

王胜国, 许丽人, 庞宇婷, 等. 基于强度-持续时间-面积的干旱相似性研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(5): 101-110. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.05.008

WANG Shengguo, XU Liren, PANG Yuting, et al. Drought similarity analysis based on intensity-duration-area characteristics [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(5): 101-110. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.05.008

# 基于强度-持续时间-面积的干旱相似性研究

王胜国<sup>1</sup>, 许丽人<sup>1</sup>, 庞宇婷<sup>2</sup>, 谢振雷<sup>3</sup>, 赵星雨<sup>2</sup>, 李青<sup>3</sup>, 武于洁<sup>3</sup>, 郝增超<sup>2</sup>

(1. 地理信息工程国家重点实验室, 陕西 西安 710054; 2. 北京师范大学, 北京 100875;  
3. 航天宏图信息技术股份有限公司, 北京 100094)

**摘要:** 【目的】干旱具有发生缓慢, 影响范围广等特点, 对水资源、农业、能源等造成严重威胁。气候变化导致干旱发生更为频繁, 因此有必要加强干旱灾害的评估研究, 基于历史案例的相似分析是干旱灾害评估的重要手段。【方法】基于干旱强度、持续时间以及影响面积特征, 以1980—2021年云南省逐日降水与逐月气温数据为基础, 提出了一种干旱相似性的评估方法。首先基于游程理论分析云南省历史典型干旱事件的强度、持续时间与覆盖面积等特征。其次, 选取2019年干旱事件为典型案例评估该事件的演变过程。最后计算2019年干旱与历史极端干旱事件不同特征之间的距离, 并进行相似性评估。【结果】对2019年干旱事件进行相似性分析, 通过与识别的相似干旱事件进行空间对比, 表明识别的干旱事件强度-持续时间-面积的相似度较高(相似度超过80%)。【结论】提出的干旱相似性分析方法综合了干旱事件的强度、持续时间和覆盖面积特征, 可以较为准确地识别相似的干旱事件, 可为干旱灾情评估等防旱抗旱工作提供技术支持。

**关键词:** 干旱; 干旱特征; 相似性; 云南省; 气候变化; 时空变化; 降水; 水资源

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.05.008

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: P429

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)05-0101-10



与作者互动  
听语音·聊科研

## Drought similarity analysis based on intensity-duration-area characteristics

WANG Shengguo<sup>1</sup>, XU Liren<sup>1</sup>, PANG Yuting<sup>2</sup>, XIE Zhenlei<sup>3</sup>, ZHAO Xingyu<sup>2</sup>, LI Qing<sup>3</sup>,  
WU Yujie<sup>3</sup>, HAO Zengchao<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Geo-Information Engineering, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Piesat Information Technology Co., Ltd, Beijing 100094, China)

**Abstract:** [Objective] Droughts are characterized by their slow onset and widespread impacts, posing significant threats to water resources, agriculture, and energy. Climate change has increased the frequency of droughts and thus it is important to deepen our understanding of drought impact assessment, for which the similarity analysis of droughts based on historical events is a useful tool. [Methods] Based on daily precipitation and monthly temperature data from ERA5 in Yunnan Province for the period 1980—2021, this study analyzes drought intensity, duration, and coverage area, and proposes a method for drought similarity analysis.

收稿日期: 2024-07-18; 修回日期: 2024-09-06; 录用日期: 2024-09-10; 网络出版日期: 2024-10-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(42271024)

作者简介: 王胜国(1976—), 男, 副研究员, 博士, 主要从事气象保障技术研究。E-mail: shengguo007@sohu.com

通信作者: 郝增超(1982—), 男, 教授, 博士, 主要从事干旱监测预测研究。E-mail: haozc@bnu.edu.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Firstly, the run theory is employed to analyze the intensity, duration, and coverage area of historical droughts. Secondly, the 2019 drought event is selected as the case study to evaluate its evolutionary process. Finally, the distances of different characteristics between the 2019 drought event and other historical droughts in Yunnan Province are calculated for similarity assessment. [Results]By conducting the similarity assessment of the 2019 drought event and comparing the spatial variability, results show that the similarity between the targeted drought event and identified drought events is high (with a similarity measure of over 80%). [Conclusion]The drought similarity assessment method proposed in this study combines intensity, duration, and coverage area of drought events and performs well in identifying similar drought events, which can provide technical support for drought disaster assessment.

**Keywords:** drought; drought characteristics; similarity; Yunnan; climate change; spatiotemporal changes; precipitation; water resource

## 0 引言

干旱是一种发展缓慢的自然灾害,对自然生态系统和经济社会系统造成严重威胁。研究表明,全球超过 6 200 万  $\text{hm}^2$  的农田和牧场面临着紧迫的水资源压力和频发的干旱事件,影响约 3 亿人<sup>[1]</sup>。干旱不但造成水资源减少、粮食减产等直接影响,还可能进一步导致森林火灾、作物病虫害、沙尘暴等间接影响<sup>[2-5]</sup>。在气候变暖背景下,干旱可能发生更为频繁、持续时间延长、影响面积扩大,对水安全、粮食安全、能源安全等造成严重威胁<sup>[6-7]</sup>。因此有必要加强干旱评估研究,以有效应对干旱灾害。

在气象水文研究中,历史事件或者过程的相似性分析对于水文预测预报、防洪调度等具有重要参考意义<sup>[8-9]</sup>。如暴雨洪水的演变过程规律往往在历史雨洪事件中重复出现,呈现出相似的特征,这种相似性可以用于构建预测模型,服务于暴雨洪水的预测预警、防洪决策等<sup>[10-13]</sup>。王海军等<sup>[9]</sup>从历史洪水事件中获取多要素特征指标,利用欧氏距离对历次暴雨洪水进行相似性判别,构建了洪水修正外推预估技术,提高了洪水预报精度。陈建等<sup>[14]</sup>通过构建不同时期暴雨洪水特征的指标体系,得到判别洪水事件相似性的最优指标组合,基于历史相似洪水事件改进了洪水预报技术。LIN 等<sup>[12]</sup>提出了一种基于相似性搜索的极端洪水预报框架,通过改进模型输入、训练和输出的过程,提高了洪水预报的可靠性和准确性。

同时,基于历史事件的相似性分析可为灾情评估提供科学决策依据<sup>[15-18]</sup>。与传统的统计上报法、承载体易损性评估法等相比,基于历史案例的灾情评估具有数据需求相对较少、方法简便易于实现等优点<sup>[16]</sup>,目前已经应用于不同灾害的评估。夏兴生等<sup>[16]</sup>根据历史灾害指标,基于最小距离法建立历史

案例与当前灾害的相似度判断方法,构建了灾害评估模型,案例验证表明该方法可信度较高。曾婷婷等<sup>[17]</sup>对改进的基于历史相似案例空间推演的地震伤亡人口评估模型进行验证,结果表明该方法在灾情评估方面具有一定的实用价值。

