文章编号: 1672-3317 (2024) 02-0054-08

基于 SARIMA 模型的五道沟地区 0~320 cm 土层 季尺度地温预测研究

蒋鑫平¹, 王启猛^{1,2*}, 刘 猛³, 王发信³, 吕海深¹, 陈 雨¹, 李 杰¹, 王振龙³ (1.河海大学, 南京 210098; 2.水利部淮河水利委员会, 安徽 蚌埠 233000; 3.安徽省(水利部淮委)水利科学研究院, 合肥 230088)

摘 要:【目的】探讨五道沟地区地温季尺度变化趋势和突变特征,建立 SARIMA 地温预测模型。【方法】基于五 道沟水文实验站 1964—2022 年长系列实测地温资料,采用线性回归、Sen's 斜率估计、MK 检验等方法,开展 0~320 cm 土层地温季尺度变化趋势和突变特征研究,建立不同土层深度 (0~320 cm) 地温 SARIMA 预测模型。【结果】 ①春季、冬季 0~160 cm 土层地温呈显著上升趋势;夏季除 0、10 cm 土层外其他土层地温均有显著下降趋势;秋季 0、20 cm 土层地温具有显著上升趋势;320 cm 土层地温在冬季具有显著下降趋势。②春季 0、10、20、40、160 cm 土层地温分别在 2006、2013、2012、2015、2018 年发生突变,突变后增温趋势显著;320 cm 土层地温在 1984 年前 后开始显著降低。③地温数据的预测值与实测值拟合优度均>0.95,不同土层地温预测模型均有较好的预测能力,且 随土层深度增加预测精度提高,MAE 随土层深度增加由 1.666 下降至 0.390, RMSE 随土层深度增加由 2.139 下降至 0.525。【结论】SARIMA 模型精度较高,可用于淮北平原地区地温模拟预测。

关键词: 地温; 变化特征; 时间序列; SARIMA 模型 中图分类号: P468.0 文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023223



蔣鑫平, 王启猛, 刘猛, 等. 基于 SARIMA 模型的五道沟地区 0~320 cm 土层季尺度地温预测研究[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(2): 54-60, 95.

JIANG Xinping, WANG Qimeng, LIU Meng, et al. Spatiotemporal temperature variation in soil in Wudaogou area and its modelling using the SARIMA model[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(1): 54-60, 95.

0 引 言

【研究意义】地温不仅是重要的气候变化评价指标,也是重要的农业气象参数^[1]。地温变化不仅直接影响植物种子萌发、生长发育和产量形成,而且直接影响下垫面的反射率、加速土壤呼吸从而对全球变暖产生正反馈^[2-3]。因此,科学预测地温对研究气候变化特征和指导农业生产实践具有重要意义。【研究进展】在全球气候持续变暖的背景下,地温以高于气温增长的速率递增^[4],这引起多领域专家学者对地温变化的关注,李铭等^[5]对大连气象站 5~10 cm 土层地温年值进行统计分析发现,各土层年均地温均以 2010年为拐点呈先降低后升高趋势。五道沟地区年尺度浅、中层地温呈上升趋势,深层地温变化不大,各土层地

收稿日期: 2023-05-21 修回日期: 2023-10-16

基金项目: 安徽省 2022 年度水科学联合基金(2208085US07);国家自然 科学基金重点项目(41830752);国家自然科学基金面上项目(42071033) 作者简介: 蒋鑫平(1999-),男,江西抚州人。硕士研究生,主要从事 水文水资源研究。E-mail:1959946251@qq.com

通信作者: 王启猛(1984-),男,山东泰安人。工程师,博士,主要从 事水文水资源研究。E-mail: qimengw@sina.com

©《灌溉排水学报》编辑部,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

温以3~6a和8~12a为主周期且与气温呈显著正相关、 与降水量呈低度负相关^[6-7]。年尺度下,1990年后中 国大部分地区 0 cm 土层地温增温趋势显著且北方增 温速率大于南方;季尺度下,冬季增温幅度最大,夏 季增温幅度最小^[8-9]。地温模拟预报方面,陈鹏狮等^[10] 建立了春播期5cm土层地温-气温线性预测模型,以 期采用气温预报数据来预测地温。宋丽萍等[11]在气温 基础上考虑相对湿度、风速等因素采用逐步回归方法 预测日地面最高温度精度较高。马力等[12]采用时间序 列分析和自回归积分滑动平均模型对三峡库首典型 地区蓄水前后地温变化进行预测分析。【切入点】前 人根据地温与气象要素的相关关系建立地温预测模 型,在研究区域内模型精度较高,在研究区域外或气 象数据缺失区域不太实用。淮北平原是我国重要粮食 生产基地,适用于该地区的地温预测模型还未见报道。 【拟解决的关键问题】为此,选取该站点 1964—2022 年不同土层深度(0~320 cm)地温长系列实测资料, 采用考虑季节性和周期性的 SARIMA 模型对该地区 不同土层深度季尺度地温变化进行趋势和预测分析,

