

## 基于可公度性理论的干旱预测方法研究

李松旌<sup>1,2</sup>, 樊向阳<sup>1,3,4\*</sup>, 景若瑶<sup>1,2</sup>, 胡超<sup>1,3,4</sup>, 王和洲<sup>1</sup>, 黄仲冬<sup>1</sup>

(1. 中国农业科学院 农田灌溉研究所, 河南 新乡 453002; 2. 中国农业科学院 研究生院, 北京 100081; 3. 中国农业科学院 农业水资源高效安全利用重点开放实验室, 河南 新乡 453002; 4. 中国农业科学院 新乡农业水土环境野外科学观测试验站, 河南 新乡 453002)

**摘要:**【目的】为可公度性理论在干旱预测预警领域的拓展和应用提供依据。【方法】以河南省为例, 并依据该省1961—2016年历史干旱数据, 基于可公度性理论, 采用层次分析法和MATLAB、SAS软件进行干旱发生年份预测, 并与前人预测结果及蝴蝶结构图预测结果进行对比验证。【结果】基于可公度性理论的三元、四元和五元可公度预测模型, 预测2014年河南省发生严重干旱的频数最高, 即发生干旱可能性最大, 这与实际相符; 基于上述数据, 预测河南省2030年前发生严重干旱的年份为2023年, 这与蝴蝶结构图预测结果相符, 并与前人研究结果一致。【结论】该方法用于区域性干旱发生年份的预测时具有较强的实用性; 层次分析法及MATLAB、SAS软件的应用, 大大提高了模型计算速度, 并降低了主观因素对预测结果判别的人为影响, 提高了计算结果的准确程度。

**关键词:** 可公度性理论; 干旱预测; 层次分析法; 蝴蝶结构图

中图分类号: S166; S421

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2019231

李松旌, 樊向阳, 景若瑶, 等. 基于可公度性理论的干旱预测方法研究[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(2): 107-113, 137.

LI Songjing, FAN Xiangyang, JING Ruoyao, et al. Research on drought prediction method based on the theory of commensurability [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(2): 107-113, 137.

### 0 引言

干旱是全球普遍存在且对人类生产、生活造成损失和影响最为严重的一种自然灾害, 其具有随机性、持续时间长、影响范围广等特点<sup>[1]</sup>。干旱不仅造成水资源短缺、生态环境恶化等问题, 还可能引发经济失调、饥荒、社会动荡等社会问题<sup>[2-4]</sup>。因此, 提高对干旱发生频率、强度和持续时间的监测和早期预警水平, 从而避免干旱带来的负面影响, 是干旱研究领域的一项重要内容<sup>[5]</sup>。

干旱预测主要通过分析各种时间尺度上的干旱变量, 如降雨量、径流量、地下水位和土壤湿度等数据的时间序列来实现的<sup>[6-7]</sup>。国内外针对干旱预测开展了较多的研究, 早在1963年, E.J.GUMBEL<sup>[7]</sup>即利用第三渐进分布式模型进行了干旱预测, 但采用的线性回归模型需要收集气压、气温、海洋表面温度、风速、风向以及降水数据等诸多参数<sup>[8]</sup>; Lohani等<sup>[10]</sup>采用时间序列模型 (ARIMA) 进行了干旱短期预测; Cordery等<sup>[11]</sup>基于海表温度和内陆天气、急流、厄尔尼诺现象等相关参数进行了中长期干旱预测。国内学

者分别采用灰色系统理论<sup>[12-17]</sup>、森林随机模型 (RF)<sup>[18]</sup>、神经网络模型 (BP)<sup>[19-23]</sup>、极限学习机 (ELM)<sup>[24-25]</sup>等方法对干旱进行了预测研究, 其中灰色理论系统模型在中长期预测时存在较大偏差; RF在划分较多属性的数据上产出的属性权值可信度不高; BP具备较强的非线性拟合能力且预测精度较高, 但仍存在诸如局部极小化、结构选择不一、收敛速度慢等不足; 作为单隐层前馈神经网络算法的ELM虽然具有较快的学习速度, 但存在不稳定和泛化能力不足等缺点。

20世纪80年代, 我国学者翁文波基于自然界中普遍存在的周期性, 提出了可公度性理论<sup>[26]</sup>, 认为可公度是周期性的扩张, 并将可公度性理论应用到天灾预测科学中, 通过该理论验证了1976年唐山大地震, 成功预测了1982年我国华北地区的干旱、1991年长江洪水和1992年美国加州地震<sup>[27]</sup>等。1982—1992年间国内学者采用该理论先后预测各种自然灾害共252次, 准确率高达83.7%<sup>[28]</sup>; 国外学者也在材料结构<sup>[29]</sup>、天文<sup>[30]</sup>方面验证了基于可公度性理论预测方法的准确性。在干旱预测方面, 门可佩<sup>[32]</sup>利用可公度性理论及可公度系结构示意图预测了我国2000年、2004年、2010年和2016年的大面积干旱; 唐宝琪等<sup>[33]</sup>基于安徽省1961—2013年重大旱灾发生年份数据, 成功预测了安徽省2016年的干旱; 方兰<sup>[34]</sup>结合贵州省历史干旱数据预测了2013年的干旱。

