•区域农业水管理•

文章编号: 1672-3317 (2022) 06-0140-07

基于 SPEI 指数的内蒙古多时空尺度干旱特征分析

谢 岷¹, 高聚林^{1*}, 孙继颖¹, 于晓芳¹, 王志刚¹, 胡树平¹, 张 璐² (1.内蒙古农业大学 农学院, 呼和浩特 010019; 2.内蒙古农业大学 图书馆, 呼和浩特 010018)

摘 要:【目的】分析内蒙古地区 1951—2018 年的多时空尺度干旱变化特征,为该地区农业生产科学减灾提供理论依据。【方法】基于 1951—2018 年内蒙古地区 50 个基准地面气象观测站的连续日值气象数据,采用标准化降水蒸散指数 (SPEI) 和 Mann-Kendall 趋势检验分析方法研究了内蒙古不同时空尺度干旱演化特征。【结果】时间上, 1979 年前后是内蒙古地区气候变化的一个关键突变点,大部分地区干旱有所缓解,逐步进入湿润转变期,但内蒙古西部地区自 1996 年前后又进入新一轮干旱期。空间上,内蒙古中西部和赤峰、通辽的部分地区干旱形势较为严峻。【结论】 SPEI 指数可以较好地表征内蒙古长期的干旱变化特征。

关键词:标准化降水蒸散指数;时空变化;干旱;内蒙古

中图分类号: S166 文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2020573



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. XIE Min, GAO Julin, SUN Jiying, et al. Spatiotemporal Variation of Drought in Inner Mongolia Estimated Based on the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(6): 140-146.

0 引 言

【研究意义】干旱受气候、地形、地貌、土壤质 地、植被、生态等多种因素的共同影响,是一个逐步 积累目十分复杂的动态过程。近年来, 随着我国经济 社会的快速发展和全球变暖趋势的增加,我国面临的 干旱灾害形势已不容乐观, 尤其是粮食主产区的干旱 灾害发生频率有不断增加趋势[1]。当前我国面临着水 资源短缺、环境承载力下降、粮食安全与经济社会发 展矛盾等问题,如何更好地深入了解区域干旱灾害特 征,进而主动抵御干旱灾害、降低干旱灾害损失已成 为区域农业生产和防灾减灾管理亟待解决的重大科 学难题。【研究进展】干旱灾害是影响面最广、造成 经济损失最大、世界上最严重的自然灾害类型之一。 据《中国统计年鉴》和《中国水旱灾害公报》数据显 示, 1950-2010 年中国由于干旱灾害而导致的粮食 减产量高达 10 556 亿 kg,因旱灾而导致的年均粮食 减产量高达 173 亿 kg,占年均实际粮食总产量的 5.23%, 占各种自然灾害造成粮食总损失量的 60%以 上^[2]。为了能够全面准确地描述干旱的发生、发展和 强度,当前有数以百种的干旱指数被提出并应用。但 由于干旱的形成因素复杂,很难找到一种普遍适用于 各种情形的干旱指数^[3]。目前,国际上常用的干旱指 数主要为帕默尔指数(Palmer Drought Severity Index, PDSI) 和标准化降水指数(Standardized Precipitation Index, SPI),但在实际应用中上述2个指数均存在 一定的局限性。【切入点】进入新世纪后,标准化降 水 蒸 散 指 数 (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI)被提出,该指数综合 考虑了降水和温度因子,将 PDSI 指数所关注的干旱 对蒸散的响应和 SPI 指数的计算简便、具有多时间尺 度等优点进行了有机结合,是近年来在全球变暖背景 下监测干旱特征比较理想且有效的评价工具,在国内 外的区域尺度干旱评价与研究中均具有良好效果^[4-5]。 然而,目前在内蒙古地区应用 SPEI 指数对区域干旱 特征的评价研究甚少。【拟解决的关键问题】内蒙古 地处我国北部边疆,地域辽阔、生态类型多、气候资 源丰富,是我国重要的粮油生产基地,同时也是我国 北方地区干旱发生最为频繁的地区之一。鉴于此,本 研究将从如何客观地量化干旱发生和评价干旱程度 入手, 深入探究内蒙古地区干旱时空演变特征, 以期 为内蒙古农业生产中的防旱抗旱管理工作提供理论 依据。