第2期

分别建立不同土层深度(0~320 cm)地温预测模型, 为进一步研究淮北平原区气候变化特征及地温对气 候变化的响应提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

五道沟水文实验站位于淮北地区南部,安徽省蚌 埠市固镇县新马桥原种场境内,实验流域面积 1.36 km²,该站始建于 1953 年,是继瓦尔达依站和克威塔 站之后的第 3 个水文站。站内设有 62 套非称质量式 大型蒸渗仪,10 套自动称质量式蒸渗仪,集水面积 为1 600、60 000 m²、1.36 km²互相嵌套的 3 个小、 中、大封闭径流试验场,大型野外人工降雨试验场及 水文气象全要素观测场等;其中水文气象全要素观测 场主要包括:标准雨量、自记雨量(雨强)、E601 水面蒸发、20 cm 水面蒸发、日照时间、风速、风向、 干湿球温度、地温(0~320 cm),积累了 1953—2022 年不间断长系列实测数据。

1.2 计算方法

1.2.1 资料来源

本文资料来自五道沟水文实验站 1964—2022 年 共 59 a 实测地温数据,地温监测土层为 0、10、20、 40、160、320 cm。其中 0~40 cm 土层地温分别在每 日的 08:00、14:00、20:00 观测 3 次,160、320 cm 土 层在每日的 14:00 观测 1 次。季节划分采用春季(3 —5 月)、夏季(6—8 月)、秋季(9—11 月)、冬 季(12 月—次年 2 月)。

1.2.2 研究方法

采用线性倾向估计法^[13]、MK 趋势检验法、Sen's 斜率估计法分析 0~320 cm 土层地温季尺度变化趋势; 利用 MK 突变检验法对各土层季平均地温进行突变 性检验;通过时间序列分析方法建立 SARIMA 模型 模拟预测地温。

1.2.3 Sen's 斜率估计

Sen's 斜率估计是通过样本构造斜率取值范围, 并取斜率序列中值判断变化趋势^[14]。对于时间序列 $X_n=\{x_1, x_2, \dots, x_n\}, 倾斜度 <math>\beta$ 计算式为:

$$\beta = \operatorname{Median} \frac{x_i \cdot x_j}{i \cdot i} (1 \leq i \leq j \leq n), \qquad (1)$$

式中: Median 函数为中值函数。当 $\beta > 0$ 时,表示变量为上升趋势; $\beta < 0$ 时,表示变量为下降趋势。

1.2.4 SARIMA 模型结构

SARIMA 模型又称季节性自回归滑动平均模型, 在短时间内预测精度较高,是在 ARIMA 模型的基 础上考虑时间序列的季节性和周期性从而适用于具 有周期效应的建模方法^[15-17]。模型表示为 SARIMA (p, d, q) × (P, D, Q) s, 其中 p 为非季节自回 归阶数, d 为非季节差分阶数, q 为非季节移动平均 阶数, P 为季节自回归阶数, D 为季节差分阶数, Q 为季节移动平均阶数, S 为季节周期数。计算式为:

$$B^k x_t = x_{t-k}, \tag{2}$$

$$(1-B)^{d}(1-B^{s})^{D}x_{t} = \frac{\theta(B)\theta_{S}(B)}{\psi(B)\psi_{S}(B)}\varepsilon_{t}, \qquad (3)$$

$$\theta(B) = 1 - \theta_1 B - \dots - \theta_q B^q, \tag{4}$$

$$\theta_{\rm S}(B) = 1 - \theta_1 B^S - \dots - \theta_Q B^{QS}, \tag{5}$$

$$\psi(B) = 1 - \varphi_1 B - \dots - \varphi_p B^p, \tag{6}$$

$$\psi_{\mathbf{S}}(B) = 1 - \varphi_{\mathbf{1}} B^{S} - \dots - \varphi_{\mathbf{p}} B^{PS}_{\mathbf{P}}, \qquad (7)$$

式中: *B* 为延迟算子; x_t 为平稳化的地温时间数据系 列; θ_1 、 θ_2 、 θ_p 为滑动平均系数; φ_1 、 φ_2 、 φ_p 为自回 归系数; ε_t 为均值为 0, 方差为 δ^2 的平稳白噪声。 1.2.5 模型建立与检验