收稿日期: 2019-09-06

基金项目: “十三五”重点研发计划课题 (2017YFD0800605)

作者简介: 李松旌 (1996-), 男, 河北唐山人。硕士研究生, 主要从事农业水资源安全高效利用研究。E-mail: 627888123@qq.com

通信作者: 樊向阳 (1974-), 男, 河南宜阳人。研究员, 主要从事农业水资源与水环境方面的研究。E-mail: fxy0504@126.com

然而,目前基于可公度性理论的预测普遍存在计算过程烦琐、计算量大、预测结果的判别受人为主观影响较大、不同元可公度式计算结果之间综合评价不够等,一定程度上制约了该方法的应用推广。为此,本研究基于可公度性理论,引入层次分析法(AHP)、MATLAB、SAS软件等进行区域干旱预测,并将预测结果与蝴蝶结构图及前人预测结果进行对比验证,以期提出一种便捷、快速、准确的干旱预测方法,为干旱预警决策提供依据。

## 1 研究方法

### 1.1 可公度性理论

#### 1.1.1 可公度预测模型

利用可公度性理论进行干旱等自然灾害预测时,通常采用三元、四元和五元可公度式进行预测<sup>[26-27,31]</sup>,其中:

三元可公度式为:

$$N_u = A + B - C, \quad (1)$$

四元可公度式为:

$$N_\Delta = A + B - C - D, \quad (2)$$

$$N_v = N_c + N_\Delta, \quad (3)$$

五元可公度式为:

$$N_w = A + B + C - D - E, \quad (4)$$

式中:  $N_u$ 、 $N_v$ 、 $N_w$  为预测的未来时间;  $N_\Delta$  为四元可公度式预测的时间间隔;  $N_c$  为历史数据由小到大排列后的最末数据;  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $E$  为选取的历史数据。

#### 1.1.2 可公度式频数计算

可公度式频数是表征干旱发生年份的重要指标。将发生干旱的历史年份按照时间顺序排列,并分别代入式(1)一式(4)进行外推,可求得各可公度式推求的灾害趋势年份及其对应的可公度式频数,频数越高,表明干旱发生的概率越大。本研究采用 MATLAB 和 R2018b 进行可公度式频数计算。

### 1.2 干旱发生年份预测

传统干旱预测方法是将三元、四元和五元可公度式计算的可公度式频数进行排序,选取频数均相对较高的年份作为预测的灾害发生年份<sup>[34-37]</sup>,但存在受人为主观影响较大及预测结果不准确的弊端。本研究采用层次分析法对三元、四元和五元可公度式频数计算结果进行综合评价,定量评价干旱发生的可能年份。

#### 1.2.1 建立层次结构模型

层次结构模型是将决策的目标、考虑的因素(决策准则)和决策对象按其相互关系分为顶层、中层和底层,本研究目标为干旱预测,决策准则为可公性理论的三元、四元和五元预测模型,决策对象为预测干旱发生年份。

#### 1.2.2 确定量化的标准

在对三元、四元、五元可公度式及各可公度式频数计算结果进行相互比较时,需要给定定量的标度。本文参考 A.L.Saaty 提出的标度方法<sup>[39]</sup>,该方法是由两两因素相互比较,采用相对尺度,以尽可能降低性质不同的诸因素相互比较的难度,进而提高准确度。

#### 1.2.3 建立判断矩阵

本文根据表 1 对三元、四元、五元可公度式预测模型及其分别对应的计算结果建立比较矩阵。

$$T = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{i1} & \cdots & a_{ij} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

式中:  $a_{ij}$  为因素  $i$  与因素  $j$  相比得到的重要性比值。

表 1 比例标度表

Table 1 Proportional scale table

标度 Calibration tolerance	涵义 Meaning
1	两个因素相比,具有同样重要性
3	两个因素相比,一个因素比另一个因素稍微重要
5	两个因素相比,一个因素比另一个因素明显重要
7	两个因素相比,一个因素比另一个因素强烈重要
9	两个因素相比,一个因素比另一个因素极端重要
倒数	因素 $i$ 与 $j$ 比较的判断 $a_{ij}$ , 则因素 $j$ 与 $i$ 比较的判断 $a_{ji} = 1/a_{ij}$
Reciprocal	断 $a_{ji} = 1/a_{ij}$