在干旱灾情评估中,这种基于历史案例的相似性评估方法也逐步得到应用,一般采用强度、持续时间等特征,建立历史干旱事件及灾害数据库用于评估。干旱指数是干旱监测及灾情评估的重要手段,学者们开发了大量的基于气象水文不同变量的干旱指数,成功地应用于干旱监测及分析工作<sup>[19-22]</sup>。目前干旱相似性分析研究主要基于单一干旱指数<sup>[23-24]</sup>。如李艳旗等<sup>[23]</sup>通过比较历史同时段归一化植被指数的相似性,对河北省 1997 年 7 月的作物受旱灾影响程度进行了评估,相似结果可以较客观地反映的实际灾情。这种基于单一干旱指数的相似性分析仅考虑了干旱强度特征,忽视了持续时间等重要特征。夏兴生等<sup>[24]</sup>通过构建案例相似度评估指标体系,包括灾害发生时段内的自适应帕尔默指数(*sc-PDSI*)均值、标准化降水指数(*SPI*)均值和耕地归一化植被指数(*NDVI*)平均值,对河南省干旱灾情的实际案例进行了分析研究。该研究在相似性指标的选取中包含了干旱的历时和强度特征,但是相似性评价过程中未考虑干旱的空间信息。

综上,当前干旱相似性评价研究中,基于单一指数的相似性指标难以全面准确刻画干旱情势。近年来,随着对干旱复杂性认识的逐步加深,系统考虑多变量的综合干旱指数逐步发展起来<sup>[25-27]</sup>,目前已经广泛应用于干旱监测、预测及风险评估等研究<sup>[2]</sup>。另外,在干旱相似性分析过程中,当前研究较少考虑区域干旱的空间特征,可能导致识别的相似事件虽然相似度较高但是空间差异大的问题。因此,有必要综合考虑干旱的强度、持续时间、空间范围等特征,提

高干旱相似性分析的准确性。本文旨在建立一种基于综合干旱指数的强度-持续时间-面积多特征的干旱相似性分析方法,以云南省干旱事件为例,分析其历史极端干旱事件特征,并选择典型干旱事件,综合考虑空间干旱情势进行相似性分析。本研究可以为干旱灾情评估等工作提供技术支持。

## 1 研究区域

云南省位于中国西南地区,地形地势复杂多样,呈现西北高东南低的阶梯式走向(见图1)<sup>[28]</sup>。省内山地众多,占全省面积的84%<sup>[29]</sup>,呈现出明显的立体气候特征<sup>[30]</sup>,复杂的地形地貌造就了省内多样的气候类型,从西北向东南方向分别属于寒带气候类型、温带气候和干热河谷区气候<sup>[31]</sup>。云南省降水空间分配极不均匀,区域多年平均降水量达1 200 mm以上<sup>[32-33]</sup>,受区域的季风气候和地形变化影响,云南省干湿季节明显,各种气象要素差异大<sup>[29]</sup>。云南省的气候特点决定了区域内干旱易发多发的特征,有研究表明近年来云南省干旱有“常态化”的特点<sup>[34]</sup>,在气候变暖的背景下,云南省的冬旱和春旱发生频率增加<sup>[35-36]</sup>。

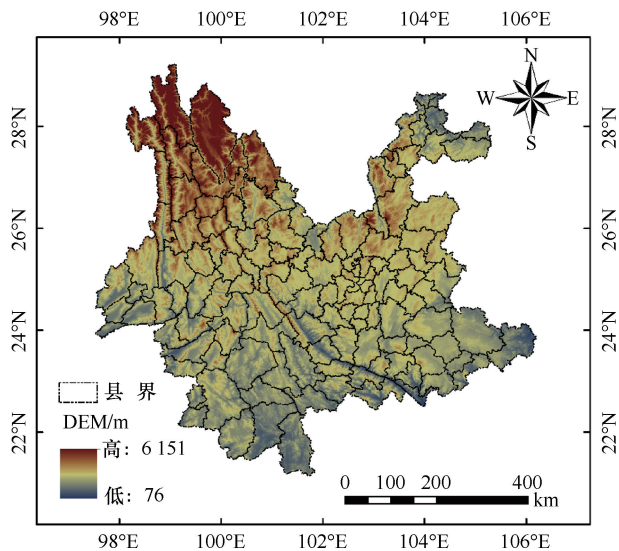


图1 云南省概况

Fig.1 Map of Yunnan Province

## 2 研究数据与方法

### 2.1 研究数据

本研究数据来源于第五代欧洲中期天气预报中心(ECMWF)大气再分析数据集(ERA-5),包括日尺度降水和月尺度温度数据,空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ,研究时段为1980—2021年。

### 2.2 干旱指标

气象干旱综合指数(MCI)综合考虑了60 d内的有效降水(权重累积降水)、30 d内蒸散(相对湿度)以及季度尺度(90 d)降水和近半年尺度(150 d)降水的综合影响,目前已经应用于国家气候中心的全国逐日干旱监测产品,并广泛应用于我国不同时空尺度的干旱监测、干旱灾害风险评估等业务中<sup>[37-39]</sup>。本研究采用综合干旱指数MCI作为干旱监测指标,计算公式为

$$MCI = Ka \times (a \times SPIW_{60} + b \times MI_{30} + c \times SPI_{90} + d \times SPI_{150}) \quad (1)$$

式中, $SPIW_{60}$ 为近60 d标准化权重降水指数; $MI_{30}$ 为近30 d相对湿度指数; $SPI_{90}$ 、 $SPI_{150}$ 为近90 d和150 d的标准化降水指数; $K_a$ 为季节调节系数; $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 为相应的权重系数; $MI$ 为相对湿度指数,为某段时间的降水量与同时段内潜在蒸散量(PET)之差再除以同时段内潜在蒸散量得到的指数,本研究中采用Thornthwaite方法计算PET。

### 2.3 游程理论及干旱特征值计算

本研究采用游程理论方法识别干旱事件(见图2),从干旱指标的时间序列中提取干旱强度( $I$ )和持续时间( $T$ )特征值,该方法已经广泛应用于干旱事件的识别<sup>[40]</sup>。具体过程为设定干旱阈值 $MCI_0$ (本研究选取 $MCI = -0.8$ 作为阈值),当日尺度MCI序列小于等于 $MCI_0$ 时,认为干旱事件发生;当日尺度MCI序列大于 $MCI_0$ 时,则认定干旱事件结束。当MCI序列小于等于 $MCI_0$ 时,干旱强度计算公式为

$$I_j = - \sum_{i=1}^{T_j} MCI_i / T_j = S_j / T_j, \quad (j = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (2)$$

式中, $T_j$ 为负游程持续长度,表示干旱历时或者持续时间; $S_j$ 为负游程所包围区域的面积; $I_j$ 为负游程所包围区域的平均高度,表示干旱强度。