建模过程^[18]:①序列平稳性检验:序列平稳是 ARMA 类模型建模的前提,利用 R 语言将原序列进 行趋势项、周期项和残差项分解,同时进行 ADF 单 位根检验判断原序列平稳性,非平稳序列采用差分处 理至序列平稳;②参数定阶及最优模型选择: SARIMA 模型中的参数通过查看平稳序列自相关图 (ACF)和偏自相关图(PACF)进行初步定阶,再 结合赤池信息化准则(AIC)和贝叶斯信息准则(BIC) 进一步确定参数阶数,从而确定最优模型。模型参数 采用极大似然法估计。③模型残差检验:参数估计后, 需要对模型的有效性进行检验,采用 LJung-Box/Q 判 断残差序列是否为白噪声序列,选取显著水平 α=5%,

若当检验统计量大于 $\chi^2_{1,a}(m)$ 分位点,则拒绝残差序列

为白噪声的原假设,认为模型未充分提取有效信息, 需要重新拟合模型。

Ljung-Box 的 χ^2 检验为:

$$\chi^{2} = n(n+2) \sum_{k=1}^{m} \frac{\eta_{k}^{2}}{n \cdot k}, \qquad (8)$$

式中: n 为序列总数; η_k^2 为残差序列的自相关系数。 1.2.6 误差评价指标

本文采用相关系数(R²)、平均绝对误差(MAE) 和均方根误差(RMSE)对模型模拟精度进行评估^[19]。

2 结果与分析

2.1 地温趋势变化分析

表 1 为各季平均地温进行线性倾向估计、Sen's 斜率估计和MK趋势检验表。由表 1 可知,春季 0~160 cm 土 层 气 候 倾 向 率 为 正, 气 候 倾 向 率 为 0.120~0.434 ℃/10 a, 0 cm 土层地温增幅最大,达到 0.434 ℃/10 a,各土层地温均通过 0.01 显著性水平,表明五道沟地区 0~160 cm 土层春季平均地温呈显著上升趋势。夏季 0~160 cm 土层地温气候倾向率均为负,除 0、10 cm 土层外各土层地温均通过 0.05 显著性水平,表明夏季平均地温存在显著的下降趋势。秋季浅层地温(0~40 cm 土层)气候倾向率为正,深层地温(160~320 cm 土层)气候倾向率为负,浅层 0、20 cm 土层地温通过 0.05 显著性水平,具有显著升温趋势。冬季 0~160 cm 土层气候倾向率为正,且均通过 0.01 显著性水平,冬季平均地温增温趋势显著。320 cm 土层 4 个季节平均地温气候倾向率均为负,仅冬季通过 0.05 显著性水平,降温趋势显著。

2.2 地温的突变性检验

图 1 为五道沟地区 0~320 cm 土层春季平均地温 突变检验图,在给定 a=0.05 的显著性水平下,UF 超 出 U_{0.05}=±1.96 范围,表明地温具有显著变化趋势; UF 曲线和 UB 曲线的交点所对应的时间就是突变时 间。图 1 表明 0、10、20、40、160 cm 土层分别在 2006、 2013、2012、2015、2018 年前后发生突变。发生突 变后 UF 曲线均超出临界线,表明地温增温趋势显著。 320 cm 土层地温在 1972 年前后发生突变,1984— 2022 年 UF 曲线超出临界线,且 UF 统计值小于 0, 表明在此期间 320 cm 土层地温具有显著下降趋势。

表1 五道沟地区 0~320 cm 土层季平均地温趋势检验表

Tab.1 Examination of seasonal mean ground temperature trends

from 0~320 cm in the Wudaogou area

	fioli 0.4320 cm m u	c wuu	iogou ai	Ja		
土层深度/cm	指标	春季	夏季	秋季	冬季	
	气候倾向率/(℃ (10 a) ⁻¹)	0.434	-0.119	0.147	0.312	
0	α	0.000	0.236	0.034	0.000	
0	β	0.408	-0.075	0.043	0.370	
	MK-Z	4.31	-1.26	1.65	4.09	
	气候倾向率/(℃ (10 a) ⁻¹)	0.182	-0.135	0.099	0.213	
10	α	0.002	0.081	0.063	0.001	
10	β	0.184	-0.052	0.038	0.342	
	MK-Z	3.00	-1.65	1.39	3.29	
20	气候倾向率/(℃ (10 a) ⁻¹)	0.203	-0.146	0.130	0.269	
	α	0.000	0.025	0.015	0.000	
	β	0.170	-0.054	0.104	0.375	
	MK-Z	3.64	-1.99	2.41	4.37	
	气候倾向率/(℃ (10 a) ⁻¹)	0.120	-0.186	0.007	0.228	
40	α	0.013	0.005	0.931	0.000	
40	β	0.122	-0.073	0.037	0.300	
	MK-Z	2.79	-2.84	1.05	4.11	
	气候倾向率/(℃ (10 a) ⁻¹)	0.132	-0.071	-0.017	0.104	
160	α	0.000	0.056	0.587	0.000	
	β	0.091	-0.039	-0.016	0.129	
	MK-Z	3.45	-2.60	-1.33	3.65	
320	气候倾向率/(℃ (10 a) ⁻¹)	-0.105	-0.027	-0.056	-0.122	
	α	0.170	0.655	0.410	0.067	
	β	-0.026	0.002	-0.006	-0.022	
	MK-Z	-1.85	0.23	-0.48	-2.04	