收稿日期: 2020-10-18

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0300802);国家玉米产业技术体系项目(CARS-02-63);华北黄土高原地区作物栽培科学观测实验站基金项目(25204120);内蒙古自治区作物栽培与遗传改良实验室项目作者简介:谢岷(1981-),男,内蒙古乌海人。副教授,博士,主要从事农业信息及精准农业方面研究。E-mail:xiemin@imau.edu.com 通信作者:高聚林(1964-),男,内蒙古鄂尔多斯人。教授,主要从事作物生理生态系统研究。E-mail:nmgaojulin@163.com

1 材料与方法

1.1 研究区概况

内蒙古自治区位于我国北部边疆,范围横跨东北、 华北和西北。区内地形地势西高东低,南高北低,全 区总面积 78 866.67 hm²,占中国陆地面积的 12.3%。 内蒙古地处中温带大陆,水热条件较差,降水稀少。 气温自大兴安岭向东南、西南方向递增。低温区分布 于大兴安岭中山地带,年均温低于-5~-3 ℃,是我国 最寒冷的地区之一,大兴安岭以西区域的气温明显递 增。内蒙古地处季风环流过渡带,降水自东南向西北 递减。其中,大兴安岭山地和西辽河流域的南部山区, 年降水量 450 mm 以上。内蒙古西部少于 250 mm, 阿拉善不到 100 mm。

1.2 研究数据来源

气象数据来源于中国气象局国家气象数据中心的"中国地面气候资料日值数据集(http://data.cma.cn/data/cdcdetail/dataCode/SURF_CLI_CHN_MUL_DAY_V3.0.html)",该数据集包含了中国699个基本气象站1951年1月以来的气压、气温、降水量、蒸发量、相对湿度、风向风速、日照时间和0cm地温的日值数据。本研究选取该数据集当中的内蒙古自治区50个基准地面气象观测站的1951—2018年连续性日值数据集(图1)。



图1研究区域气象站分布

Fig.1 Distribution of meteorological stations in study area

1.3 研究方法

1.3.1 干旱等级划分

本研究中的干旱等级划分依据国际上通用的基于 SPEI 指数的五级干旱等级划分标准:①当 SPEI>-0.5 时,表示无干旱发生;②当-1.0<SPEI<-0.5 时,表示有轻微干旱发生;③当-1.5<SPEI<-0.5 时,表示有轻微干旱发生;④当-2.0<SPEI<-1.5 时,表示有严重干旱发生;⑤当 SPEI<-2.0 时,表示有极端干旱发生。基于该标准可以确定某一站点在某一年发生干旱的程度^[6]。

1.3.2 干旱指数的计算

标准化降水蒸散指数 (SPEI) 被广泛用于气候干

旱评价研究,该指数综合考虑降水、温度和蒸散对干 旱的影响,并具有多时间尺度和机理明确等优点,是 当前监测干旱特征比较理想的评价工具。本文计算每 个数据集月和年时间尺度上的 SPEI值(SPEI-1和 SPEI-12),具体计算方法见文献[7]。空间数据分析利 用 ArcGIS 10.2 软件完成。

1.3.3 干旱频率与气候倾向率计算

干旱频率可以在一定程度上衡量区域发生干旱的概率,干旱频率越大代表该地区越容易发生干旱; 而气候倾向率则能够反应气候要素的变化趋势,计算 方法见文献[8-9]。

1.3.4 Mann-Kendall 趋势检验

对于降水等时间序列数据的趋势分析, Mann-Kendall 趋势检验法不受样本值、分布类型等影响, 被世界气象组织推荐进行区域性气候变化分析,具体计 算方法见文献[10]。本研究利用 SPEI-12 进行 M-K 趋势 检验,设定显著性水平为 0.05,阈值线为±1.96。 Mann-Kendall 检验基于 MATLAB R2018 软件完成。