首先,对MCI进行空间平均,进一步根据平均MCI的时间序列确定干旱事件的起止时间(-0.8作为阈值),其中持续时间定义为一次干旱事件中MCI持续小于等于阈值-0.8的时段长度(本研究不考虑干旱历时小于30 d的事件)。在此基础上在每个干旱事件的持续时间内计算MCI值时间平均,得到干旱强度。在空间上,干旱影响面积为受干旱影响范围的比例,即在一次干旱事件中计算每日MCI小于等于阈值-0.8的格点数在云南省所有格点的占比。

### 2.4 相似性分析

利用游程理论提取云南省历年干旱事件的特征,

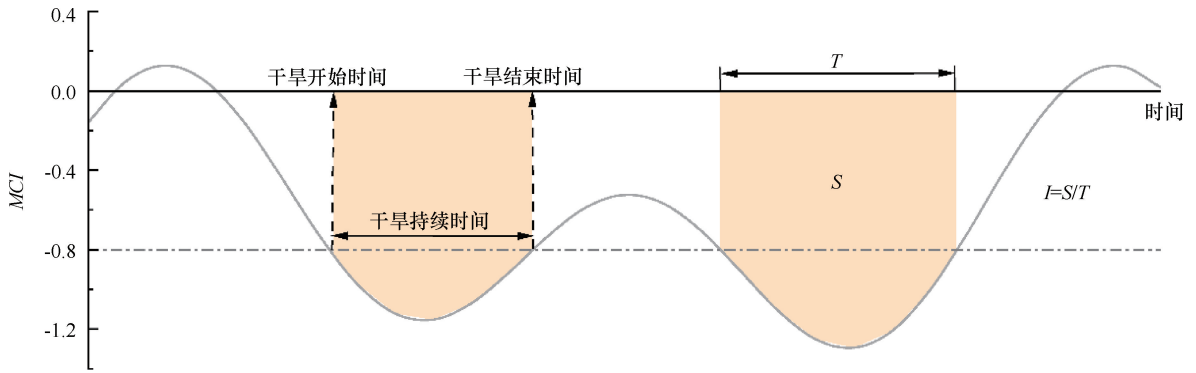


图2 游程理论确定干旱持续时间和强度示意

Fig. 2 Diagram of drought duration and intensity based on run theory

建立历年干旱事件案例库。对云南省进行分区域计算,将历次干旱事件的干旱强度、持续时间、影响面积进行综合分析,根据历次干旱事件特征对目标干旱事件进行相似性评估,得到相似案例集。该相似性分析方法的主要步骤介绍如下。

#### 2.4.1 干旱事件的识别及特征值计算

以干旱指标  $MCI$  值为基础,根据游程理论识别云南省 1980—2021 年所发生干旱事件的开始时间、结束时间及持续时间。得到干旱事件的识别结果后,计算历次干旱事件的特征值,包括干旱强度( $I$ )、持续时间( $T$ )和影响面积( $A$ )。

#### 2.4.2 快速样本聚类法分区处理

对研究区的干旱特征进行分区有助于揭示干旱变化规律,服务于干旱监测预测及灾害评估<sup>[41]</sup>。 $K$ -means 聚类法是一种迭代的聚类算法,先随机选取  $K$  个对象作为聚类中心,把每个数据点分配到距离最近的聚类中心点所代表的聚类中,根据每个聚类内的所有数据点重新计算该聚类的中心点,重复这一过程直到聚类中心点的变化很小或达到预定的迭代次数为止,实现对数据的有效聚类<sup>[41]</sup>,达到分区目的。为了更为准确地分析干旱事件的相似性,本研究基于近二十年(2001—2021 年)的  $MCI$  值应用  $K$ -means 法对云南省进行分区处理,根据空间聚类结果将云南省分为三个区域(见图 3)。

#### 2.4.3 数据归一化处理

将干旱强度、持续时间和影响面积进行归一化处理,采用最大最小值归一化方法(即利用数据的最大最小边界进行数据的归一化),使数据范围限制在  $[-1, 1]$  之间,以去除多源数据单位量纲的影响。

#### 2.4.4 相似性加权综合评价

相似性量度( $D$ )计算方法为

$$D = \alpha \times I_s + \beta \times T_s + \gamma \times A_s \quad (3)$$

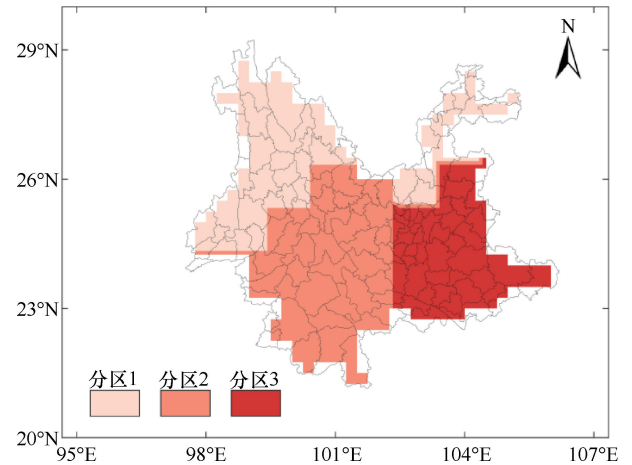


图3 云南省干旱分区结果

Fig. 3 Zoning of droughts in Yunnan Province

$$\Delta D = |D_i - D_o| \quad (4)$$

式中,  $I_s$ 、 $T_s$ 、 $A_s$  分别为标准化后的干旱强度、持续时间、影响面积;  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  分别为权重系数;  $\Delta D$  为历年干旱事件( $D_i$ )与目标干旱事件( $D_o$ )间的距离,可以用于判定干旱事件间的相似性,距离值小则认为相似性强,如果距离过大( $\Delta D > 0.5$ ),则认为无法找到相似事件。

本研究分别对标准化后的干旱强度、干旱持续时间、干旱影响面积赋以 0.6、0.1 和 0.3 的比例,对各干旱事件间的距离进行计算及排序,与目标干旱事件距离值最小的事件可以判定为相似干旱事件。考虑到干旱强度与  $MCI$  值直接相关,同时为了考虑干旱事件的空间相似性,本研究中对干旱强度和干旱影响面积权重赋值较高(0.6 和 0.3)。对于不同分区的干旱相似性分析,首先在各个分区内分别计算历次干旱事件的强度和影响面积,然后基于距离计算公式得到各个分区内干旱事件与目标干旱事件之间的距离,最后根据各个分区占云南省面积的比例对各分区干旱事

件距离进行加权平均, 得到研究区干旱事件的整体相似性。

#### 2.4.5 干旱事件间相似度计算

灰色关联度通过比较数据序列几何关系和曲线几何形状的相似性, 对关联程度进行量化<sup>[14,42]</sup>。如果某一案例与目标案例的关联度较大, 可以认为该案例更接近目标案例。本研究利用灰色关联度衡量干旱事件之间的相似度。