图1 五道沟地区 0~320 cm 土层春季平均地温 MK 突变检验

Fig.1 Test for MK mutation in spring mean ground temperature at 0~320 cm in the Wudaogou area

2.3 地温时间序列的 SARIMA 模型构建

2.3.1 序列平稳性检验

采用 1964 年 1 月—2020 年 12 月地温数据作为

分析建模数据,2021年1月—2022年12月地温数据 作为检验数据,对预测模型的精度进行检验。以0cm 土层地温数据为例,建立地温预测模型,各年度不同 月份地温波动相似,研究期内1月温度最低为1.8 ℃, 7月温度最高为32.1 ℃,0 cm 土层地温具有显著上 升趋势并且存在显著突变点,故研究区域地温时间序 列为非平稳时间序列。

表 2 为地温时间序列 ADF 平稳性检验表。由表 2 可知, 3 种不同临界水平下的 ADF 统计量均小于对 应统计水平下的临界值,表明原地温时间序列存在单 位根从而判断原序列为不平稳序列,故需对原时间序 列进行差分处理。由一阶差分处理后的地温时间序列 ADF 检验结果可知,进行差分处理后的地温时间序 列显著性 *P*<0.05 通过 ADF 单位根检验接受原假设,表明一阶非季节性差分处理后的时间序列为平稳序 列。图 2 为一阶差分处理后的自相关图和偏自相关图,由图 2 可知,经过一阶差分处理后的地温时间序列



ACF 图呈周期性震荡。为了消除周期性趋势,根据平均地温物理意义,再对一阶差分处理后的时间序列进行周期为 12 的季节性差分,季节差分处理后地温序列的 ACF 和 PACF 见图 3。由图 3 可知,经过季节性差分处理后的地温时间序列不具有周期性,满足 SARIMA 模型建模要求。

表 2 地温时间序列 ADF 平稳性检验

Tab.2 ADF smoothness test

地温时间 序列处理	f统计量	1%水平	5%水平	10%水平	P 值
原始地温 时间序列	0.490	-2.568	-1.941	-1.616	0.821
一阶差分 处理	-22.056	-2.568	-1.941	-1.616	0.000



图 2 一阶非季节差分时间序列自相关图和偏自相关图

Fig.2 Autocorrelation and partial autocorrelation plots of first order seasonal difference time series

2.3.2 模型构建与参数检验

初步分析五道沟地区地温时间序列 SARIMA 模型中模型参数可知,原地温时间序列经过一次非季节性差分和一次周期为 12 的季节性差分后满足建模要求,因此判断 *d、D*取 1,*S*可取 12。根据差分处理后的自相关图和偏自相关图(图 3)可以看出,自相

关图在一阶呈现截尾特性,偏自相关图则呈现拖尾衰减,因此,初步确定非季节移动平均阶数 q 值取 1, 非季节自回归阶数 p 值取 0 或 1,自相关图在 12 阶 后逐渐趋近于 0,偏自相关图在 36 阶后逐渐趋于 0, 则可判断 P 值为 1,Q 值为 2~3。



Fig.3 Seasonal differential time series autocorrelation and partial autocorrelation plots

结合 AIC、BIC 值(表 3)进一步确定模型参数 P、Q 阶数,通常认为 AIC、BIC 值较小能有效降低 模型复杂度,从而避免模型出现过度拟合。通过 R 语 言 获 取 AIC 值 最 小 模 型,结 果 表 明 模 型 SARIMA(1,1,1)(1,1,2)₁₂的 AIC、BIC 值均最小,选取 此模型作为最优模型。

表3模型不同阶数的AIC值和BIC值

Tab.3AIC and BIC values for different orders of the model

模型阶数	AIC	BIC
SARIMA(0,1,1),(1,1,2) ₁₂	2 736.65	2 759.37
SARIMA(0,1,1),(1,1,3) ₁₂	2 738.65	2 765.92
SARIMA(1,1,1),(1,1,2) ₁₂	2 727.50	2 754.77
SARIMA(1,1,1),(1,1,2) ₁₂	2 729.46	2 761.27

采用极大似然法对上述最优模型的自回归系数φ 和滑动平均系数θ进行参数估计,并对模型参数进行 显著性检验。模型参数及显著性检验结果见表4。由 表4可知,模型参数通过显著性检验。

表4 模型参数显著性检验

Tab.4 Significance tests for model parameters

变量	系数	f统计量	<i>P</i> 值
<i>ar</i> (1)	0.132	3.381	0.000
<i>ma</i> (1)	-0.982	-89.191	0.000
Sar(12)	-0.979	-6.601	0.000
Sma(12)	0.068	-10.153	0.000
Sma(24)	-0.907	-6.782	0.000