2 结果与分析

2.1 内蒙古地区 SPEI 值的年际间与月际间变化分析

为了定量研究内蒙古干旱变化特征,计算了 1951—2018年间的逐年*SPEI*-12值以衡量各年度的 干旱程度(图 2)。由图 2 可知,1951—2018年间内 蒙古干旱频率和强度呈下降趋势,尤其是在1990年 以后,中度以上的干旱(*SPEI*≤-1)发生次数相较前 期明显降低。但自2000年以后,中度以上干旱发生 频率和强度又有所增加。此外,计算了1951—2018 年间逐月的*SPEI*-1值(图 3)。由图 3 可知,内蒙古地 区1951—2018年间极端干旱主要发生在每年的3—11 月之间,尤其是春旱(3—5月)和秋旱(9—11月) 时期内的发生次数与程度尤为严重。



Inner Mongolia during 1951-2018

2.2 内蒙古地区各盟市 SPEI 值的年际间变化分析

为了进一步研究内蒙古各地区的干旱变化特征,本研究将内蒙古划分为东、中和西3部分来进行分区

域研究,基于各盟市多个气象站点数据计算所得到的 SPEI-12 值,采用 Mann-Kendall 趋势检验绘制内蒙古 东、中、西3段的11个地市年均SPEI值与离差平方 曲线 (图4-图6)。

由 Mann-Kendall 检验的 UF 正序列统计量可知, 自 20 世纪 70 年代中后期开始,内蒙古东部区域的 4 个盟市(呼伦贝尔、兴安盟、通辽和赤峰)的UF值 总体呈上升趋势,说明自此时期开始,内蒙古东部区 域的4个盟市的干旱有逐渐缓解的趋势(通辽和赤峰 在后期又出现了波动性下降),这种趋势在 20 世纪 80年代中后期均超过了 0.05 显著水平, 说明自此时 期开始,内蒙古东部区域的4个盟市整体呈显著性湿 润状态。内蒙古东部区域的 4 个盟市的 UF 和 UB 曲 线相交于 1980 年前后, 说明 1980 年前后是气候变湿



和赤峰3地存在突变点,兴安盟不存在突变点。 SPEI-1值 SPEI值 0 2 3 4 5 6 9 10 11 12 13 1 8 月份 图 3 内蒙古 1951-2018 年月际间 SPEI-1 变化 Fig.3 Inter-monthly variation of SPEI-1 in Inner Mongolia during 1951-2018 UF - UB ···· 95%置信区间上限 →95%置信区间下限 SPEI 2020 1960 1970 1980 1990 2000 2010 年份 (b) 兴安盟 UF - UB ·· 95%置信区间上限 95%置信区间下限 SPEL

的突变点。在95%置信区间范围内,呼伦贝尔、通辽

图 4 内蒙古东四盟市 1951-2018 年 SPEI-12 值的 M-K 检验

Fig.4 Mann-Kendall trend test of the annual SPEI-12 during 1951-2018 in east Inner Mongolia 由图 5 可知, 自 20 世纪 70 年代后期开始, 内蒙 古中部区域的4个盟市(锡林郭勒、乌兰察布、呼和 浩特和包头)的 UF 整体开始呈上升趋势,后期呈波 动状的变化趋势。包头、乌兰察布和锡林郭勒的上升 趋势自20世纪80年代后期均超过了0.05显著水平, 自 1980 年后整体呈湿润状态。4 个盟市 UF 曲线和 UB曲线均相交于1979年左右,在95%置信区间范围 内,4个盟市均存在突变点。

由图 6 可知, 1963—1996 年间, 内蒙古西部 3

个盟市(鄂尔多斯、巴彦淖尔和阿拉善)的 UF 整体 呈上升趋势,可见这些地区的干旱有逐渐缓解的趋势。 阿拉善地区 1984—2003 年呈相对湿润状态。巴彦淖 尔地区 1989-2009 年呈相对湿润状态。但从 1996 年 开始,阿拉善和巴彦淖尔地区 UF 又呈下降趋势,表 明该地区干旱趋势又有所加重,且阿拉善地区自2016 年度又进入显著干旱状态。在 95%置信区间范围内, 内蒙古西部3个盟市均存在多次突变点。