#### 2.4.6 验证

通过查阅云南省统计年鉴及中国水旱灾害防御公报, 收集了近40年云南省旱情资料。通过上述方法初步判定历年干旱事件相似性后, 结合实测数据, 对干旱相似性计算结果进行验证。

### 3 结果

#### 3.1 历史干旱多特征分析

为了解云南省历史干旱事件的特征, 本研究首先统计分析1980—2021年云南省发生的干旱事件, 并选取云南省历史上影响面积最大的9个干旱事件进行分析(持续时间大于30 d), 分别用 $E_n(n=1, 2, \dots, 9)$ 表示, 干旱事件特征如表1所列。历史上2011年7月19日至2011年12月8日的干旱事件在云南省影响面积最大, 覆盖全省约85.53%的区域; 2009年9月28日至2010年4月21日的干旱事件持续时间最长, 达到206 d, 前一年的秋冬干旱持续至次年春旱, 是云南省几十年不遇的大旱, 其旱情之重、持续时间之长历史罕见, 给云南省带来了极大的经济损失<sup>[43]</sup>。

通过查阅云南省统计年鉴、中国水旱灾害防御公报以及相关文献<sup>[44-45]</sup>, 历史上9次严重干旱事件的特征分析结果如表2所列。经对比可以发现, 基于干旱指数 $MCI$ 对干旱事件的识别结果与实际结果具有较好的一致性。

对比云南省1980—2021年历年典型干旱事件的 $MCI$ 平均值及特征(见表1、图4)表明,  $E_1$ 、 $E_2$ 和

表1 历史上云南省干旱影响面积最大的9次干旱事件

Table 1 The 9 drought events with the largest coverage of Yunnan Province in historical periods

事件 $E$	开始时间	结束时间	持续时间/d	干旱强度	影响面积/%
1	2011-07-19	2011-12-08	143	-1.358	85.53
2	2009-09-28	2010-04-21	206	-1.309	84.89
3	2003-07-30	2003-08-31	33	-1.256	84.86
4	2012-03-11	2012-05-28	79	-1.255	84.74
5	2019-04-08	2019-09-09	155	-1.419	84.07
6	2006-03-22	2006-05-11	51	-1.292	84.01
7	2003-10-31	2003-12-08	39	-1.212	83.79
8	2014-05-14	2014-06-15	33	-1.325	83.01
9	2003-09-02	2003-10-29	58	-1.115	82.35

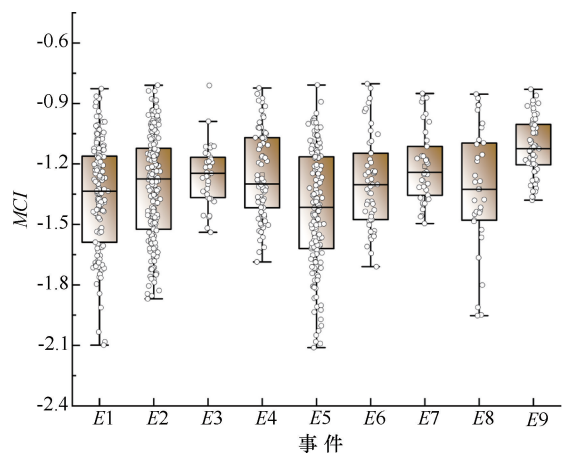


图4 历年典型干旱事件的 $MCI$ 平均值变化特征

Fig. 4 Average MCI of typical drought events in historical periods

$E_5$ 持续时间较长且旱情发生期间 $MCI$ 空间平均值变化较大,  $E_3$ 、 $E_7$ 和 $E_9$ 持续时间较短且干旱强度变化幅度较小;  $E_5$ 的 $MCI$ 空间平均值变化幅度最大, 变化范围在 $-2.11 \sim -0.81$ 之间, 同时,  $E_5$ 的旱情最严重, 平均 $MCI$ 值约为 $-1.42$ 。

#### 3.2 典型干旱事件过程

为了解典型干旱事件发展过程, 本研究选取2019年4月8日至2019年9月9日的典型干旱事件 $E_5$ (即春夏连旱事件), 根据 $MCI$ 的演变过程分析干

表2 云南省历年旱情

Table 2 Records of historical drought hazards in Yunnan Province

典型年	典型月	干旱事件描述
2003	8月	6月下旬至8月下旬, 云南省发生近几十年罕见夏季高温干旱
2006	7月、8月	云南省出现了严重的高温干旱天气, 7月下旬至8月中旬最严重
2009	2月、3月、11月、12月	降水稀少, 云南省均不同程度受旱
2010	1月、2月、3月	冬春连旱; 2009年10月旱情开始, 2010年旱情在上一年基础上加重, 云南省大部分地区达特大干旱等级
2011	9月、11月、12月	秋伏旱、冬旱突出, 旱灾遍布全省, 旱区分布不均匀
2012	3月	云南省发生大范围春旱
2014	4月	冬春连旱; 2月云南省中西部旱情开始发展, 4月旱情严重, 6月中下旬旱情逐步缓解
2019	4月、5月、6月	春夏连旱; 2019年4月中旬至6月下旬出现极端高温