SARIMA(1,1,1)(1,1,2)₁₂ 拟合后的标准化残差序 列分布直方图(图4),残差分布QQ图(图5)。 由图4和图5可知,地温残差序列基本服从正态分布,标准化残差自相关图表明残差序列基本服从正态分布,标准化残差自相关图表明残差序列的ACF基本落于2倍误差范围内,进一步使用LJung-Box/Q检验对标准化模型残差进行检验,前20行的P值均大于0.05 接受原假设,故SARIMA模型提取后的残差序列为高斯白噪声序列,该模型较好的提取了原始序列中的 有效成分,可以用来预测0cm土层地温变化。









根据 R 语言计算各参数得出 0 cm 土层地温预测 模型 SARIMA(1,1,1)(1,1,2)₁₂ 表达式为:

 $(1-B)(1-B^{12})(1+0.132\ 2B)(1-0.981\ 8B^{12})x_t =$

 $(1-0.979B)(1+0.068 4B^{12}-0.906 7B^{24})\varepsilon_t$

同理,10 cm 土层地温预测模型 SARIMA(0,1,2) (0,1,2);表达式为:

 $(1-B)(1-B^{12})x_t = (1+0.770 \ 1B+0.178B^2)$

$$(1+0.882\ 8B^{12}+0.226B^{24})\varepsilon_t$$

20 cm 土层地温预测模型 SARIMA(0,1,2)(0,1,2)₁₂ 表达式为:

 $(1-B)(1-B^{12})x_t = (1-0.737\ 3B-0.209\ 9B^2)$

 $(1-0.855 9B^{12}-0.030 4B^{24})\varepsilon_t$

40 cm 土层地温预测模型 SARIMA(1,1,1)(0,1,1)₁₂ 表达式为:

 $(1-B)(1-B^{12}) (1+0.3929B^{12})x_t =$

 $(1-0.968\ 5B)(1-0.894\ 4B^{12})\varepsilon_t$

160 cm 土层地温预测模型 SARIMA(1,1,1)(1,1,2)₁₂ 表达式为:

 $(1-B)(1-B^{12})(1+0.6327B)(1+0.7954B^{12})x_t =$

 $(1-0.975 \ 4B)(1-1.576 \ 6B^{12}+0.595 \ 9B^{24})\varepsilon_t$

320 cm 土层地温预测模型 SARIMA(2,1,1)(0,1,1)₁₂ 表达式为:

 $(1-B)(1-B^{12})(1+0.735 4B+0.1446B^2)x_t =$

 $(1-0.988\ 1B)(1-0.984\ 80B^{12})\varepsilon_t$

2.3.3 模型拟合与预测

表 5 为地温预测模型进行模型拟合精度检验结果。 由表 5 可知,所有预测模型的 R²均达到 0.95 以上,表 明模型拟合程度较好;MAE 除 0 cm 土层外均<1,RMSE 为 0.476~1.672,误差较小。

根据上文建立的 SARIMA 模型,利用 Eviews 软件对 2020 年 1 月一2022 年 12 月地温进行动态预测,表 6 为模型预测精度检验结果。由表 6 可知,模型预测值和实测值之间 *R*² 均在 0.95 以上,表明模型预测程度较好;模型整体与实测地温值呈现出一致的变化趋势;模型整体预测效果较优,可用于五道沟地区地温预测。

衣)	模型拟合有度评价指标	

1ab.5 Indicators for evaluating the accuracy of the model f	Tab.5	Indicators	for ev	valuating	the	accuracy	/ of	the	model	fi
---	-------	------------	--------	-----------	-----	----------	------	-----	-------	----

土层深度/cm	R^2	MAE	RMSE
0	0.977 3	1.296	1.672
10	0.985 0	0.903	1.141
20	0.986 2	0.810	1.024
40	0.987 1	0.679	0.866
160	0.994 2	0.246	0.337
320	0.963 3	0.224	0.476

表 6 模型预测精度评价指标

Tab.6Evaluation indicators for model prediction accuracy

土层深度/cm	R^2	MAE	RMSE
0	0.970 3	1.666	2.139
10	0.976 7	1.219	1.484
20	0.985 3	0.838	1.118
40	0.981 8	0.913	1.146
160	0.986 3	0.506	0.698
320	0.972 9	0.390	0.525

3 讨论

本研究以五道沟水文实验站为淮北平原典型站 点,探究地温季尺度变化特征和突变规律旨在建立不 同深度(0~320 cm)地温预测模型。在全球气候变暖的 背景下^[20],本研究表明各土层地温除夏季外均呈显著 增加趋势,春、冬季地温对气温的响应较夏、秋季敏 感,土层深度弱化了地温对气温的响应,MK 突变结 果显示各层地温均存在显著突变点,突变后季平均地 温变化率呈显著性变化。这与淮河源地区^[21]及内蒙古 赤峰地区^[22]基本一致。