1960

1970

1980

(d) 赤峰

年份

1990

2000

2020

2010













1951—2018 in west Inner Mongolia

2.3 内蒙古地区干旱频率与气候倾向率

内蒙古地区 1951—2018 年干旱发生频率整体呈 东低西高、北低南高的空间分布规律。干旱发生频率 最高的地区主要集中在内蒙古的中西部,尤其是阿拉 善西北部和巴彦淖尔中部地区,发生频率均在 20%以 上;干旱发生频率最低的是东北部的根河和牙克石 周边地区,发生频率在 10%以下(图 7)。通过对 1980—2018 年内蒙古地区的气候倾向率分析可知, 内蒙古中西部和赤峰通辽南部地区的气候倾向率为 负值,说明该地区干旱呈增加趋势,尤其是阿拉善西 北部、阿左旗、鄂托克前旗、巴林右旗和敖汉旗部分 地区。而内蒙古中部乌兰察布、锡林郭勒、兴安盟和 呼伦贝尔大部分地区干旱倾向率为正值,说明该地区 正逐渐呈湿润趋势(图8)。



图 7 内蒙古地区 1980—2018 年千旱发生频率 Fig.7 Drought frequency distribution at the annual scale during 1980—2018



图 8 内蒙古地区 1980—2018 年气候倾向率 Fig.8 Climate tendency rate at the annual scale during 1980—2018

3 讨论

本研究利用标准化降水蒸散指数 (SPEI) 分析了 内蒙古地区干旱时空变化特征,主要结果与前人的研 究结果基本一致^[11]。气候突变反映气候从一种稳定变 化趋势跳跃式地转变到另一种稳定趋势的过程,表现 为气候在时空上从一个统计特征到另一统计特征^[12]。 研究表明,我国 20 世纪 70 年代后期出现了一次气候 年际跃变,多地气候的旱湿变化明显^[13-14]。在气候突 变点时间上,程乾生等^[13]通过分析北半球 1851— 1984 年间气候资料发现 1963 年和 1977 年是我国近 年来的 2 个显著突变点。张煦庭等^[15]利用月均气象数 据研究认为内蒙古地区 1960—2015 年间 SPEI 指数在 1976 年发生突变。马梓策等^[16]利用小波分析等多种 方法研究了内蒙古地区 1960—2016 年间气温和降水 的突变,指出气温突变发生在 1987 年,而降雨突变 东部区发生在 1983 年和 1999 年,中部地区发生在 1990 年和 1999 年,西部地区发生在 1961 年和 2011 年。本研究利用日值气象数据对月和年时间尺度的 *SPEI* 指数进行了分析,并将内蒙古全境分为 3 部分 区域进行独立研究,结果表明内蒙古大多数地区的气 候突变点发生在 1979 年左右,此年的降水量也是相应 阶段的一个极值,此后内蒙古多地干旱逐渐有所缓解, 并在 20 世纪 80 年代中后期进入一个相对湿润期;而 西部阿拉善地区突变点在 1963 年。前人研究的气候突 变点表现出一定的差异性主要是由于数据的研究方法、 区域和尺度的不同所造成的。但通过结合 1980—2018 年地表植被变化特征可以发现 *SPEI* 指数在内蒙古地 区干湿变化研究上有较好的相关性^[17]。

