

■ 水土资源与环境 ■

文章编号: 1672-3317(2023)08-0080-11

基于植被健康指数的内蒙古干旱时空特征分析及驱动因素研究

尹航^{1,2}, 张泽中³, 张伟杰^{1,2}, 来和鑫^{3*}, 王飞³

(1.水利部牧区水利科学研究所, 呼和浩特 010018; 2.中国水利水电科学研究院

内蒙古阴山北麓草原生态水文国家野外科学观测研究站, 北京 100038;

3.华北水利水电大学 水利学院, 郑州 450046)

摘要:【目的】探究内蒙古地区 1982—2020 年干旱时空演变特征及驱动因素。【方法】基于 1982—2020 年内蒙古植被健康指数 (VHI), 从时间、空间及时空耦合角度分析该区域干旱时空特征, 采用交叉小波方法分析厄尔尼诺-南方涛动 (ENSO)、北极涛动 (AO)、太阳黑子对干旱的驱动作用。【结果】①内蒙古地区干旱总体呈增加趋势, 夏季干旱化趋势最明显。内蒙古干旱呈现出一定的交替性特征, 第一主周期、第二主周期分别为 8、12 a。②内蒙古中部偏北地区的旱情较为明显。③干旱明显加重地区主要位于内蒙古中部及东北部少许地区, 南部呈干旱减轻趋势。④1982—2020 年, 内蒙古西部、中部、东部地区分别发生了 23、20、17 场干旱事件。最严重的干旱事件发生于 1988 年 12 月—1990 年 3 月。⑤大气环流因子及太阳黑子与内蒙古干旱间均存在相关关系, ENSO 对干旱的影响最大, 太阳黑子对干旱的影响最小。【结论】1982—2020 年, 内蒙古干旱表现出加重趋势, 具有周期性特征, 且 ENSO 对干旱的影响最大。

关键词: 干旱; 植被健康指数; 时空演变; 驱动因素分析; 内蒙古

中图分类号: P426.616

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.gggs.2022641

OSID: 

尹航, 张泽中, 张伟杰, 等. 基于植被健康指数的内蒙古干旱时空特征分析及驱动因素研究[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(8): 80-89, 105.

YIN Hang, ZHANG Zezhong, ZHANG Weijie, et al. Using Vegetation Health Index to Calculate Spatiotemporal Variation in Drought and Its Determinants in Inner Mongolia[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(8): 80-89, 105.

0 引言

【研究意义】干旱是一种对作物生产、供水和人民生活造成重大损失的自然灾害之一, 具有发生频率高、影响范围广、危害程度深的特点^[1-3]。干旱会导致地表植被生长状态和土壤水分条件发生变化, 从而影响植被的正常生长, 并对生态系统造成多重压力。植被指数能够反映干旱缺水作用下的作物季节性变化特征, 已成为评估陆地生态系统干旱变化的重要手段^[4-5]。在全球气候变化背景下, 探究植被干旱响应特征对指导农业生产和植被健康发展具有重要科学意义。

【研究进展】基于遥感的植被指数可以通过植被状态、冠层水量、地表温度等信息监测干旱现象^[6-8]。目前, 研究者们已构建多种遥感植被干旱指数, 包括温度植被干旱指数 (Temperature Vegetation Drought Index, TVDI)^[9]、植被状态指数 (Vegetation Condition Index, VCI)^[10]、垂直干旱指数 (Perpendicular Drought