2, 4, 6, 8 分别为上述两相邻判断的中值

#### 1.2.4 层次总排序及一致性检验

层次总排序即将三元、四元、五元可公度式预测模型计算的频数权重按预测年份先后顺序分别排序,并对总排序进行一致性检验以确保精度,要求  $CR$  值均小于 0.1,即认为矩阵的不一致程度在容许范围之内,可采用其归一化特征向量作为权向量,否则要重新构造比较矩阵。

判断矩阵标准  $CR$  采用下式计算:

$$CR = CI/RI, \quad (6)$$

$$CI = (\lambda_{\max} - k)/(k - 1), \quad (7)$$

式中:  $RI$  为随机一致性指标,通过查询表 2 求得;  $\lambda_{\max}$  为判断矩阵的最大特征值;  $k$  为判断矩阵的阶数。

### 1.3 干旱预测结果的验证

本研究采用蝴蝶结构图法对同期干旱发生年份进行预测,并对上述方法预测结果进行对比验证。蝴蝶结构图法是一种基于等时间间隔反映变量之间多周期变化的方法<sup>[34]</sup>。蝴蝶结构随机预测概率与可能度对应关系见表 3,事件预测的可能性为:

$$P = E/F, \quad (8)$$

式中:  $F$  为用于预测的灾害总数;  $E$  为预测中涉及的灾害次数。

表 2 平均随机一致性指标  $RI$  标准值Table 2 Average random consistency index  $RI$  standard value

$n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$RI$	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51

表 3 蝴蝶结构图法预测的随机概率与可能度对应关系

Table 3 Correspondence between Random Probability and Possibility of Butterfly Structure Diagram Prediction

$P$	$P < 1\%$	$1\% \leq P < 10\%$	$10\% \leq P < 33\%$	$33\% \leq P < 66\%$	$66\% \leq P < 90\%$	$90\% \leq P < 99\%$	$P \geq 99\%$
可能度划分 Possible extent	非常不可能 Never possible	很不可能 Very unlikely	不太可能 Not very likely	不完全可能 Not entirely possible	可能 possible	基本可能 Basic possibility	很可能 Very likely

## 2 数据来源

本研究以河南省为例，采用河南省历史发生干旱年份数据进行模型验证和预测。河南省位于我国中东部、黄河中下游，是我国粮食产出大省，受暖温带亚热带、湿润半湿润季风气候和特殊的地貌格局影响，全年温度、降水量变化较大，导致干旱频发且时空分布复杂<sup>[39-40]</sup>，以春旱和夏旱为主，其中中度干旱主要发生在北部和西部地区，重度干旱主要发生在西部和中东部地区<sup>[41-42]</sup>。

表 4  $SPEI$  值干旱等级划分Table 4 Drought classification based on  $SPEI$ 

干旱等级 Drought classification	$SPEI$
无旱 No drought	$(+\infty, -0.5)$
轻度干旱 Light drought	$(-1.0, -0.5]$
中度干旱 Moderate drought	$(-1.5, -1.0]$
严重干旱 Severe drought	$(-2.0, -1.5]$
极端干旱 Extreme drought	$(-\infty, -2.0]$

依据 1961—2016 年共计 56 a 气象资料，按照中国气象局制定的基于降水蒸散指数 ( $SPEI$ ) 的干旱等级划分标准 (表 4)，其中 1961、1965、1966、1968、1972、1976、1978、1981、1986、1988、1997、2001、2013、2014 年共 14 个年份为严重干旱年份<sup>[43]</sup>。本研究依据该干旱年份数据进行基于可公度性理论的干旱预测模型验证及干旱预测，根据前 13 个干旱年份对 2014 年是否发生严重干旱进行预测，以验证该方法的实用性；进一步采用包括 2014 年的上述系列干旱年份数据，对河南省 2030 年前发生严重干旱的年份进行预测。

## 3 研究结果

### 3.1 可公度性理论干旱预测模型验证

利用受灾年份，构造可公度集  $X = \{1961, 1965, 1966, 1968, 1972, 1976, 1978, 1981, 1986, 1988, 1997, 2001, 2013\}$ ，即  $X_1=1961$ 、 $X_2=1965$ 、 $X_3=1966$ 、 $X_4=1968$ 、 $X_5=1972$ 、 $X_6=1976$ 、 $X_7=1978$ 、 $X_8=1981$ 、 $X_9=1986$ 、 $X_{10}=1992$ 、 $X_{11}=1997$ 、 $X_{12}=2001$ 、 $X_{13}=2013$ ，通过式 (1) 一式 (4) 计算系列干旱年份中最近干旱