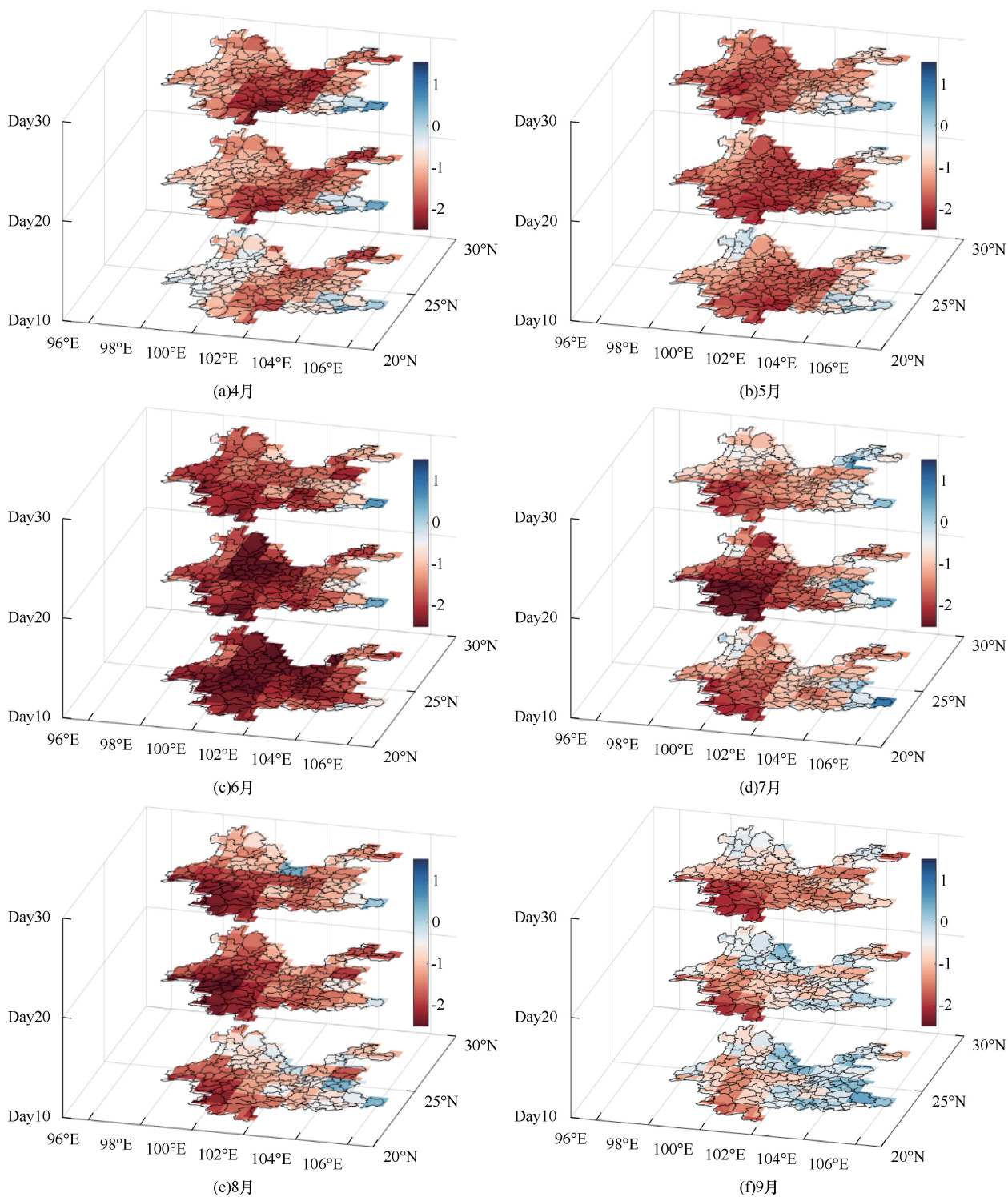


图5 2019年典型干旱事件时空演变过程

Fig. 5 Spatiotemporal evolution of typical drought events in 2019

旱事件的时空分布变化情况。图5给出了2019年典型干旱事件的发展过程(2019年4月至9月), 每月分别选取第10、20、30日进行分析。

从干旱发展过程可以看出, 2019年4月云南省大范围旱情不断加强, 尤其是中部地区; 2019年5月10日至20日旱情进一步加强( $MCI$ 平均值从

-1.27 减少到-1.62), 5月旱情普遍比4月严重并且呈现向西部发展的趋势; 6月旱情形势明显加强(6月10日  $MCI$  平均值达-2.09, 相较于5月30日减少0.67), 6月10日干旱影响面积最大, 几乎覆盖整个云南省; 2019年7月旱情相比于之前有所缓解(7月10日  $MCI$  平均值为-1.17, 相较于6月30日增

加 0.47), 在 7 月中下旬旱情再次加重继而缓解, 主要表现在西部地区; 8 月 20 日云南省旱情大范围加剧 ( $MCI$  平均值为  $-1.69$ , 相较于 8 月 10 日减少 0.63), 8 月 30 日北部旱情有一定缓解, 9 月开始云南省旱情大范围缓解, 此次干旱事件基本结束。总的来说, 上述结果表明 2019 年云南省遭遇严重的春夏连旱, 6 月达到高峰, 与实际情况较为一致。需要注意的是,  $MCI$  指数考虑到前期降水影响的时间较长, 相比于实际情况可能会呈现干旱持续时间久、缓解时间滞后等差异<sup>[46]</sup>。

### 3.3 典型干旱事件相似性分析及结果验证

进一步对选取的 2019 年春夏连旱进行相似性分析, 选择干旱强度、持续时间及影响面积进行分析计算。相似干旱事件结果分析表明 2015 年 5 月 28 日至 2015 年 8 月 30 日的干旱事件与该干旱事件相似, 其距离为 0.336。进一步分析相似干旱事件的时空分布特征(见图 6)发现, 相似干旱事件之间干旱强度较为接近, 且空间分布相似性较高。但局部地区仍具有一定差异, 如在 2019 年春夏连旱中, 云南省西南部干

旱较为严重, 而 2015 年夏旱事件中干旱中心相对北移。进一步应用灰色关联度分析对相似干旱事件的相似性进行量化, 结果表明, 2019 年春夏连旱与 2015 年夏旱的相似度为 80.00%。结合上述对干旱事件特征值的分析以及实际旱情统计情况, 可以发现相似性干旱事件识别结果总体上具有可靠性, 但是其干旱强度和空间分布可能存在一定差异。

为了进一步验证相似性分析的有效性, 同时选取了 2009—2010 年冬春连旱事件作为典型事件进行分析和验证。相似性分析结果表明 2009 年 9 月 28 日至 2010 年 4 月 21 日的干旱事件与 2011 年 7 月 19 日至 2011 年 12 月 8 日的干旱事件较为相似, 其距离为 0.199。图 7 进一步比较了两个相似干旱事件的空间分布特征。结果表明, 两个干旱事件在空间分布上总体相似。但是空间上个别区域存在差异, 如 2011 年干旱事件中, 云南省东部地区旱情较 2009—2010 年冬春连旱的旱情更为严重。灰色关联度分析表明两个干旱事件的相似度为 83.77%, 进一步表明了该相似性分析方法的有效性。