Index, PDI)^[11]、温度状态指数 (Temperature Condition Index, TCI)^[12]等。吴黎等^[13]利用 SPI 与 TVDI 进行相互精度验证, 发现 TVDI 在干旱监测中具有一定指导意义。Mupepi 等^[14]对比了 VCI 指数、标准化降水指数 (Standardized Precipitation Index, SPI) 及直观观测 3 种方法对中度干旱和极端干旱的监测效果, 发现 VCI 指数对干旱的监测最为有效。与其他干旱指数相比, 遥感植被指数具有数据连续、实时获取、覆盖范围广等优点, 已被证实是最具前景的干旱监测技术手段^[15]。在众多基于遥感的植被干旱指数中, 植被健康指数 (Vegetation Health Index, VHI) 能够减弱甚至消除地理位置、生态系统以及土壤条件等因素对植被产生的影响, 对干旱有着良好的表征能力^[16-17]。Bento 等^[18]采用 VHI 刻画了全球干旱区的几场严重干旱事件, 结果表明 VHI 对陆地系统有着良好的干旱监测效用。Masroor 等^[19]使用 VHI 分析了印度干旱与土壤侵蚀的关系, 发现该指数能较好地描述哥达瓦里河流域中部的旱情发展过程。尹国应等^[20]利用 VHI 识别了长江中下游地区植被在干旱状况下的生长和热量异常, 得到了长江中下游各省市的农业干旱情况。Javed 等^[21]对比了 SPI 指数、VHI 指数等 4 种指数后发现 VHI 指数可以较好地捕捉土壤相对湿度的变化, 进而

收稿日期: 2022-11-15 修回日期: 2023-04-10 网络出版日期: 2023-05-15
基金项目: 中央引导地方科技发展资金项目 (2021ZY0027); 中国水利水电科学研究院基本科研业务费专项项目 (MK2022J07)

作者简介: 尹航 (1988-), 女, 工程师, 硕士研究生, 主要研究方向为水利水电工程。E-mail: 13474738854@163.com

通信作者: 来和鑫 (1997-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水文水资源。E-mail: 570546065@qq.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

识别干旱发生。*VHI* 指数已广泛应用于国内外干旱监测等领域,并表现出较好的适用性^[10, 22-23]。内蒙古有我国最大的荒漠草原区,生态环境较为脆弱,草原植被的生长受到干旱气候的抑制作用比较明显。21 世纪以来,随着温度的升高,降水量增加趋势减缓甚至微弱减少,可能导致了内蒙古地区干旱程度呈持续增加趋势^[24]。谢岷等^[3]使用标准化蒸散指数研究了内蒙古不同时空尺度干旱演变特征,发现 1979 年前后是内蒙古地区气候变化的关键突变点,至 1996 年前后又进入新一轮干早期;马梓策等^[25]分析了内蒙古地区旱情对植被的影响,结果表明夏旱对植被生长的胁迫作用最强;汪士为^[26]采用 *TVDI* 指数研究内蒙古地区干旱现象,发现春季、夏季、冬季未来一段时间大部分区域 *TVDI* 将呈增加趋势。【切入点】以上研究虽从不同角度对内蒙古干旱进行研究,但很少探讨干旱的时空耦合变化特征。同时,大气环流因子作为影响气候变化的强烈信号,是干旱发生和变化的重要驱动因素^[27-29],当前大气环流因子对内蒙古干旱的驱动机制尚不明确。【拟解决的关键问题】基于此,本文采用 *VHI* 指数表征干旱,分别从时间、空间、时空耦合角度,采用 Theil-Sen Median 趋势分析法和 Mann-Kendall 检验方法等多种方法分析内蒙古干旱的时空特征,同时运用交叉小波方法探讨该地区干旱与厄尔尼诺-南方涛动 (El Niño-Southern Oscillation, *ENSO*)、北极涛动 (Arctic Oscillation, *AO*) 及太阳黑子的关系,为促进内蒙古地区生态健康良性发展、制定区域防旱抗旱措施和构建生态安全屏障提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

内蒙古位于我国北部边境 (37°24'N—55°23'N, 97°12'E—126°04'E),地处温带大陆性季风气候,气温、降水空间分布不均,年均降水量为 35.86~506.15 mm,是我国北方重要的生态安全屏障^[25,30]。内蒙古拥有我国最大的荒漠草原区,生态脆弱性较高,干旱是内蒙古最严重的自然灾害之一,严重制约了当地社会经济的发展^[31]。依据地理位置及行政区划,本研究将内蒙古地区分为 3 个部分:呼伦贝尔市、兴安盟、通辽市、赤峰市为东部,锡林郭勒盟、乌兰察布市、呼和浩特市、包头市为中部,巴彦淖尔市、鄂尔多斯市、乌海市、阿拉善盟为西部。