年份后 10 a (即 2014—2023 年) 的三元、四元、五元可公度式频数，统计结果见表 5。由表 5 可知，2014 年四元和五元可公度式频数均为最大，且三元可公度式频数最小，据此可判定该年度河南省发生严重干旱的频率最高，这与实际情况相符。2014 年 7—8 月，河南省严重干旱导致 24.5 万人、8 万头大牲畜发生临时性吃水困难，秋粮受旱面积达 154 万  $\text{hm}^2$ <sup>[44]</sup>，表明可公度性理论可用于区域干旱年份预测。

表 5 三元、四元和五元可公度式频数计算结果

Table 5 Ternary, quaternary and quintuple commensurability frequency statistics

年份 Year	可公度式频数 Commensurability frequency		
	三元 Ternary	四元 Quaternary	五元 Quintuple
2014	4	62	110
2015	5	49	93
2016	4	43	100
2017	11	50	80
2018	6	46	91
2019	4	47	89
2020	3	49	89
2021	6	49	75
2022	5	56	88
2023	4	47	79

### 3.2 基于可公度性理论的干旱预测

#### 3.2.1 可公度性理论计算

采用包括 2014 年的上述干旱年份数据进行河南省 2030 年前干旱发生年份预测，得可公度集为  $X_1=1961$ 、 $X_2=1965$ 、 $X_3=1966$ 、 $X_4=1968$ 、 $X_5=1972$ 、 $X_6=1976$ 、 $X_7=1978$ 、 $X_8=1981$ 、 $X_9=1986$ 、 $X_{10}=1992$ 、 $X_{11}=1997$ 、 $X_{12}=2001$ 、 $X_{13}=2013$ 、 $X_{14}=2014$ ，算法同上，2019—2030 年可公度式频数计算结果表 6 所示。

#### 3.2.2 3 种预测方式独立性检验

利用 SAS 9.4/STAT 模块中的 FREQ 进行  $r \times c$  列表的卡方独立性检验，检验结果为  $P=0.999$ ，由于  $P > 0.05$ ，表明三元、四元和五元可公度式预测模型对受灾年份的预测互不相关，彼此独立，也表明综合考虑 3 种预测结果的准确性高于单一预测方法的准确性。

表 6 河南省不同预测年份三元、四元和五元可公度式频数计算结果

Table 6 Calculation results of ternary, quaternary and quaternary commensurability frequencies for the different predicted years of Henan Province

年份 Year	可公度式频数 Commensurability frequency		
	三元 Ternary	四元 Quaternary	五元 Quintuple
2019	8	58	136
2020	6	60	140
2021	8	66	127
2022	7	63	138
2023	6	69	136
2024	8	59	120
2025	6	56	124
2026	6	65	118
2027	5	54	115
2028	7	57	112
2029	6	59	111
2030	6	58	108

### 3.2.3 基于层次分析法综合分析

本研究采用层次分析法综合评价 3 种预测方法预测

$$\alpha = \{ 0.035 \ 0.316 \ 0.649 \}, \quad (9)$$

$$\beta = \begin{Bmatrix} 0.101 & 0.076 & 0.101 & 0.089 & 0.076 & 0.101 & 0.076 & 0.076 & 0.063 & 0.089 & 0.076 & 0.076 \\ 0.080 & 0.083 & 0.091 & 0.087 & 0.095 & 0.081 & 0.077 & 0.090 & 0.075 & 0.079 & 0.081 & 0.080 \\ 0.092 & 0.094 & 0.086 & 0.093 & 0.092 & 0.081 & 0.084 & 0.079 & 0.077 & 0.075 & 0.075 & 0.073 \end{Bmatrix}, \quad (10)$$

$$\alpha * \beta = \{ \gamma_1 \ \gamma_2 \ \gamma_3 \ \gamma_4 \ \gamma_5 \ \gamma_6 \ \gamma_7 \ \gamma_8 \ \gamma_9 \ \gamma_{10} \ \gamma_{11} \ \gamma_{12} \} = \{ 0.088 \ 0.009 \ 0.088 \ 0.091 \ 0.092 \ 0.082 \ 0.081 \ 0.083 \ 0.076 \ 0.077 \ 0.077 \ 0.075 \}, \quad (11)$$

由  $\alpha * \beta$  计算结果可知,  $\gamma_5$  为最大可能发生年份, 其对应年份为 2023 年, 即河南省 2023 年可能发生严重干旱。

### 3.3 基于蝴蝶结构图的干旱预测

蝴蝶结构图的对称分析数据同样选自上述干旱年份序列, 1986 年作为对称点, 相同间隔组为 7 组, 有较好的对称结构。计算结果表明, 1961 年以来 2、4、10、12、13、16、25 a 的准周期显著, 据此绘制蝴蝶结构图如图 2 所示。由图 2 可知, 25 a 周期出现了 5 次, 出现次数最多, 2022 年参与预测的灾害年份为 5 个, 2023 年参与预测的灾害年份为 12 个。根据式 (8) 计算得出 2022 年和 2023 年河南省发生严重干旱的概率分别为 38.46% 和 92.31%, 由表 3 可知, 2023 年河南省基本可能发生严重干旱。