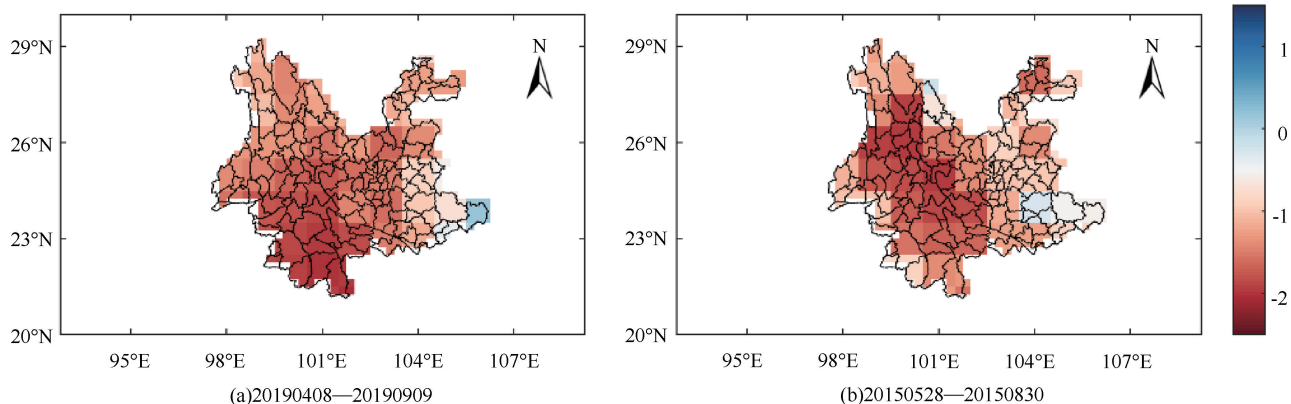


图 6 2019 年相似干旱事件的  $MCI$  值空间分布

Fig. 6 Spatial  $MCI$  distribution of the similar drought event of 2019

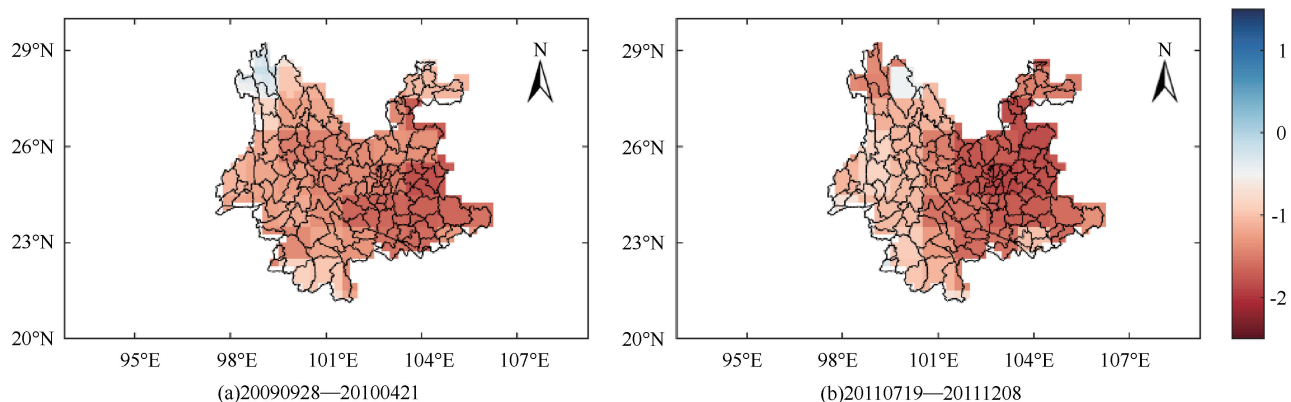


图 7 2009 年相似干旱事件的  $MCI$  值空间分布

Fig. 7 Spatial  $MCI$  distribution of the similar drought event of 2009

### 3.4 结果讨论

由于干旱的复杂性, 基于单一干旱指数的干旱相似性分析可能难以刻画复杂干旱特征, 综合干旱指数为干旱相似性评估提供了一种有效手段。与已有的干旱相似性研究相比较, 本研究采用了综合干旱指数 *MCI*, 克服了单一干旱指数的缺点, 对于干旱过程具有较好的识别与诊断能力。同时, 本研究综合考虑了干旱强度-持续时间-影响范围多个特征, 与传统基于有限干旱特征相比<sup>[23-24]</sup>, 在相似性的评价方面更为全面, 不但考虑了不同事件相似度的总体数值差异, 而且在空间上也具有较好的相似性(见图6和图7)。本方法可以应用于不同地区、不同时间段的干旱相似性评价, 通过结合不同区域的下垫面、社会经济条件及早灾数据<sup>[24]</sup>, 研究结果可进一步应用于干旱灾害评估, 服务于防旱抗旱工作。

本研究还存在一些不足, 未来需要进一步改进, 以提高干旱事件的相似性识别精度。在数据方面, 本研究采用气象数据, 未来可以采用基于遥感产品的植被等数据构建干旱指数进行区域干旱评估<sup>[47]</sup>。在距离判别中, 我们对不同的特征赋予一定的权重, 但是权重的确定仍存在不确定性, 未来可以结合实际早灾数据优化权重。需要注意的是, 当前干旱指数众多且在不同时空尺度上适用性有所不同, 未来可以选取不同的综合干旱指数进行综合分析, 评估并选择适合研究区的综合干旱指数进行相似性分析。

## 4 结论

本研究以云南省干旱为研究对象, 采用 *MCI* 综合干旱指数, 在分析云南省历史干旱事件特征基础上, 基于干旱强度、持续时间与影响面积特征, 提出了一种干旱相似性的评估方法。本文的主要结论如下。

(1) 对1980—2021年云南省发生的干旱事件进行统计分析, 基于游程理论识别了云南省历史上影响面积最大的9个干旱事件, 与文献对比表明识别的干旱事件效果较好, 并比较分析了不同干旱事件的强度、持续时间和面积特征。

(2) 以2019年4月8日至2019年9月9日的典型干旱事件为例, 分析了其发生、发展及缓解过程中的干旱指数 *MCI* 及影响面积的特征变化。结果表明2019年4—6月云南省大范围旱情不断加强, 范围不断扩大, 7月有所缓解, 8月旱情再次大范围加剧, 9月开始旱情缓解, 直至干旱事件结束。

(3) 选取2019年春夏连旱及2009—2010年冬春

连旱事件为研究案例, 相似性评估结果表明识别的干旱事件的距离分别为0.336和0.199, 相似度分别为80.00%和83.77%, 通过空间比较干旱事件的分布, 表明该方法识别的干旱事件具有较好的相似性, 显示了该方法的有效性。