1.2 数据来源

本文采用美国国家海洋和大气局 (<https://www.star.nesdis.noaa.gov/>) 提供的 1982—2020 年月尺度植被健康指数 (*VHI*) 遥感数据集,空间分辨率为 1 km。利用 ArcGIS 软件对数据进行预处理,利用邻域均值填补空缺值,对少量的缺失数据进

行插补。大气环流因子选用 *ENSO*、*AO* 及太阳黑子开展研究。其中, *ENSO* 是发生于赤道冬太平洋地区的风场和海面温度震荡, *AO* 是北半球冬季热带外行星尺度大气环流最重要的 1 个模态,太阳黑子的运动可以对较高大气层产生影响,这 3 种大气环流因子对气候变化的影响均不容忽视^[29, 32-33]。 *ENSO*、*AO* 及太阳黑子数据采用美国国家海洋气象局 (<https://www.noaa.gov/>) 提供的影响全球和区域气候变化的环流因子数据集。

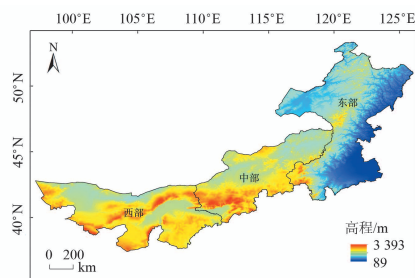


图 1 研究区域

Fig.1 Study area

1.3 研究方法

1.3.1 *VHI* 指数

VHI 是综合考虑植被状态和温度状态的遥感植被指数,可以同时反映区域内水分与温度的变化,监测不同时间尺度和地区的干旱变化情况^[34]。本文使用 *VHI* 表征内蒙古地区干旱程度, *VHI* 值越小,干旱越严重;反之亦然。当 *VHI*<0.4 时,认为有干旱事件发生^[18]。 *VHI* 计算式为:

$$VCI = \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}}, \quad (1)$$

$$TCI = \frac{LST_{\max} - LST}{LST_{\max} - LST_{\min}}, \quad (2)$$

$$VHI = \alpha VCI + (1 - \alpha) TCI, \quad (3)$$

式中: *VCI* 为植被状态指数; *NDVI* 为归一化植被指数; *NDVI*_{max} 和 *NDVI*_{min} 分别为研究时期 *NDVI* 的最大值和最小值; *TCI* 为温度状态指数; *LST* 为地表温度; *LST*_{max} 和 *LST*_{min} 分别为研究时期 *LST* 的最大值和最小值; α 为 *VCI* 和 *TCI* 的加权系数,取 $\alpha=0.5$ ^[35]。

1.3.2 气候倾向率与 Morlet 小波变换

本文采用气候倾向率法研究 *VHI* 指数在不同时间尺度下的变化趋势^[36];采用连续的 Morlet 小波变换^[37]分析内蒙古地区 *VHI* 指数的周期变化特征。

1.3.3 干旱时空特征分析

Theil-Sen Median 趋势分析法是一种稳健的非参数统计趋势计算方法,可以较好地处理有测量误差和离散数据不敏感的情况^[38]。本文使用该方法分析内蒙古地区逐像元 *VHI* 序列的趋势特征。Theil-Sen Median 趋势分析法的斜率 *S* 计算式为:

$$S = \text{Median}\left(\frac{y_j - x_i}{j - i}\right), \quad \forall j > i, \quad (4)$$

式中: *S* 表示 *VHI* 时间序列趋势信息; *x*_{*i*}、*y*_{*j*} 分别表

示第 i 年和第 j 年的 VHI 序列。当 $S>0$ 时, VHI 序列呈上升趋势, 干旱程度加重; 当 $S=0$ 时, VHI 序列无上升或下降趋势, 干旱程度变化不明显; 当 $S<0$ 时, VHI 序列呈下降趋势, 干旱程度减轻。由于 Theil-Sen Median 趋势分析法的斜率 S 基本上不存在严格等于 0 的区域, 因此, 本文将 0.000 5 和 -0.000 5 作为 VHI 序列上升和下降的临界点^[39-40]。