结果。如图 1 所示, 建立层次结构模型, 第一层为目标层( $\alpha$ ), 第二层为指标层( $\beta_i$ ), 第三层为方案层( $\gamma_i$ )。



图 1 层次结构模型

Fig.1 Hierarchical model

$\beta_1$  表示三元预测模型,  $\beta_2$  表示四元预测模型,  $\beta_3$  表示五元预测模型;  $\gamma_1 \sim \gamma_{12}$  分别表示 2019、2020、2021、2022、2023、2024、2025、2026、2027、2028、2029、2030 年。由层次结构模型、矩阵元素  $a_{ij}$  标度方法和可公度性理论频数统计, 建立  $\alpha-\beta_i$ 、 $\beta_1-\gamma_i$ 、 $\beta_2-\gamma_i$  和  $\beta_3-\gamma_i$  4 组判断矩阵, 由式 (6) 计算  $CR$ , 结果表明各矩阵  $CR$  值均小于 0.1, 表明各矩阵具有较好的一致性。进一步计算得出最终的层次排序总权重, 并将其转化为矩阵  $\alpha$ 、 $\beta$ :

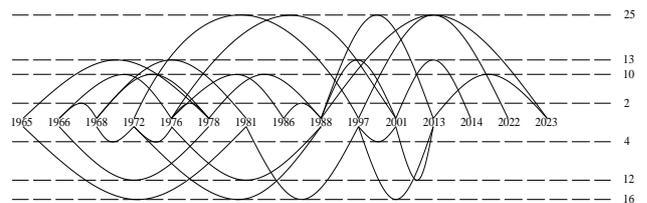


图 2 蝴蝶结构图

Fig.2 Butterfly structure diagram

## 4 讨论

目前, 基于可公度性理论的干旱预测方法的应用和推广受计算过程烦琐、计算量大、预测结果的判别人为主观影响较大、不同元可公度式计算结果之间缺乏综合评价等缺点的限制。为此, 本研究以河南省为例, 基于可公度性理论, 结合层次分析法 (AHP)、MATLAB 和 SAS 软件对河南省的严重干旱年份进行预测, 得出河南省可能在 2023 年发生严重干旱; 蝴

蝶结构图法预测结果同样表明 2023 年河南省发生严重干旱的概率最高, 为 92.31%; 基于上述 2 种预测方法一致的预测结果表明 2023 年河南省发生严重干旱的可能性较大, 这与温婷婷<sup>[45]</sup>利用马尔可夫链预测模型状态转移规律预测、阎苗渊<sup>[46]</sup>基于灰色灾变及拓扑预测、张功瑾<sup>[47]</sup>采用小波分析、李俊亭<sup>[48]</sup>利用综合气象干旱指数-Ci 指数等预测结果相似, 进一步印证了基于可公度理论的层次分析法在干旱预测方面的实用性和准确性。

本研究仅对基于可公度性理论的干旱预测方法的计算、结果的判定进行优化, 目前采用该方法进行干旱预测多数是在年尺度上, 本研究亦然, 但基于该方法的干旱预测仍缺少在季节尺度和空间尺度上的研究, 因此, 收集区域干旱其他尺度的历史周期数据、气象数据, 并结合该方法进行多尺度的干旱预测, 以进一步提高干旱预测的实用性及精确性, 为干旱预警提供理论依据。

## 5 结论

1) 以河南省为例, 采用历史严重干旱发生年份数据资料, 对基于可公度性理论和层次分析法的区域干旱预测方法进行了模型验证和未来干旱发生年份预测, 结果表明, 河南省 2030 年前发生严重干旱的可能年份为 2023 年, 这一预测结果与蝴蝶结构图法及前人预测结果一致, 表明该方法在用于区域干旱年份预测时具有较强的实用性。

2) 该方法采用 MATLAB 软件进行数据计算, 较传统可公度式频数计算方法节约了计算时间, 且层次分析法的应用量化了三元、四元和五元可公度预测模型预测结果的综合分析过程, 降低了主观因素对预测结果判别的人为影响, 提高了预测结果的准确性。

### 参考文献:

- [1] WMO. Early warning systems for drought preparedness and drought management[S]. Proceedings of an Expert Group Meeting. Lisbon, Portugal, 2000.
- [2] 张强, 张良, 崔显成, 等. 干旱监测与评价技术的发展及其科学挑战[J]. 地球科学进展, 2011, 26(7): 763-778.  
ZHANG Qiang, ZHANG Liang, CUI Xiancheng, et al. development and scientific challenges of drought monitoring and evaluation technology[J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(7): 763-778.
- [3] SIVAKUMAR M V K, STEFANSKI R, BAZZA M, et al. High level meeting on national drought policy: summary and major outcomes[J]. Weather and Climate Extremes, 2014, 3:126-132.
- [4] 梁烜赫, 徐晨, 赵鑫, 等. 干旱对不同种植密度玉米生长发育及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(11): 15-19.  
LIANG Yihe, XU Chen, ZHAO Xin, et al. The Impact of Drought and