### 参考文献(References):

- [1] FAO. The State of Food and Agriculture 2020. Overcoming water challenges in agriculture[R]. Rome: FAO, 2020.
- [2] 郝增超, 侯爱中, 张璇, 等. 干旱监测与预报研究进展与展望[J]. 水利水电技术, 2020, 51(11): 30-40.  
HAO Zengchao, HOU Aizhong, ZHANG Xuan, et al. Research progresses and prospects of drought monitoring and prediction[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(11): 30-40.
- [3] PENDERGRASS A G, MEEHL G A, PULWARTY R, et al. Flash droughts present a new challenge for subseasonal-to-seasonal prediction[J]. Nature Climate Change, 2020, 10(3): 191-199.
- [4] HAO Z, HAO F, XIA Y, et al. Compound droughts and hot extremes: characteristics, drivers, changes, and impacts[J]. Earth-Science Reviews, 2022, 235: 104241.
- [5] SHYROKAYA A, PAPPENBERGER F, PECHLIVANIDIS I, et al. Advances and gaps in the science and practice of impact-based forecasting of droughts[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Water, 2024, 11(2): e1698.
- [6] 杨肖丽, 马慧君, 吴凡, 等. 基于CMIP6多模式的全球及干旱带气象干旱时空演变趋势研究[J]. 水资源保护, 2023, 39(2): 40-49.  
YANG Xiaoli, MA Huijun, WU Fan, et al. The spatio-temporal changing pattern of meteorological drought across the global and arid zone based on CMIP6[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2): 40-49.
- [7] VICENTE-SERRANO S M, PEÑA-ANGULO D, BEGUERIA S, et al. Global drought trends and future projections[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 2022, 380(2238): 20210285.
- [8] 李虎, 王丽晶, 杨思敏, 等. 基于多距离融合的场次降雨时空相似性比较[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(6): 106-119.  
LI Hu, WANG Lijing, YANG Simin, et al. Spatio-temporal similarity comparison of rainfall events based on multi-distance fusion[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(6): 106-119.
- [9] 王海军, 衣学军, 黄一昕, 等. 暴雨洪水相似性判别及外推预估方法[J]. 南水北调与水利科技, 2023, 21(5): 886-894.  
WANG Haijun, YI Xuejun, HUANG Yixin, et al. Similarity discrimination and extrapolation prediction methods of heavy rain and flood[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(5): 886-894.
- [10] XIAO Z, LIANG Z, LI B, et al. New flood early warning and forecasting method based on similarity theory[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2019, 24(8): 04019023.
- [11] CHENG M, FANG F, KINOUCI T, et al. Long lead-time daily and

- monthly streamflow forecasting using machine learning methods[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 590: 125376.
- [12] LIN K, CHEN H, ZHOU Y, et al. Exploring a similarity search-based data-driven framework for multi-step-ahead flood forecasting [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 891: 164494.
- [13] WU H, SHI P, QU S, et al. A hydrologic similarity-based parameters dynamic matching framework: Application to enhance the real-time flood forecasting[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 907: 167767.
- [14] 陈建, 李春红, 王峰, 等. 长江上游流域暴雨洪水相似性判别指标研究[J]. *人民长江*, 2019, 50(1): 58-63.  
CHEN Jian, LI Chunhong, WANG Feng, et al. Study on similarity discriminant index of storm flood in upper reaches of Yangtze River [J]. *Yangtze River*, 2019, 50(1): 58-63.
- [15] 李颖, 金茹, 许雯, 等. 基于路径与环境场最优赋权的致灾相似台风检索方法研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(7): 14-26.  
LI Ying, JIN Ru, XU Luan, et al. Study on the optimal weighting impact of typhoon track and environmental field in similar typhoon retrieval model for similar disasters [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023, 54(7): 14-26.
- [16] 夏兴生, 朱秀芳, 潘耀忠, 等. 基于历史案例的自然灾害灾情评估方法研究[J]. *灾害学*, 2016, 31(1): 219-225.  
XIA Xingsheng, ZHU Xiufang, PAN Yaozhong, et al. Study on evaluation method of natural disaster based on historical cases [J]. *Journal of Catastrophology*, 2016, 31(1): 219-225.
- [17] 曾婷婷, 宫阿都, 陈艳玲, 等. 基于历史相似案例空间推演的地震伤亡人口评估方法研究 [J]. *地球信息科学学报*, 2020, 22(11): 2166-2176.  
ZENG Tingting, GONG Adu, CHEN Yanling, et al. Study on assessment method of earthquake casualties based on spatial reasoning of similarly historical cases [J]. *Journal of Geo-information Science*, 2020, 22(11): 2166-2176.
- [18] 吴艳梅, 壮延, 郑川, 等. 基于案例推理的云南地震灾害受伤人数快速评估初探[J]. *中国应急救援*, 2023(6): 81-87.  
WU Yanmei, ZHUANG Yan, ZHENG Chuan, et al. Rapid assessment of injured persons in Yunnan earthquake disaster based on case-based reasoning [J]. *China Emergency Rescue*, 2023(6): 81-87.
- [19] 刘志雨, 张同强. 水旱灾害防御雨水情监测预报技术研究[J]. *水利发展研究*, 2025, 25(1): 48-55.  
LIU Zhiyu, ZHANG Tongqiang. Research on flood and drought disaster prevention and rainfall monitoring and forecasting technologies [J]. *Water Resources Development Research*, 2025, 25(1): 48-55.
- [20] 智协飞, 田云涛, 陈昌春, 等. 干旱传播研究进展与展望 I: 干旱传播含义、特征、类型与研究方法[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(4): 625-653.  
ZHI X F, TIAN Y T, CHEN C C, et al. Drought propagation: Progress and prospect I: The meaning, characteristics, types, and research methods of drought propagation [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2023, 21(4): 625-653.
- [21] 智协飞, 田云涛, 陈昌春, 等. 干旱传播研究进展与展望 II: 影响因素与干旱传播研究展望[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(4): 654-668.  
ZHI X F, TIAN Y T, CHEN C C, et al. Progress and prospects in drought propagation research part II: Influencing factors and research prospects [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2023, 21(4): 654-668.
- [22] 胡莹莹, 周毓彦, 鲁帆, 等. 考虑融雪量的多变量综合干旱指数的构建与评估[J]. *水利水电技术*, 2023, 54(8): 79-90.  
HU Yingying, ZHOU Yuyan, LU Fan, et al. Development and evaluation of a multivariate composite drought index accounting for snow [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023, 54(8): 79-90.
- [23] 李艳旗. 气象卫星遥感监测作物干旱的相似选择分析法[J]. *中国农业气象*, 2000, 21(2): 54-55.  
LI Yanqi. Similar selection analysis method of meteorological satellite remote sensing monitoring drought-injured crops [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2000, 21(2): 54-55.
- [24] 夏兴生, 朱秀芳, 潘耀忠, 等. 基于历史相似案例的农业旱灾灾情快速评估方法研究 [J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2015, 51(S1): 77-81.  
XIA Xingsheng, ZHU Xiufang, PAN Yaozhong, et al. Assessment of disaster losses based on similarly historical drought disaster dataset [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2015, 51(S1): 77-81.
- [25] HAO Z, SINGH V P. Drought characterization from a multivariate perspective: A review [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 527: 668-678.
- [26] 赵艺源, 姜海玲, 周星宇, 等. 基于空间距离模型的综合干旱监测建模及在东北地区应用[J]. *排灌机械工程学报*, 2023, 41(7): 716-722.  
ZHAO Yiyuan, JIANG Hailing, ZHOU Xingyu, et al. Comprehensive drought monitoring model based on spatial distance model and its application in Northeast China [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2023, 41(7): 716-722.
- [27] 曲学斌, 金林雪, 红梅, 等. 基于 VCI 的内蒙古生长季干旱变化及对气候响应[J]. *排灌机械工程学报*, 2023, 41(10): 1058-1064.  
QU Xuebin, JIN Linxue, HONG Mei, et al. Drought change in growing season of Inner Mongolia and its response to climate based on VCI [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2023, 41(10): 1058-1064.
- [28] 张云, 曹言, 王杰, 等. 基于土壤墒情的云南干旱分析[J]. *安徽农业科学*, 2016, 44(33): 170-174.  
ZHANG Yun, CAO Yan, WANG Jie, et al. Analysis of drought in Yunnan Province based on soil moisture [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2016, 44(33): 170-174.
- [29] 王敏. 我国云南干旱研究进展[J]. *黑龙江农业科学*, 2017(10): 122-124.  
WANG Min. Research progress of drought in Yunnan Province of China [J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2017(10): 122-124.