Mann-Kendall 检验方法是一种非参数统计检验方法, 可以用来判断趋势的显著性, 无须样本服从一定的分布, 不受异常值的影响^[41]。当 $Z \geq 1.96$ 时, 认为 VHI 序列呈显著上升趋势 ($p<0.05$), 干旱程度显著减轻; 当 $-1.96 < Z < 1.96$ 时, 认为 VHI 序列呈不显著变化趋势, 干旱程度变化不显著; 当 $Z \leq -1.96$ 时, 认为 VHI 序列呈显著下降趋势 ($p<0.05$), 干旱程度显著加重。

本文将 Theil-Sen Median 趋势分析法和 Mann-Kendall 检验方法结合, 分析内蒙古 VHI 时空变化特征, 揭示内蒙古干旱时空演变趋势。Theil-Sen Median 趋势分析法的斜率 S 和 Mann-Kendall 检验方法的统计量 Z 的结合方式如表 1 所示。

表 1 基于 Theil-Sen Median 和 Mann-Kendall 的干旱划分标准

Table 1 Drought classification standards based on

Theil-Sen Median and Mann-Kendall

S	Z	VHI 趋势变化	干旱趋势变化
$\geq 0.000\ 5$	≥ 1.96	明显上升	明显减轻
$\geq 0.000\ 5$	$-1.96 \sim 1.96$	轻微上升	轻微减轻
$-0.000\ 5 \sim 0.000\ 5$	-	趋势不明显	保持不变
$\leq -0.000\ 5$	$-1.96 \sim 1.96$	轻微下降	轻微减轻
$\leq -0.000\ 5$	≤ -1.96	明显下降	明显减轻

1.3.4 干旱特征识别

本文使用改进的游程理论识别内蒙古 1982—2020 年干旱事件, 进而分析干旱特征变量变化。传统的游程理论无法识别一些历时很短的小干旱事件, 也没有将间隔时间较短的 2 次历时很长的干旱事件合并, 使得干旱事件识别的准确性较低^[42]。本文利用改进的 3 阈值游程理论对干旱事件进行识别, 阈值分别为 0.40、0.42、0.45^[43]。定义干旱事件数为对应时间范围内干旱

事件发生的次数; 历时为 1 次干旱事件的时间长短; 烈度为 1 次干旱事件中所有 VHI 指数之和; 烈度极大值为干旱事件的时间范围内 VHI 指数的最小值。

1.3.5 干旱驱动因素分析

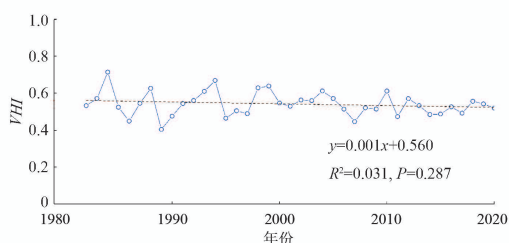
采用交叉小波方法分析大气环流因子、太阳黑子与 VHI 指数间相关性, 从而探究内蒙古干旱的驱动因素。交叉小波可以揭示 2 个时间序列在时间尺度上的相关关系, 其中, 交叉小波能量谱 (XWT) 常用来解释 2 个序列在高频区的位相关系, 交叉小波能聚谱 (WTC) 常用来解释 2 个序列在低频区的位相关系^[44]。显著相干面积百分比 (PASC) 和平均小波相干 (AWC) 可以用于评判相关关系, PASC 和 AWC 越大, 相关性越强^[45], 本文使用 PASC 和 AWC 量化大气环流因子及太阳黑子对内蒙古干旱的影响。