在干旱发生频率和倾向率变化的表现上,内蒙古 中西部部分地区和赤峰通辽南部地区一直以来都是 干旱频发的重灾区,且加重趋势明显;而内蒙古东部 呼伦贝尔、兴安盟地区、中部乌兰察布和锡林郭勒的 部分地区近年来却呈现变湿趋势。张存厚等[18]对 1970-2000 年内蒙古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,赤峰和锡林郭 勒则表现为干-湿-干交替变化趋势,而内蒙古中西部 是湿-干-湿交替进行。李萌等^[19]对 1980-2010 年期 间内蒙古气象数据进行研究表明,内蒙古东部水分盈 亏气候倾向率减少。本研究结果与前人研究具有高度 一致性,内蒙古东中部区域近年来总体上干旱有缓解 趋势^[20-21],而西部地区总体上干旱趋势有所加重^[22]。 由于内蒙古东西跨度大,不同时空尺度对研究结果影 响巨大。因此,一定时空尺度的区域干旱变化分析需 要相关的其他研究来进行佐证^[21, 23],因此本研究结果 也还需今后进一步结合内蒙古地区的植被变化趋势 进行结果验证。

4 结 论

1) SPEI 指数可以较好地表征内蒙古地区的干旱 变化特征,经与历史干旱灾害数据相对应验证,二者 有高度的一致性。

2)从空间范围上来看,内蒙古干旱变化在全区 各地表现出较强的差异性,呼伦贝尔、兴安盟、锡林 郭勒和乌兰察布等地干旱化态势近年有所缓解,甚至 有些地方还呈现出湿润状态;而内蒙古中西部、赤峰 和通辽等地区,干旱化态势逐渐增大。

3)从时间范围上来看,1979年左右是内蒙古地 区气候变化的一个突变点,内蒙古东中部地区自1979 年开始,干旱有所缓解,各地逐步进入一个湿润期。 鄂尔多斯地区自1957年左右以来,干旱化态势逐渐 得到缓解,而内蒙古西部阿拉善和巴彦淖尔两地自 1963年开始至1996年期间,干旱态势逐步减轻,但 从1996年开始,各地又进入一个新的干旱期。

参考文献:

- [1] 康蕾,张红旗. 我国五大粮食主产区农业干旱态势综合研究[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(8): 928-937.
 KANG Lei, ZHANG Hongqi. Comprehensive research on the state of agricultural drought in five main grain producing areas in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(8): 928-937.
- [2] 杨子生, 贺一梅. 中国 1950—2010 年水旱灾害减产粮食量研究[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2012.
 YANG Zisheng, HE Yimei. Study on grain yield reduction of China due to flood and drought disasters from 1950—2010[M]. Beijing: Social Sciences Academic Press 2012.
- [3] 赵勇, 翟家齐, 蒋桂芹, 等. 干旱驱动机制与模拟评估[M]. 北京: 科技出版社, 2017.

ZHAO Yong, ZHAI Jiaqi, JIANG Guiqin, et al. Drought driving mechanism and simulation evaluation[M]. Beijing: Science Press, 2017.

- [4] VICENTE-SERRANO S M, BEGUER ÍA S. Comment on "Candidate Distributions for Climatological Drought Indices (SPI and SPEI)" by James H. Stagge et al[J]. International Journal of Climatology, 2016, 36(4): 2 120-2 131.
- [5] 韩会明,刘喆玥,刘成林,等. 1960—2018 年吉安地区干旱特征分析 与短期预测[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(11): 85-92.
 HAN Huiming, LIU Zheyue, LIU Chenglin, et al. Analysis of drought characteristics and short-term prediction in Ji'an Area during 1960—2018[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(11): 85-92.
- [6] STAGGE J H, TALLAKSEN L M, GUDMUNDSSON L, et al. Response to comment on 'Candidate Distributions for Climatological Drought Indices (SPI and SPEI)'[J]. International Journal of Climatology, 2016, 36(4): 2 132-2 138.
- [7] 王盈盈,王志良,张泽中,等.基于 SPEI 的贵州省分区干旱时空演 变特征[J]. 灌溉排水学报,2019,38(6):119-128.
 WANG Yingying, WANG Zhiliang, ZHANG Zezhong, et al. Evaluating the spatiotemporal evolution of drought in Guizhou Province using the SPEI index[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(6): 119-128.
- [8] 史本林,朱新玉,胡云川,等. 基于 SPEI 指数的近 53 年河南省干旱时空变化特征[J]. 地理研究, 2015, 34(8): 1 547-1 558.
 SHI Benlin, ZHU Xinyu, HU Yunchuan, et al. Spatial and temporal variations of drought in Henan province over a 53-year period based on standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Geographical Research, 2015, 34(8): 1 547-1 558.
- [9] 施能,陈家其,屠其璞. 中国近100年来4个年代际的气候变化特征[J]. 气象学报, 1995(4): 431-439.
 SHI Neng, CHEN Jiaqi, TU Qipu. 4-Phase climate change features in the last 100 years over China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1995(4): 431-439.
- [10] HAMED K H. Trend detection in hydrologic data: the Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis[J]. Journal of Hydrology, 2008, 349(3): 350-363.
- [11] 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): 3 787-3 795. SHEN Guoqiang, ZHENG Haifeng, LEI Zhenfeng. Applicability analysis of SPEI for drought research in Northeast China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(11): 3 787-3 795.
- [12] 符淙斌, 王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. 大气科学, 1992(4):
 482-493.