采用时间序列分析方法建立不同深度地温预测 模型,这与前人[10-11]通过建立地温与各气象因子[6,23] 间的相关关系来预测地温有所差异。时间序列分析方 法认为X_t仅与当前时刻之前的时间序列X_{tp}及独立随 机成分 E_t有关,因此模拟预报地温时不需要输入未来 气象数据。马力等^[12]应用 ARIMA 模型对三峡库区局 地环境温度进行的趋势和预测分析结果良好。本研究 在 ARIMA 模型的基础上采用考虑季节性和周期性变 化的 SARIMA 模型,现有数据显示研究区域内地温 时间序列为季节性非平稳时间序列,且平稳性随着土 层深度增加而增加,各层地温虽存在波动和突变点, 但不存在单一且显著的变化趋势,这与五道沟相关研 究^[7,24]基本一致。模型整体预测精度随土层深度增加 而增加,这是由于 SARIMA 模型适用于自相关性强、 平稳性高的时间序列,浅层地温受气温变化影响大, 年际波动频繁从而不满足平稳性条件。

前文建立模型整体精度较高,能准确预测不同土 层地温变化趋势,整体预测值和实测值之间 R²均在 0.95以上,但对地温数据极值预测结果较差。本文仅 建立一个典型站点预测模型,模型在淮北平原其他区 域的适用性以及更大尺度的地温预测模型还有待进 一步研究。

4 结 论

1)五道沟地区季尺度地温变化规律存在差异。 春季、冬季 0~160 cm 土层平均地温呈显著上升趋势; 夏季 0~160 cm 土层(0、10 cm 土层除外)呈显著下 降趋势;秋季浅层地温(0~40 cm 土层)呈不显著上 升趋势,深层地温(160~320 cm)呈不显著下降趋势。 320 cm 地温 4 个季节气候倾向率均为负,其中冬季降 温趋势显著。

2) 春季 0、10、20、40、160、320 cm 土层地温 分别在 2006、2013、2012、2015、2018、1972 年前 后发生突变,其中,0~160 cm 土层地温突变后增温 趋势显著,320 cm 土层地温突变后降温趋势显著。

3)4 个季节各土层地温都存在显著趋势项和突 变点,地温时间序列平稳性随土层深度增加而增加。

 4)不同土层地温预测模型精度较高,可用于淮 北平原地区地温预测。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

 张威,纪然.辽宁省地表温度时空变化及影响因素[J]. 生态学报, 2019, 39(18): 6 772-6 784.
 ZHANG Wei, JI Ran. Analysis of spatio-temporal variation and factors

ZHANG wei, JI Ran. Analysis of spatio-temporal variation and factors influencing surface temperature in Liaoning Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(18): 6 772-6 784.

[2] 王雪姣,王森,吉春容,等. 1961—2015 年新疆 0 cm 地温的时空分 布特征及突变分析[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(4): 165-169.
WANG Xuejiao, WANG Sen, JI Chunrong, et al. Spatial-temporal characteristics and mutation analysis of ground temperature in Xinjiang from 1961 to 2015[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(4): 165-169.

- [3] 李述训,南卓铜,赵林. 冻融作用对系统与环境间能量交换的影响[J]. 冰川冻土, 2002, 24(2): 109-115.
 LI Shuxun, NAN Zhuotong, ZHAO Lin. Impact of freezing and thawing on energy exchange between the system and environment[J]. Journal of Glaciolgy and Geocryology, 2002, 24(2): 109-115.
- [4] 张慧. 地温变化过程及其机理研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.

ZHANG Hui. The research of the characteristic and mechanism of soil temperature change in China[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017.

[5] 李铭, 王洪祥. 大连地区浅层地温变化特征分析[J]. 现代农业科技, 2022(12): 129-132.
LI Ming, WANG Hongxiang. Analysis on change characteristics of shallow ground temperature in Dalian area[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2022(12): 129-132.

[6] 赵雯颉, 鞠琴, 张译尹, 等. 五道沟实验站地温对气温和降水的响应[J]. 水文, 2023, 43(1): 102-107.
ZHAO Wenjie, JU Qin, ZHANG Yiyin, et al. Ground temperature variation and its response to air temperature and precipitation at Wudaogou experimental station[J]. Journal of China Hydrology, 2023, 43(1): 102-107.