- [30] 马思源,何雨岑,金燕,等. 基于土壤相对凋萎湿度构建的干旱监测指标在云南的应用分析[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(4): 255-264.  
MA Siyuan, HE Yuqin, JIN Yan, et al. Application of drought monitoring index constructed based on soil relative wilting moisture in Yunnan[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(4): 255-264.
- [31] 闫文波,何云玲,余岚,等. 气候干旱化背景下云南地区生态系统脆弱性的变化特征[J]. 生态科学, 2023, 42(1): 197-205.  
YAN Wenbo, HE Yunling, YU Lan, et al. Variation of ecosystem vulnerability under the background of climate aridity change in Yunnan variation[J]. Ecological Science, 2023, 42(1): 197-205.
- [32] 吕潇然,尹晓天,宫阿都,等. 基于植被状态指数的云南省农业干旱状况时空分析[J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(12): 1634-1644.  
LV Xiaoran, YIN Xiaotian, GONG Adu, et al. Temporal and spatial analysis of agricultural drought in Yunnan Province based on vegetation condition index[J]. Journal of Geo-information Science, 2016, 18(12): 1634-1644.
- [33] 许玲燕,王慧敏,段琪彩,等. 基于SPEI的云南省夏玉米生长季干旱时空特征分析[J]. 资源科学, 2013, 35(5): 1024-1034.  
XU Lingyan, WANG Huimin, DUAN Qicai, et al. The temporal and spatial distribution of droughts during summer corn growth in Yunnan Province based on SPEI[J]. Resources Science, 2013, 35(5): 1024-1034.
- [34] 付奔,胡关东,杨帆,等. 云南干旱“常态化”的分析[J]. 水文, 2014, 34(4): 82-85.  
FU Ben, HU Guandong, YANG Fan, et al. Analysis of drought normalization in Yunnan Province[J]. Journal of China Hydrology, 2014, 34(4): 82-85.
- [35] 祁俊青,于文金,谢涛,等. 云南省干旱灾害时空变化特征[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(3): 631-638.  
QI Junqing, YU Wenjin, XIE Tao, et al. Spatial and temporal variation characteristics of drought disasters in Yunnan Province[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2019, 35(3): 631-638.
- [36] 于璐. 云南地区季节性干旱特征分析[J]. 农业与技术, 2018, 38(7): 149-150.  
YU Lu. Analysis of seasonal drought characteristics in Yunnan[J]. Agriculture and Technology, 2018, 38(7): 149-150.
- [37] 廖要明,张存杰. 基于MCI的中国干旱时空分布及灾情变化特征[J]. 气象, 2017, 43(11): 1402-1409.  
LIAO Yaoming, ZHANG CunJie. Spatio-temporal distribution characteristics and disaster change of drought in China based on meteorological drought composite index[J]. Meteorological Monthly, 2017, 43(11): 1402-1409.
- [38] 张强,邹旭恺,陈鲜艳,等. 考虑多尺度和蒸散影响的新干旱指数研究:以云南为例[J]. 高原气象, 2022, 41(4): 909-920.  
ZHANG Qiang, ZOU Xukai, CHEN Xianyan, et al. A new drought index study that takes into account a multi-timescale and the effects of evapotranspiration: Taking Yunnan as an example [J]. Plateau Meteorology, 2022, 41(4): 909-920.
- [39] 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. 气象干旱等级: GB/T 20481—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, National Standardization Administration. Meteorological drought grade: GB/T 20481—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [40] YEVEJEVICH V M. An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts[M]. Fort Collins, CO, USA: Colorado State University, 1967.
- [41] 王栋,梁忠民,王军,等. 基于主成分聚类分析的云南省干旱自然分区[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(2): 15-21.  
WANG Dong, LIANG Zhongmin, WANG Jun, et al. Natural zoning of drought in Yunnan Province based on principal component cluster analysis[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(2): 15-21.
- [42] 孙晓东,焦玥,胡劲松. 基于灰色关联度和理想解法的决策方法研究[J]. 中国管理科学, 2005, 13(4): 63-68.  
SUN Xiaodong, JIAO Yue, HU Jingsong. Research on decision-making method based on gray correlation degree and TOPSIS[J]. Chinese Journal of Management Science, 2005, 13(4): 63-68.
- [43] 荣艳淑,巩琳,卢寿德. 云南2009—2014年持续性气象水文干旱特征及成因分析[J]. 水资源保护, 2018, 34(3): 22-29.  
RONG Yanshu, GONG Lin, LU Shoude. Analysis on characteristics and causes of persistent meteorological and hydrological drought in Yunnan from 2009 to 2014[J]. Water Resources Protection, 2018, 34(3): 22-29.
- [44] 师小雨,黄强,畅建霞,等. 基于FUZZ-EWM法的综合干旱指数构建与应用[J]. 水利发展研究, 2018, 18(07): 49-56, 63.  
SHI Xiaoyu, HUANG Qiang, CHANG Jianxia, etc Construction and application of comprehensive drought index based on FUZZ-EWM method[J]. Water Resources Development Research, 2018, 18(7): 49-56, 63.
- [45] 游智文,李肖肖,阳勇,等. 基于GRACE重力卫星与SPEI的云南干旱监测[J]. 节水灌溉, 2024(3): 34-41.  
YOU Zhiwen, LI Xiaoxiao, YANG Yong, et al. Drought monitoring in Yunnan Province based on GRACE gravity satellite and SPEI[J]. Water Saving Irrigation, 2024(3): 34-41.
- [46] 王素萍,王劲松,张强,等. 几种干旱指标对西南和华南区域月尺度干旱监测的适用性评价[J]. 高原气象, 2015, 34(6): 1616-1624.  
WANG Suping, WANG Jingsong, ZHANG Qiang, et al. Applicability evaluation of drought indices in monthly scale drought monitoring in Southwestern and Southern China [J]. Plateau Meteorology, 2015, 34(6): 1616-1624.
- [47] 杨恒喜,史正涛,谷晓梅,等. 3S技术支持下的云南旱灾损失实时评估探讨[J]. 节水灌溉, 2010(9): 57-61.  
YANG Hengxi, SHI Zhengtao, GU Xiaomei, et al. Study on real-time evaluation based on 3S technology for economic loss of drought in Yunnan Province[J]. Water Saving Irrigation, 2010(9): 57-61.

(责任编辑 王海锋)