FU Congbin, WANG Qiang. The definition and detection of the abrupt climate change[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1992(4): 482-493.

[13] 程乾生,周小波,朱迎善. 气候突变的聚类分析[J]. 地球物理学报,

1998(3): 308-314.

CHENG Qiansheng, ZHOU Xiaobo, ZHU Yingshan. Cluster analysis of climate jump[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1998(3): 308-314.

- [14] 赵嘉阳. 中国 1960—2013 年气候变化时空特征、突变及未来趋势分析[D]. 福州: 福建农林大学, 2017.
 ZHAO Jiayang. Changes and mutation in temperature and precipitation of China during 1960—2013 and future prediction[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2017
- [15] 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.
 ZHANG Xuting, PAN Xuebiao, XU Lin, et al. Analysis of spatio-temporal distribution of drought characteristics based on SPEI in Inner Mongolia during 1960—2015[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(15): 190-199.
- [16] 马梓策,于红博,张巧凤,等. 内蒙古地区 1960—2016 年气温和降水特征及突变[J]. 水土保持研究, 2019, 26(3): 114-121.
 MA Zice, YU Hongbo, ZHANG Qiaofeng, et al. Characteristics and abrupt change of temperature and precipitation in Inner Mongolia area over the period 1960—2016[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(3): 114-121.
- [17] 乌日汗,红雨,包刚. 2001—2016 年內蒙古植被物候变化及其对生产力的影响[J].草地学报,2019,27(6):1685-1693.
 WU Rihan, HONG Yu, BAO Gang. The change of vegetation phenology and its impacts on vegetation productivity in Inner Mongolia during 2001—2016[J]. Acta Agrestia Sinica, 2019, 27(6):1685-1693.
- [18] 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. ZHANG Cunhou, WANG Mingjiu, LI Xinghua, et al. The characteristics of temporal and spatial distribution of climate dry-wet conditions over Inner Mongolia in recent 30 years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2011, 25(8): 70-75.
- [19] 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.
 LI Meng, SHEN Shuanghe, CHU Ronghao, et al. The Analysis of Agricultural Climate Resources Distribution and Its Change Trends over 30 Years in China[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(21): 1-11.
- [20] 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]. 沈阳农业大学报, 2018, 49(4): 433-439.
 CHI Daocai, SHA Yan, CHEN Taotao, et al. Analysis of drought sensitivity based on standardized precipitation evapotranspiration Index—Taking Hulunbeier as an example[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2018, 49(4): 433-439.
- [21] 黄文琳,张强,孔冬冬,等. 1982—2013 年内蒙古地区植被物候对干 旱变化的响应[J]. 生态学报, 2019, 39(13): 4 953-4 965.
 HUANG Wenlin, ZHANG Qiang, KONG Dongdong, et al. Response of vegetation phenology to drought in Inner Mongolia from 1982 to 2013[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(13): 4 953-4 965.
- [22] 孙艺杰,刘宪锋,任志远,等.1960—2016 年黄土高原多尺度干旱特 征及影响因素[J]. 地理研究, 2019, 38(7): 1 820-1 832.
 SUN Yijie, LIU Xianfeng, REN Zhiyuan, et al. Spatiotemporal variations of multi-scale drought and its influencing factors across the Loess Plateau from 1960 to 2016[J]. Geographical Research, 2019, 38(7): 1 820-1 832.
- [23] 吴瑞芬, 霍治国, 曹艳芳, 等. 内蒙古典型草本植物春季物候变化及 其对气候变暖的响应[J]. 生态学杂志, 2009, 28(8): 1 470-1 475.
 WU Ruifen, HUO Zhiguo, CAO Yanfang, et al. Phenophase change of typical herbaceous plants in Inner Mongolia in spring and its response to climate warming[J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(8): 1 470-1 475.

