、更有代表性地对比不同历法下入冬前气温数据与冬季输水气象特征指标之间相关性的优劣,3站各气象特征指标均选择公历坐标系下11月1日-11月15日、干支历坐标系下冬至日前5~20 d及阴历坐标系下十月二十-冬月初五构成的相关性分析影响因子集进行相关性分析。表1为邢台、保定和北京3站最低气温出现日、气温稳定转负日及稳定负温持续时间在3个坐标系下相关性分析结果表。

如表1所示,阴历坐标系下3站最低气温出现日、气温稳定转负日和稳定负温持续时间与其相关性分析影响因子的相关性均更强,其中仅保定站的稳定负温持续时间在干支历坐标系下与其相关性分析影响因子的相关性更强。这一结果表明阴历坐标系下入冬前气温值及其变化趋势与当年冬季输水气象特征指标有更强的相关关系,干支历坐标系次之,公历坐标系较差。利用阴历坐标系构建冬季气象分析模型,能够更好地利用入冬前气温判断当年冬季气象、冰情的变化形势。

表1 3站各气象特征指标在不同坐标系下的相关性分析结果

站点	气象特征指标	坐标	$R^2$	$R_{adj}^2$	最优
邢台	最低气温出现日	公历	0.640	0.225	
		干支历	0.434	-0.220	
		阴历	0.795	0.559	√
	气温稳定转负日	公历	0.741	0.420	
		干支历	0.805	0.579	
		阴历	0.852	0.681	√
保定	稳定负温持续时间	公历	0.608	0.155	
		干支历	0.541	0.011	
		阴历	0.631	0.206	√
	最低气温出现日	公历	0.684	0.318	
		干支历	0.462	-0.159	
		阴历	0.801	0.572	√
北京	气温稳定转负日	公历	0.665	0.279	
		干支历	0.744	0.448	
		阴历	0.747	0.454	√
	稳定负温持续时间	公历	0.497	-0.084	
		干支历	0.587	0.109	√
		阴历	0.506	-0.065	
北京	最低气温出现日	公历	0.574	0.083	
		干支历	0.674	0.297	
		阴历	0.699	0.352	√
	气温稳定转负日	公历	0.581	0.097	
		干支历	0.639	0.223	
		阴历	0.828	0.690	√
稳定负温持续时间	公历	0.496	-0.085		
	干支历	0.536	0.000		
	阴历	0.626	0.194	√	

## 4 从特征指标预测角度进行历法比较

相关性分析体现了利用农历作为冬季输水气象特征指标预测时间坐标来改善预测结果的可行性。所以,在农历时间轴坐标系下建立预测模型是具有探索意义的。

### 4.1 预测模型

长短期记忆(LSTM)模型基本结构与循环神经网络(RNN)模型大致相同,为了解决长时间工况模拟存在短期依赖的问题,增设了门控结构,包括遗忘门、输入门、输出门,来控制信息选择性输入<sup>[32]</sup>。图

10 为 LSTM 基本结构,其中,A 为重复结构,  $X$  为输入项,  $h$  为记忆单元输出项;矩形为神经网络层,圆形为运算操作,箭头为信息传递与合成。

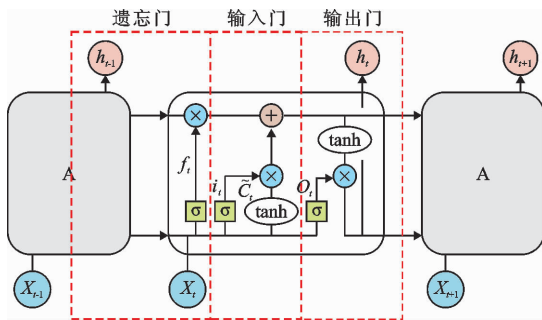


图 10 LSTM 结构示意图

LSTM 模型具体工作原理表达式如下:

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

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

$$\tilde{C}_t = \tanh(W_c \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_c) \quad (6)$$

$$C_t = f_t \cdot C_{t-1} + i_t \cdot \tilde{C}_t \quad (7)$$

$$O_t = \sigma(W_o \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_o) \quad (8)$$

$$h_t = O_t \cdot \tanh(C_t) \quad (9)$$

式中:  $f_t, i_t, O_t$  分别为  $t$  时刻遗忘门、输入门、输出门的输出值<sup>[32]</sup>;  $W_f, W_i, W_c, W_o$  为权重值;  $b_f, b_i, b_c, b_o$  为偏置向量,即网络需要学习的参数。遗忘门判断信息是否舍弃。输入门决定要往 Memory Cell 中保存新信息的内容。输出门决定了输出信息的取舍。

在 Python 平台的 Keras 框架下训练 LSTM 模型。在构建 LSTM 预测模型的过程中,通过引入 Adma 优化器来提高机器学习的训练速率及收敛速

率,实现梯度下降。通过调节训练集维度并引入 Dropout 层很好地解决了过拟合现象。为了解决数据量纲不一致的问题,引入归一化的方法对数据进行处理。模型各项设置值见表 2。

表 2 LSTM 模型设置

参数名	设置值
输入节点数	15
输出节点数	1
隐藏层	1
各隐藏层节点数	64

#### 4.2 预测结果及分析

预测模型的学习数据选用 1994 - 2017 年气温数据及冬季输水气象特征指标,预测目标为 2018 - 2020 年 3 a 的最低气温出现日、气温稳定转负日及稳定负温持续时间。结合相关性分析,为了使预测更具有统一性、代表性和强对比性,预测模型分别以公历 11 月 1 日、干支历坐标下冬至日前第 20 d、阴历十月二十为时间轴基准点来建立坐标系。构建 LSTM 模型对 3 项气象特征指标进行预测,表 3 为 2018 - 2020 年 3 站各气象特征指标预测误差(预测日期不满 1 d 的情况认为过满这 1 d)。为了更直观地对比不同坐标系之间的预测结果,将 3 个坐标系预测的结果日期均推导至同一时间坐标系下,与实测日期做差,直接对比预测误差。经对比选出 3 站各预测年份各气象特征指标预测误差最小值,在表 3 中以粗体显示。

表 3 2018 - 2020 年 3 站各气象特征指标预测误差

站点	年份	d								
		最低气温出现日			气温稳定转负日			稳定负温持续时间		
		公历	干支历	阴历	公历	干支历	阴历	公历	干支历	阴历
邢台	2018	-2	-2	<b>+1</b>	+4	-6	<b>-1</b>	+5	+4	<b>+2</b>
	2019	+5	+4	<b>+2</b>	+5	+4	<b>-1</b>	+2	+4	<b>0</b>
	2020	+4	+4	<b>+1</b>	+5	-1	-3	+5	+5	<b>+2</b>
保定	2018	-2	-1	<b>0</b>	+3	<b>+1</b>	+2	<b>0</b>	-2	<b>0</b>
	2019	+5	+5	<b>+2</b>	+5	<b>+3</b>	<b>+3</b>	-5	+2	<b>-2</b>
	2020	+3	+4	<b>0</b>	+6	+2	<b>+1</b>	<b>-1</b>	-2	<b>-1</b>
北京	2018	-4	<b>-1</b>	<b>-1</b>	+2	<b>-1</b>	<b>+1</b>	+1	+1	<b>0</b>
	2019	+2	+3	<b>+1</b>	<b>+1</b>	<b>+1</b>	<b>-1</b>	+6	+5	<b>+5</b>
	2020	<b>0</b>	+3	<b>0</b>	+2	+1	<b>0</b>	<b>0</b>	+1	<b>0</b>