- Planting Density on Growth and Yield of Maize[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(11): 15-19.
- [5] 郭妮, 王小平. 遥感干旱应用技术进展及面临的技术问题与发展机遇[J]. 干旱气象, 2015, 33(1): 1-18.  
GUO Ni, WANG Xiaoping. Advances in Remote Sensing Drought Application Technology and Technical Problems and Development Opportunities[J]. Journal of Arid Meteorology, 2015, 33(1): 1-18.
- [6] PANU U S, SHARMA T C. Challenges in drought research: some perspectives and future directions[J]. International Association of Scientific Hydrology Bulletin, 2002, 47(sup1): 19-30.
- [7] 孙可可, 陈青青, 陈超群, 等. 基于水资源干旱指数的阿克苏绿洲干旱预警模式及其应用[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(5): 84-89.  
SUN Keke, CHEN Qingqing, CHEN Chaoqun, et al. A drought index-based model and its application to aksu oasis[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(5): 84-89.
- [8] GUMBEL E J. Statistical forecast of droughts[J]. International Association of Scientific Hydrology Bulletin, 1963, 8(1): 5-23.
- [9] KUMAR V, PANU U. Predictive Assessment of Severity of Agricultural Droughts Based on Agro-Climatic Factors[J]. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 1997, 33(6): 1 225-1 264.
- [10] LOHANI V K, Loganathan G V. An Early Warning System For Drought Management Using The Palmer Drought Index1[J]. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 1997, 33(6): 1 375-1 386.
- [11] CORDERY I, MCCALL M. A model for forecasting drought from teleconnections[J]. Water Resources Research, 2000, 36(3): 763-768.
- [12] 毛志, 冉红林. 基于灰色系统理论的铜仁市碧江区干旱预测研究[J]. 贵州工程应用技术学院学报, 2018, 36(3): 88-92.  
MAO Zhi, RAN Honhlin. Study on Drought Prediction in Bijiang District of Tongren City Based on Grey System Theory[J]. Journal of Guizhou College of Engineering and Applied Technology, 2018, 36(3): 88-92.
- [13] 刘代勇, 梁忠民, 赵卫民, 等. 灰色系统理论在干旱预测中的应用研究[J]. 水力发电, 2012, 38(2): 10-12.  
LIU Daiyong, LIANG Zhongmin, ZHAO Weimin, et al. application of grey system theory in drought prediction[J]. Water Power, 2012, 38(2): 10-12.
- [14] 王净, 贾红, 王今殊. 灰色系统理论在徐州地区气象干旱预测中的应用[J]. 徐州师范大学学报(自然科学版), 2011, 29(4): 75-78.  
WANG Jing, JIA Hong, WANG Jingshu. application of grey system theory in meteorological Drought Prediction in Xuzhou Area[J]. Journal of Xuzhou Normal University(Natural Science Edition), 2011, 29(4): 75-78.
- [15] 杜焕, 韩美, 刘园. 灰色系统理论在干旱预测中的应用[J]. 科技经济市场, 2010(9): 6-7.  
DU Huan, HAN Mei, LIU Yuan. Application of Grey System Theory in Drought Prediction[J]. Science & Technology Economic Market, 2010(9): 6-7.