Spatiotemporal Variation of Drought in Inner Mongolia Estimated Based on the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index

XIE Min¹, GAO Julin^{1*}, SUN Jiying¹, YU Xiaofang¹, WANG Zhigang¹, HU Shuping¹, ZHANG Lu²

(1. College of Agronomy, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China;

2. Library of Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract: 【Objective】 Global warming is expected to increase the frequency of extreme weathers such as flooding and drought. Understanding their spatiotemporal variation is important to help mitigate its detrimental impact. The purpose of this paper is to analyze the spatiotemporal variation of drought in Inner Mongolia of China. 【Method】 The analysis was based on meteorological data measured from 1951 to 2018 from 50 weather stations across the region. The occurrence and severity of the drought was quantified using the standardized precipitation evapotranspiration index (*SPEI*). 【Result】 An abrupt climate change occurred around 1979. Since then, most areas in the region have seen an ease of drought stress. Since 1996, however, western Inner Mongolia, and southern Chifeng and Tongliao. 【Conclusion】 *SPEI* can be used as an index to quantify drought at provincial scale. Its application to Inner Mongolia reveals that the province has undergone alternate drought and humidified climate since 1951. Drought occurred more frequently and severely in the central-western province than in other areas.

Key words: standardized precipitation evapotranspiration index; spatiotemporal variation; drought; Inner Mongolia

责任编辑:韩洋

(上接第112页)

Calculating Water Flow Rate with Measurement Errors of the Weir Considered

JIAO Xuan^{1,4}, ZHAO Lanhao^{1*}, WANG Zhengzhong^{2,3}, QIU Yong⁴

(1. College of Water Resources and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210024, China;

2. Cold and Arid Regions Water Engineering Safety Research Center, Key Laboratory Agricultural Soil and

Water Engineering in Arid and Semiarid Areas of Ministry of Education, Northwest A&F University, Xi'an 721000, China;

3. Sate Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, CAS, Lanzhou 730000, China;

4. College of Water Resources and Hydropower, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: [Objective] Weir is a classical apparatus measuring water flow rate in open channels. Its accuracy and the formula used to calculate flow rate depend on many factors. In this paper, we proposed a new method to calculate flow rate with measurement errors of the Weir taken into account. [Method] Considering the limitation of short series in multiple regression for calibrating the basic weir flow using the simplified lumped flow coefficient, the statistical effect of the accuracy of weir-measured flow in short series causal mapping relationship is found from the calibration results of different measured weir flow accuracy under the experimental statistical characteristics. The consistent response mechanism under the effect of multi-dimensional variable weir flow characteristic variable fuzzy probability correlation distribution identification and measured weir flow accuracy is established. [Result] The multivariate short series discharge calculation involving the front and rear weir width ratio a/c, the side weir length b and the expansion ratio L/W is a multidimensional variable fuzzy probability correlation distribution response different from the traditional linear section causal mapping model; From the perspective of algorithm mechanism, it is revealed that under the same weir crest head H, the contribution of front and rear weir width ratio a/c, side weir length b and widening ratio L/W to the characterization of the index measured discharge $[Q'_{cr}]$ is of equal significance. [Conclusion] The application calibration and verification of different short series measured weir flow accuracy samples in the existing literature results show that the calculation results of the method are in good agreement with the experimental statistical results, and the research results can provide reference for the design review of similar projects.

Key words: right angle weir type; test statistics; basic weir flow model; measured weir flow accuracy; discharge