由表 3 可知,在最低气温出现日的预测试验中,公历坐标系预测结果仅在 2020 年的北京站与阴历

相同,但未更优。在气温稳定转负日的预测试验中,公历坐标系预测结果仅在 2019 年的北京站与干支

历及阴历误差绝对值相同,均为与实际日期相差 1 d。在稳定负温持续时间的预测试验中,公历坐标系预测结果与阴历相同的概率为 33%,但未更优。结合表 3 标粗数据,分别统计 3 个坐标系下各气象特征指标预测结果能够达到每个站点历年预测结果最优解的概率,如表 4 所示。

表 4 各气象特征指标预测结果达到最优解的概率 %

气象特征指标	公历	干支历	阴历
最低气温出现日	11	11	100
气温稳定转负日	11	55	77
稳定负温持续时间	33	0	100

表 4 表明,阴历坐标系下 3 项冬季输水气象特征

指标预测结果的误差均能够达到多次试验综合最优解,具有明显的优越性。综上分析可以看出,以阴历为时间坐标轴建立预测体系时,冬季输水气象特征指标的预测结果更加准确,与相关性分析的结论相同。

对于预测结果的综合评价指标采用均方误差  $RMSE$ ,公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tilde{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (10)$$

式中:  $\tilde{y}_i$  为预测值;  $y_i$  为实测值。

$RMSE$  值越小,则表明预测结果越好。将各站点各气象特征指标的预测结果进行  $RMSE$  评价,评价结果见表 5。

表 5 3 站各气象特征指标预测值  $RMSE$  评价结果

站点	最低气温出现日			气温稳定转负日			稳定负温持续时间		
	公历	干支历	阴历	公历	干支历	阴历	公历	干支历	阴历
邢台	3.762	3.517	<b>1.093</b>	4.386	3.023	<b>2.360</b>	3.920	3.830	<b>1.419</b>
保定	3.522	3.450	<b>1.115</b>	4.209	2.000	<b>1.950</b>	3.218	2.264	<b>1.882</b>
北京	2.609	2.519	<b>1.230</b>	1.115	1.100	<b>0.909</b>	3.269	2.770	<b>2.726</b>
均值	3.298	3.162	<b>1.146</b>	3.237	2.041	<b>1.740</b>	3.469	2.955	<b>2.009</b>

注:表中粗体数据为各气象特征指标在 3 种坐标系下  $RMSE$  值的最小值。

从表 5 可以看出,同一特征指标同一站点的预测结果  $RMSE$  值在阴历坐标系下最小,干支历与公历的  $RMSE$  值相差较小,干支历  $RMSE$  值总体较公历更小。均方差的结果同样体现了以阴历为时间坐标轴的模型在气象预测模型中的优越性。

阴历坐标系下,各项气象特征指标 3 站点  $RMSE$  均值大小关系为:稳定负温持续时间 > 气温稳定转负日 > 最低气温出现日,显示出最低气温出现日的可预测性最强,气温稳定转负日次之,稳定负温持续时间可预见性最差。说明利用入冬前气温数据对当年冬季输水气象特征指标进行预测时,特殊时间点的预测试验具有更高的精度。

表 6 各气象特征指标在不同站点下  $RMSE$  平均值 d

气象特征指标	邢台	保定	北京
最低气温出现日	2.791	2.696	2.119
气温稳定转负日	3.256	2.780	1.041
稳定负温持续时间	3.056	2.455	2.922

对比表 6 中邢台站、保定站和北京站预测结果  $RMSE$  平均值可以发现,北京站预测结果最优,保定站次之,邢台站最差。这说明越靠北的地方寒冷天

气出现日期、持续时间及寒冷程度的突变性越小,冬季输水气象特征指标的可预见性越强;处于寒潮南下边缘影响区的冬季气象变化规律越不明显,预测难度越大。

## 5 结 论

最低气温出现日、气温稳定转负日和稳定负温持续时间 3 项冬季输水气象特征指标是影响冬季渠道冰情产生和发展的重要因素,实现上述气象特征指标的准确预测对提高冬季渠道输水效率有着重要意义。传统历法自古以来在农业、水利上的优秀表现启发了将农历应用在冬季输水问题中的探索。本文对比了不同历法下入冬前气温与冬季输水气象特征指标间的相关性,并利用 LSTM 预测模型对公历、干支历和阴历 3 种坐标系下冬季输水气象特征指标进行预测,来研究不同历法对冬季输水气象特征指标分析和预测的影响。本文主要结论如下:

(1)不同时间起点和不同时间长度构成的入冬前气温数据集与冬季输水气象特征指标的相关性分析结果显示:选择 15 d 的气温数据作为影响因子较 10 和 20 d 气温数据构成的影响因子的相关性分析结



果更好,3站用公历坐标系下11月1日-11月15日、干支历坐标系下冬至日前5-20d及阴历坐标系下十月二十-冬月初五构成的相关性分析影响因子集与3项气象特征指标的相关性分析结果均较优。

(2)在选择上述时间段气温数据基础上,对比邢台站、保定站和北京站的3项冬季输水气象特征指标和入冬前气温相关性分析的结果可知:3项气象特征指标在阴历坐标系下的相关性分析结果决定系数 $R^2$ 值较公历坐标系和干支历坐标系更大,修正决定系数 $R_{adj}^2$ 值也更大,与入冬前气温数据相关性更好。

(3)利用LSTM模型对2018-2020年3站点3项冬季输水气象特征指标进行预测的结果表明:3项气象特征指标预测结果在阴历坐标系下预测误差最小、RMSE值最小,预测结果比公历坐标系和干支历坐标系更准确。

(4)阴历坐标系下3项冬季输水气象特征指标预测结果显示了最低气温出现日具有较好的可预见性,表现了利用入冬前气温数据进行气象特征指标预测时,时间点的可预见性较时间段更强。

(5)对于纬度较高的地区,冬季寒潮降临时间及寒冷程度突变性更小,冬季输水气象特征指标可预见性更高,而纬度偏低的地区,寒冷空气变化复杂,影响因素繁多,可预见性较差。

综上所述,以阴历为坐标时间轴对冬季输水气象特征指标进行分析和预测在各历法分析及预测能力中具有明显的优越性,可以利用阴历对气候变化和冰情发展进行探索。在构建气象、冰情预测模型的过程中,可以通过利用阴历作为时间坐标的方法大幅提高预测模型的准确性。

#### 参考文献:

[1] 张小俊. 南水北调中线工程连续两年超过多年平均供水目标[N]. 中国水利报, 2021-11-09(5).

[2] 李立群, 赵慧, 郑振华. 南水北调中线一期工程供水效益统计探析[C]// 中国水利学会. 中国水利学会2019学术年会论文集第四分册. 北京: 中国水利水电出版社, 2019.

[3] 夏军, 黄国和, 占车生. 南水北调中线工程对区域经济社会可持续发展影响研究的几个关键问题[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2009, 45(Z1): 484-489.

[4] 严军, 胡建兰, 苗卉, 等. 南水北调对长江流域水资源承载力的影响及水资源优化配置方法[J]. 水力发电学报, 2007, 26(3): 105-109+98.

[5] 茅泽育, 吴剑疆, 余云童. 河冰生消演变及其运动规律的研究进展[J]. 水力发电学报, 2002, 21(S1): 153-161.

[6] 吴艳, 周富强, 穆祥鹏, 等. 基于水温实测资料的冰期水内冰演变的计算方法[J]. 水力发电学报, 2017, 36(11): 94-101.

[7] 杜一衡, 郝振纯, 李伟玲, 等. 黄河源区河道冰凌特征变化及影响因素分析[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(5): 32-36.

[8] 赵水霞, 陈晓俊, 王文君, 等. 黄河内蒙古段封河期水面-大气非线性热力学模型探究[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(3): 130-136.

[9] 刘强, 冀鸿兰, 张宝森, 等. 黄河下游冰凌特征变化及影响因素分析[J]. 水电能源科学, 2019, 37(11): 19-23.