- [7] 刘明亮, 王振龙, 吕海深, 等. 五道沟地区 1971-2020 年地温月尺 度变化及其对气温的响应[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(2): 83-90.
 LIU Mingliang, WANG Zhenlong, LYU Haisheng, et al. Change in temperature over the past 50 years at Wudaogou and its influence on soil temperature at different depths[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(2): 83-90.
- [8] 王佳琳,潘志华,韩国琳,等. 1961—2010年中国 0 cm 地温变化特 征及其与气温变化的关系[J]. 资源科学, 2016, 38(9): 1 733-1 741.
 WANG Jialin, PAN Zhihua, HAN Guolin, et al. Variation in ground temperature at a depth of 0 cm and the relationship with air temperature in China from 1961 to 2010[J]. Resources Science, 2016, 38(9): 1 733-1 741.
- [9] 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. ZHANG Lei, GUO Anhong, CAO Yun, et al. The spatial-temporal variations of ground temperature at the depth of 0 cm in different regions across China during 1961—2020[J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42(3): 716-724.
- [10] 陈鹏狮, 张玉书, 冯锐, 等. 50 年来辽宁省地温变化规律及播种期地 温预报研究[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(6): 163-168. CHEN Pengshi, ZHANG Yushu, FENG Rui, et al. The changes of ground temperature and the forecast of ground temperature in sowing period in Liaoning Province for last 50 years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(6): 163-168.
- [11] 宋丽萍,韩基良,刘字飞,等.哈尔滨市冬季地面温度变化特征及预 报模型[J].黑龙江气象,2014,31(4):28-30,38.
- [12] 马力,于瑞林,李杰,等.基于时间序列分析并预测三峡库区局地环 境温度的变化[J].中国农业气象,2018,39(1):9-17.
 MA Li, YU Ruilin, LI Jie, et al. Research on local environmental temperature change and forecast in the Three Gorges Reservoir area based on time series analysis[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2018, 39(1): 9-17.
- [13] 查显宝,王双涛,罗平平,等.降水时空分布及变化特征分析:以安徽省为例[J]. 灌溉排水学报,2023,42(1):112-120.
 ZHA Xianbao, WANG Shuangtao, LUO Pingping, et al. Spatiotemporal variation in precipitation across Anhui Province[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(1): 112-120.
- [14] 王永文,刘惠英. 赣江上游章水流域1955—2015年降雨量时空变化[J]. 水土保持研究, 2019, 26(4): 105-110.
 WANG Yongwen, LIU Huiying. Spatio-temporal changes of precipitation in Zhang River watershed in the upper region of Ganjiang watershed during 1955—2015[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(4): 105-110.
- [15] 孙晓婷, 任刚红, 杜坤, 等. 基于灰色关联法的月降雨量预测[J]. 灌 溉排水学报, 2019, 38(1): 90-95. SUN Xiaoting, REN Ganghong, DU Kun, et al. Predicting monthly rainfall using the grey-correlation method[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(1): 90-95.
- [16] 李攀凤,马祖军,孙浩. 基于 SARIMA 组合预测模型的血液供需预 测研究[J]. 工业工程与管理, 2023, 28(3): 176-186.

LI Panfeng, MA Zujun, SUN Hao. SARIMA-based combined forecasting methods for blood supply and demand[J]. Industrial Engineering and Management, 2023, 28(3): 176-186.

- [17] 许亮,郭高轩.典型北方山前岩溶泉历史流量序列重建研究[J].水 文, 2023, 43(3): 88-92.
 XU Liang, GUO Gaoxuan. Study on reconstruction of historical flow sequence of typical Karst springs in Northern piedmont[J]. Journal of China Hydrology, 2023, 43(3): 88-92.
- [18] 李洁, 彭其渊, 杨宇翔. 基于 SARIMA 模型的广珠城际铁路客流量 预测[J]. 西南交通大学学报, 2020, 55(1): 41-51.
 LI Jie, PENG Qiyuan, YANG Yuxiang. Passenger flow prediction for Guangzhou-Zhuhai intercity railway based on SARIMA model[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2020, 55(1): 41-51.
- [19] 姚婷月, 王怡宁, 石磊韬, 等. 利用叶面积指数和气象因子修正双作物系数估算夏玉米蒸散量[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(2): 1-8. YAO Tingyue, WANG Yining, SHI Leitao, et al. Modifying the dual crop coefficients with leaf area index and meteorological factors to improve the estimated evapotranspiration from maize fields[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(2): 1-8.
- [20] 王怡宁,杨秒,王兵,等.五道沟地区"蒸发悖论"及成因探析[J]. 灌溉排水学报,2020,39(3):126-133.
 WANG Yining, YANG Miao, WANG Bing, et al. The "evaporation paradox" in Wudaogou area and its underlying mechanisms[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(3): 126-133.
- [21] 刘明华,马金梦,王黎明,等.淮河源浅层地温时空变化及其对全球 增暖停滞的响应[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2023, 36(2): 180-185.

LIU Minghua, MA Jinmeng, WANG Liming, et al. Spatial and temporal variations of shallow ground temperature in the Huaihe River Source and its response to recent global warming hiatus[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2023, 36(2): 180-185.