- [16] 邓丽仙, 杨绍琼. 灰色系统理论在滇池流域干旱预测中的应用[J]. 人民长江, 2008(6): 26-28.  
DENG Lixian, YANG Shaoqiong. application of grey system theory in drought prediction in dianchi lake basin[J]. Yangtze River, 2008(6): 26-28.
- [17] 李燕, 李春光, 李永果, 等. 济宁市干旱特征分析及干旱预测[J]. 现代农业科技, 2007(6):138-139.  
LI Yan, LI Chunguang, LI Yongguo, et al. Analysis of Drought Characteristics and Drought Prediction in Jining City[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2007 (6): 138-139.
- [18] 党新成, 李新贤. 利用灰色系统理论预测新疆干旱趋势[J]. 干旱区研究, 1994(4): 69-73.  
DANG Xincheng, LI Xinxian. Prediction of Drought Trend in Xinjiang by Grey System Theory[J]. Arid Zone Research, 1994(4): 69-73.
- [19] 吴晶, 陈元芳, 余胜男. 基于随机森林模型的干旱预测研究[J]. 中国农村水利水电, 2016(11): 17-22.  
WU Jing, CHEN Yuanfang, YU Shengnan. A Study on Drought Prediction Based on Random Forest Model[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(11): 17-22.
- [20] 沈桂芳, 李敬明, 胡贤德, 等. 基于 T-S 模糊神经网络的农业干旱评估与预测模型[J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 2016, 32(6): 34-37.  
SHEN Guifang, LI Jingming, HU Xiande, et al. Agricultural drought assessment and prediction model based on T-S fuzzy neural network[J]. Natural Science Journal of Harbin Normal University, 2016, 32(6):34-37.
- [21] 李吉印. 基于 BP 神经网络马尔可夫模型的黄土丘陵半干旱区降水量预测[D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2016.  
LI Jiyin. Precipitation prediction in loess hilly semi-arid area based on BP neural network Markov model[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2016.
- [22] 李艳梅, 李广. 基于模糊聚类和神经网络的干旱等级预测模型[J]. 自动化与仪器仪表, 2014(4):148-150.  
LI Yanmei, LI Guang. Drought level prediction model based on fuzzy clustering and neural network[J]. Automation & Instrumentation, 2014(4): 148-150.
- [23] 李晓辉, 杨勇, 杨洪伟. 基于 BP 神经网络与灰色模型的干旱预测方法研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2014, 45(2): 253-256.  
LI Xiaohui, YANG Yong, YANG Hongwei. Study on drought prediction method based on BP neural network and grey model[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2014, 45(2):253-256.
- [24] 侯姗姗, 王鹏新, 田苗. 基于相空间重构与 RBF 神经网络的干旱预测模型[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(1): 224-230.  
HOU Wei, WANG Pengxin, TIAN Miao. A drought prediction model based on phase space reconstruction and RBF neural network[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(1):224-230.
- [25] 刘振男, 周靖楠. 基于在线序列-极限学习机的干旱预测[J]. 人民珠江, 2018, 39(8): 84-87.  
LIU Zhennan, ZHOU Jingnan. Drought prediction based on online sequence-extreme learning machine[J]. People's Pearl River, 2018, 39(8): 84-87.
- [26] 周靖楠, 刘振男. 基于自适应差分进化算法优化极限学习机的干旱预测方法[J]. 水电能源科学, 2018, 36(6): 6-9.  
ZHOU Jingnan, LIU Zhennan. Drought Prediction Method Based on Adaptive Differential Evolution Algorithm for Optimizing Extreme Learning Machine[J]. Hydroelectric Energy Science, 2018, 36(6): 6-9.
- [27] 翁文波. 预测论基础[M]. 北京:石油工业出版社,1984: 45.  
WENG Wenbo. Foundation of Predictive Theory[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1984: 45.
- [28] 翁文波. 可公度性[J]. 地球物理学报,1981(2): 151-154.  
WENG Wenbo. Commensurability [J]. Journal of Geophysics, 1981(2): 151-154.
- [29] 彭高辉, 张振伟, 马建琴. 基于可公度性理论的安徽省干旱预测[J]. 水电能源科学, 2012, 30(9): 6-8.  
PENG Gaohui, ZHANG Zhenwei, MA Jianqin. Drought Prediction in Anhui Province Based on the Theory of Complifiability[J]. Hydropower and Energy Science, 2012, 30(9): 6-8.
- [30] OZ I, LEVEN I, ITKIN Y, et al. Nanotube Motion on Layered Materials: A Registry Perspective [J]. Journal of Physical Chemistry C, 2016: 4 466-4 470.
- [31] PAPAIOZOU J C B, SZUSZKIEWICZ E. On the migration -induced resonances in a system of two planets with masses in the Earth mass range[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2010, 363(1): 153-176.
- [32] 门可佩. 我国旱涝灾害的可公度性及其预测研究[J]. 中国减灾, 1999(2): 16-20.  
MEN Kepei. The commensurability and prediction of drought and flood disasters in China [J]. China Disaster Reduction, 1999 (2): 16-20.
- [33] 唐宝琪, 延军平, 曹永旺, 等. 安徽省重大旱灾对称性特征及其趋势判断[J]. 地球与环境, 2015,43(6): 660-666.  
TANG Baoqi, YAN Junping, CAO Yongwang, et al. Symmetry characteristics and trend judgment of major droughts in Anhui Province[J]. Earth and Environment, 2015, 43(6): 660-666.
- [34] 方兰. 云贵地区旱涝变化时空结构及趋势判断[D]. 西安: 陕西师范大学, 2013.  
FANG Lan. Time and space structure and trend judgment of drought and flood change in Yungui area[D]. Xi 'an: Shaanxi Normal University, 2013.
- [35] 彭卓越, 张丽丽, 殷峻暹, 等. 基于可公度研究的东北地区洪水灾害预测[J]. 人民黄河, 2019,41(1):28-33,36.  
PENG Zhuoyue, ZHANG Lili, YIN Junxian, et al. Flood disaster prediction in Northeast China based on commensurability study[J]. Yellow River, 2019, 41 (1): 28-33, 36.
- [36] 武亚群, 延军平, 张平, 等. 巴基斯坦  $M_w \geq 5$  大地震时空对称与