[10] 王春青, MYNETT A M, 张勇, 等. 黄河流域寒潮天气与凌情关系分析[J]. 水文, 2012, 32(5): 48-52+6.

[11] 安鹏, 闫堃, 王世正, 等. 山东黄河冰情现象及影响因素[C]// 2021第九届中国水生态大会, 西安, 2021.

[12] 刘孟凯, 杨佳, 黄明海. 南水北调中线总干渠沿线地区冬季气温特征分析[J]. 人民长江, 2020, 51(7): 93-99.

[13] 郭新蕾, 杨开林, 杨淑慧, 等. 长距离明渠系统反向输水冰情模拟[J]. 水利学报, 2015, 46(7): 877-882.

[14] 张一兵, 刘珺, 焦敏辉, 等. 基于气温特征值的三湖河口断面冰期预报模型[J]. 人民黄河, 2017, 39(1): 38-40.

[15] 屈根利. 中国农历——一块落满灰尘的中华瑰宝[J]. 社科纵横(新理论版), 2012, 27(3): 252-254+284.

[16] 渝人. 伊斯兰历和伊朗阳历[J]. 世界知识, 1979(2): 13.

[17] 一些外国纪年[J]. 内蒙古金融研究, 2003(S1): 333.

[18] 冯希举. 公历和农历[J]. 地理教育, 2001(4): 19.

[19] 付娟. 二十四节气研究综述[J]. 古今农业, 2018(1): 91-108.

[20] 秦闯. 汉代二十四节气研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2020.

[21] 张启斌. 中国“新农历”初探[J]. 地方文化研究, 2019(6): 37-48.

[22] 张闻玉. 古代历法的置闰[J]. 学术研究, 1985(6): 117-122.

[23] 徐振韬. 中国古代天文学词典[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2009.

[24] 张姝丽, 张德山, 冯涛, 等. 北京“数九”时节的气候特征及其变化分析[J]. 气候与环境研究, 2009, 14(5): 561-566.

[25] 王涛, 马俊青, 罗盛, 等. 立冬日在南水北调冬季输水气温稳定转负日预报中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(2): 63-66.

[26] RAFTERY A E, GNEITING T, BALABDAOUI F, et al. Using Bayesian model averaging to calibrate forecast ensembles[J]. Monthly Weather Review, 2005, 133(5): 1155-1174.

[27] 王涛, 杨开林, 郭新蕾, 等. 基于网络的自适应模糊推理系统在冰情预报中的应用[J]. 水利学报, 2012, 43(1): 112-117.

(下转第132页)