[22] 郝明, 冯俊明, 冯哲, 等. 1961-2020 年内蒙古赤峰市地温和气温、
 降水变化特征及关系分析[J].内蒙古大学学报(自然科学版), 2022, 53(2): 194-202.

HAO Ming, FENG Junming, FENG Zhe, et al. Analysis of the characteristics and correlation of changes in ground temperature, air temperature and precipitation in Chifeng City, Inner Mongolia from 1961 to 2020[J]. Journal of Inner Mongolia University (Natural Science Edition), 2022, 53(2): 194-202.

- [23] 羊清雯,易雪,施晨晓,等.海南岛 0 cm 地温变化特征及其相关气象要素[J]. 气象科技, 2021, 49(3): 388-398.
 YANG Qingwen, YI Xue, SHI Chenxiao, et al. Variation characteristics of 0 cm ground temperature and its related meteorological elements over Hainan Island[J]. Meteorological Science and Technology, 2021, 49(3): 388-398.
- [24] 柴萌, 王振龙, 陈元芳, 等. 淮北南部区地温变化及其对气温变化的响应[J]. 土壤通报, 2020, 51(3): 568-573.
 CHAI Meng, WANG Zhenlong, CHEN Yuanfang, et al. Changes of soil temperature and its response to air temperature in the Southern area of Huaibei plain[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2020, 51(3): 568-573.

(下转第95页)

冯紫微 等:基于文献计量学的 SWAT 模型发展趋势研究

"Hydrological Processes " and "Water ". Non-Chinese authors who published most SWAT papers are Srinivasan R and Arnold J, both from the United States. Chinese authors who published most SWAT papers are Shen Zhenyao, Chen Lei and Ouyang Wei. ③ Beijing Normal University, the University of Texas, the University of Chinese Academy of Sciences, Hohai University, Wuhan University are the institutions that contributed most SWAT papers. Cooperation between countries and research institutions has promoted globalization and development of SWAT. ④ The application of SWAT is mainly in water resources, environmental science, and ecology. ⑤ The hotspots in SWAT are runoff simulation, assessment of the impact of land use and climate change on hydrological processes, soil erosion, pollution load. 【Conclusion】 SWAT has been widely used in different areas but its practical application still has some challenges. These include parameter calibrations and the associated uncertainties, model construction for different watersheds as well as the influence of different factors, impact of climate change and human activities.

Key words: SWAT model; bibliometrix; knowledge map; hydrology; Web of Science

责任编辑:赵宇龙

(上接第60页)

Spatiotemporal temperature variation in soil in Wudaogou area and its modelling using the SARIMA model

JIANG Xinping¹, WANG Qimeng^{1,2*}, LIU Meng³, WANG Faxin³,

LYU Haishen¹, CHEN Yu¹, LI Jie¹, WANG Zhenlong³

(1. Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Huaihe River Water Conservancy Commission, Ministry of Water Resources,

Bengbu 233000, China; 3. Anhui Province (Huaihe Commission, Ministry of Water Resources)

Institute of Water Resources Science, Hefei 230088, China)

Abstract: [Objective] Soil temperature is not only important for hydrological processes but also plays an imperative role in crop growth and soil biochemical reactions. Understanding its spatiotemporal variation is crucial to improving soil and hydrological management. The purpose of this paper is to investigate the applicability of the SARIMA model to model spatiotemporal change in temperature across the entire soil profile. [Method] The study is based on temperatures measured from 1964 to 2022 across a 0-320 cm profile located at the Wudaogou Hydrological Experimental Station, in Anhui province, China. Linear regression, Sen's slope estimation, MK test and other methods are used to analyze the seasonal change in temperature in different soil layers, and to establish the SARIMA model. [Result] ① In spring and winter, the temperature in 0-160 cm soil layer had been in increase from 1964 to 2022 at significant levels. Except in the 0-10 cm soil, summer temperature in other soil layers had been in decrease from 1964 to 2022 at significant levels. In the fall, the temperature had been increasing in the 0 and 20 cm soil layer, but decreasing in other soil layers. 2 The temperature in depths of 0, 10, 20, 40, and 160 cm had endured sudden drops in spring in 2006, 2013, 2012, 2015 and 2018, followed by significant increases. Since 1984, temperature in the 320 cm soil layer had begun to decrease significantly. ③ The correlation between measured and predicted temperature was >0.95. With the increase in soil depth, the correlation increases, MAE decreases from 1.666 to 0.390, and the RMSE decreases from 2.139 to 0.525. [Conclusion] The SARMA model is accurate to model spatiotemporal change in soil temperature across the entire 0-320 cm soil profile in Huaibei Plain area. Key words: soil temperature; characteristics of change; time series; SARIMA model

责任编辑: 白芳芳