- 旋转规律研究及趋势判断[J]. 浙江大学学报(理学版), 2019, 46(1): 111-120.
- WU Yaquin, YAN Junping, ZHANG Ping, et al. Research on time-space symmetry and rotation law of  $M_w \geq 7$  earthquake in Pakistan and trend judgment[J]. Journal of Zhejiang University(Science Edition), 2019, 46(1): 111-120.
- [37] 彭高辉, 马建琴, 贺渊博. 基于可公度理论的关联规则算法在干旱中的预测研究[J]. 南水北调与水利科技, 2013,11(2):151-153.
- PENG Gaohui, MA Jianqin, HE Yuanbo. Prediction of association rules algorithm based on commensurability theory in drought[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(2): 151-153.
- [38] 杨蓉, 延军平. 宁夏干旱灾害的时间对称性及趋势判断[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2015, 45(1): 131-134.
- YANG Rong, YAN Junping. Time symmetry and trend judgment of drought disasters in Ningxia[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2015, 45(1): 131-134.
- [39] SAATY T L, KEARNS K P. CHAPTER 4-Systems Characteristics and The Analytic Hierarchy Process[M].1985.
- [40] 秦琳琳, 宋艳红. 河南省近 53 年旱涝变化特征分析[J]. 曲阜师范大学学报(自然科学版), 2019,45(1): 28-32.
- QIN Linlin, SONG Yanhong. Analysis of the Characteristics of Drought and Flood Changes in Henan Province in Recent 53 Years[J]. Journal of Qufu Normal University(Natural Science Edition), 2019, 45(1): 28-32.
- [41] 陈少丹, 张利平, 汤柔馨, 等. 基于 *SPEI* 和 *TVDI* 的河南省干旱时空变化分析[J]. 农业工程学报, 2017,33(24): 126-132.
- CHEN Shaodan, ZHANG Liping, TANG Rouxin, et al. Analysis of the spatiotemporal variation of drought in Henan Province based on *SPEI* and *TVDI*[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017,33(24): 126-132.
- [42] 余方琳. 1960—2016 年河南省农业气象干旱时空分异及脆弱性分析[D]. 开封: 河南大学, 2018.
- YU Fanglin. Analysis of Spatial and Temporal Variation and Vulnerability of Agricultural Meteorological Drought in Henan Province from 1960 to 2016[D]. Kaifeng: Henan University, 2018.
- [43] 朱玲玲, 张竟竟, 李治国, 等. 基于 *SPI* 的河南省冬小麦生育期干旱时空变化特征分析[J]. 灌溉排水学报, 2018,37(5): 51-58.
- ZHU Lingling, ZHANG Jingjing, LI Zhiguo, et al. Analysing Spatiotemporal Variation of the Occurrence of Drought within the Growth Season of Winter Wheat in Henan Province Based on the Standardized Precipitation Index[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(5): 51-58.
- [44] 夏兴生, 朱秀芳, 潘耀忠, 等. 农作物干旱灾害实时风险监测研究: 以 2014 年河南干旱为例[J]. 自然灾害学报, 2016, 25(5): 28-36.
- XIA Xingsheng, ZHU Xiufang, PAN Yaozhong, et al. Research on real-time risk monitoring of crop drought disasters: Taking Henan drought in 2014 as an example[J]. Journal of Natural Disasters, 2016, 25(5):28-36.
- [45] 温婷婷. 河南省农业干旱风险分析及预测[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2015.
- WEN Tingting. Analysis and prediction of agricultural drought risk in Henan Province [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Hydropower, 2015.
- [46] 阎苗渊, 马细霞, 杨丽莉, 等. 基于灰色灾变及拓扑预测的干旱预测模型[J]. 人民黄河, 2012, 34(7): 71-72.
- YAN Miaoyuan, MA Xixia, YANG Lili, et al. Drought prediction model based on grey disaster and topological prediction[J]. Yellow River, 2012, 34(7): 71-72.
- [47] 张功瑾. 河南省农业干旱特征分析及风险评价[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2013.
- ZHANG Gongyu. Analysis and Risk Assessment of Agricultural Drought in Henan Province [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Hydropower, 2013.
- [48] 李俊亭, 竹磊磊, 李晔. 河南省春季降水的气候特征及干旱预测[J]. 人民黄河, 2010, 32(12): 68-70.
- LI Junting, ZHU Leilei, LI Yei. Climatic characteristics and drought prediction of spring precipitation in Henan Province[J]. Yellow River, 2010, 32(12): 68-70.

(下转第 137 页)