- 高效输沙洪水探讨[J]. 人民黄河, 2019, 41(2): 20 - 23 + 28.
- [4] 韩其为. 非均匀悬移质不平衡输沙的研究[J]. 科学通报, 1979, 24(17): 804 - 808.
- [5] 陈建国, 周文浩, 孙平. 黄河下游驼峰河段的形成机理[J]. 水利学报, 2010, 41(8): 921 - 926.
- [6] 钱宁. 冲积河流稳定性指标的商榷[J]. 地理学报, 1958, 24(2): 128 - 144.
- [7] 韩其为. 黄河下游输沙及冲淤的若干规律[J]. 泥沙研究, 2004(3): 1 - 13.
- [8] 陈绪坚, 胡春宏, 安毓琪, 等. 黄河泥沙合理配置方案研究[J]. 泥沙研究, 2021, 46(3): 1 - 9.
- [9] 张旭东, 欧祖贤, 牛智航. 黄河下游水沙变化特点[J]. 水资源开发与管理, 2021(3): 20 - 24 + 19.
- [10] 江恩惠, 韩其为. 黄河非平衡输沙典型事例及其研究概述[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2010, 8(3): 161 - 165.
- [11] 郭彦, 侯素珍, 夏润亮, 等. 1955 - 2014年黄河内蒙古河段水沙变化特征分析[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(4): 70 - 77.
- [12] 阎永新, 杨凤栋, 尚俊生, 等. 黄河山东段典型漫滩洪水来源、演进特性及近年河道冲淤变化分析[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(5): 167 - 171.
- [13] 夏军强, 王增辉, 王英珍, 等. 黄河中下游水库 - 河道 - 滩区水沙模拟系统的构建与应用[J]. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28(3): 652 - 665.
- [14] 夏军强, 王英珍, 李涛, 等. 河床横向摆动计算方法及其在黄河下游游荡段的应用[J]. 人民黄河, 2019, 41(10): 87 - 95.
- [15] 钱宁, 张仁, 李九发, 等. 黄河下游挟沙能力自动调整机理的初步探讨[J]. 地理学报, 1981, 36(2): 143 - 156.
- [16] 钱宁, 张仁, 赵业安, 等. 从黄河下游的河床演变规律来看河道治理中的调水调沙问题[J]. 地理学报, 1978, 33(1): 13 - 26.
- [17] 李文文, 傅旭东, 吴文强, 等. 黄河下游水沙突变特征分析[J]. 水力发电学报, 2014, 33(1): 108 - 113.
- [18] 陈建国, 周文浩, 孙平. 黄河下游驼峰河段的形成机理[J]. 水利学报, 2010, 41(8): 921 - 926.
- [19] 齐璞. 黄河下游河道输沙泄洪机理、能力及治理前景[J]. 水利学报, 2007(S1): 264 - 268 + 282.
- [20] 许炯心. 黄河下游洪水的输沙效率及其与水沙组合和河床形态的关系[J]. 泥沙研究, 2009(4): 45 - 50.
- [21] 彭杨, 陈仕豪, 时玉龙. 黄河下游水沙变化多时间尺度集对分析[J]. 泥沙研究, 2021, 46(2): 35 - 41.
- [22] 谢谦城, 苗伟波, 戴文鸿, 等. 水沙变化条件下黄河下游连续弯段水流特性研究[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(4): 157 - 161 + 168.
- [23] 李勇, 张敏, 田勇, 等. 黄河下游河道改造与滩区治理方案可行性综合分析[R]. 郑州: 黄河水利科学研究院, 2018.
- [24] XIA Junqiang, LI Xiaojuan, LI Tao, et al. Response of reach-scale bankfull channel geometry to the altered flow and sediment regime in the lower Yellow River[J]. Geomorphology, 2014, 213: 255 - 265.

(上接第 116 页)

- [28] PEREZ - VEGA A, TRAVIESO C M, HERNANDEZ - TRAVIESO J G, et al. Forecast of temperature using support vector machines [C]// 2016 International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA). Piscataway: IEEE, 2016.
- [29] 蒋云钟, 冶运涛, 赵红莉, 等. 水利大数据研究现状与展望[J]. 水力发电学报, 2020, 39(10): 1 - 32.
- [30] AYELE T W, MEHTA R. Real time temperature prediction using IoT [C]// 2018 Second International Conference on Inventive Communication and Computational Technologies (ICICCT). Piscataway: IEEE, 2018.
- [31] ZAYTAR M A, El AMRANI C. Sequence to sequence weather forecasting with long short-term memory recurrent neural networks [J]. International Journal of Computer Applications, 2016, 143(11): 7 - 11.
- [32] HOCHREITER S, SCHMIDHUBER J. Long short-term memory [J]. Neural Computation, 1997, 9(8): 1735 - 1780.
- [33] 殷仕明, 徐炜, 熊一橙, 等. 基于迁移学习的长短时记忆神经网络水文模型[J]. 水力发电学报, 2022, 41(6): 53 - 64.
- [34] 郝玉莹, 赵林, 孙同, 等. 基于 RF - LSTM 的地表水体水质预测[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(6): 41 - 48.
- [35] 倪铮, 梁萍. 基于 LSTM 深度神经网络的精细化气温预报初探[J]. 计算机应用与软件, 2018, 35(11): 233 - 236 + 271.
- [36] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 暖冬等级 GB/T 21983—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [37] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 冷冬等级 GB/T 33675—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.