2 结果与分析

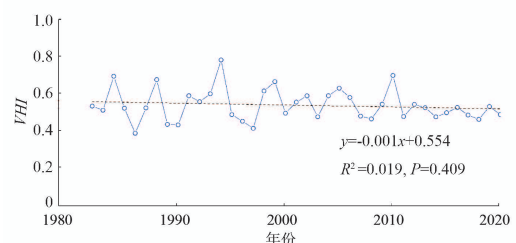
2.1 干旱时间变化特征

2.1.1 多时间尺度变化特征

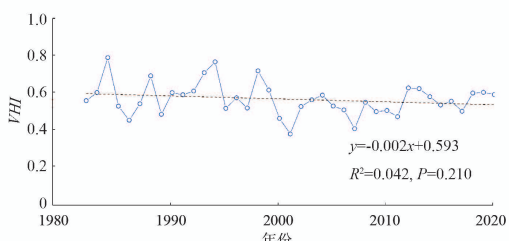
内蒙古 1982—2020 年不同时间尺度的 VHI 变化特征如图 2 所示。由图 2 可知, 年、季、月尺度上 VHI 均呈下降趋势, 表明内蒙古地区干旱总体呈增加趋势。年尺度上, VHI 的线性倾向率为 -0.01/10 a, 平均 VHI 为 0.541, 最小值出现在 1989 年, VHI 均值为 0.403。季尺度上, 春季、夏季、秋季、冬季 VHI 的线性倾向率分别为 -0.01/10 a、-0.02/10 a、-0.01/10 a、-0.01/10 a, 可见夏季干旱化趋势最为明显。同时, 春季、夏季、秋季、冬季的 VHI 均值分别为 0.534、0.561、0.543、0.525, 最小值分别出现在 1986 年 (0.382)、2001 年 (0.373)、1989 年 (0.368)、1989 年 (0.357)。月尺度上, VHI 均值为 0.541, 1989 年 12 月 VHI 达到最小值 0.310, 1984 年 8 月 VHI 达到最大值 0.805。综上可知, 1982—2020 年内蒙古地区干旱呈增加趋势, 且 1989 年干旱较为严重。



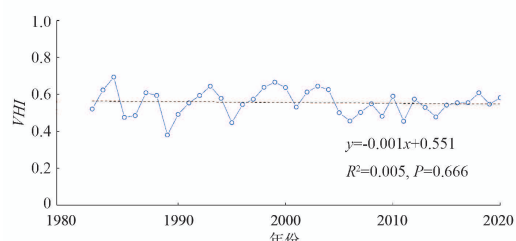
(a) 年



(b) 春季



(c) 夏季



(d) 秋季

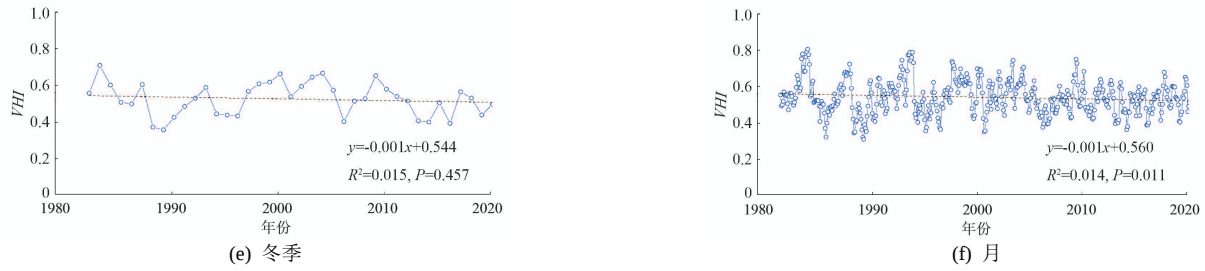


图2 内蒙古 1982—2020 年不同时间尺度 VHI 的变化趋势

Fig.2 VHI change trend at different time scales in Inner Mongolia from 1982 to 2020

内蒙古 1982—2020 年各分区年尺度上 VHI 变化特征如图 3 所示。由图 3 可知，西部、中部、东部地区 VHI 的线性倾向率分别为 0.01/10 a、-0.03/10 a、-0.01/10 a。西部地区 VHI 序列呈轻微上升趋势，中部、东部地区 VHI 序列呈下降趋势，说明研究期内西部地

区的干旱趋势轻微减轻，而中部和东部地区干旱趋势加重，中部、东部地区干旱变化趋势与内蒙古地区一致。西部、中部、东部地区的 VHI 均值分别为 0.538、0.539、0.543。

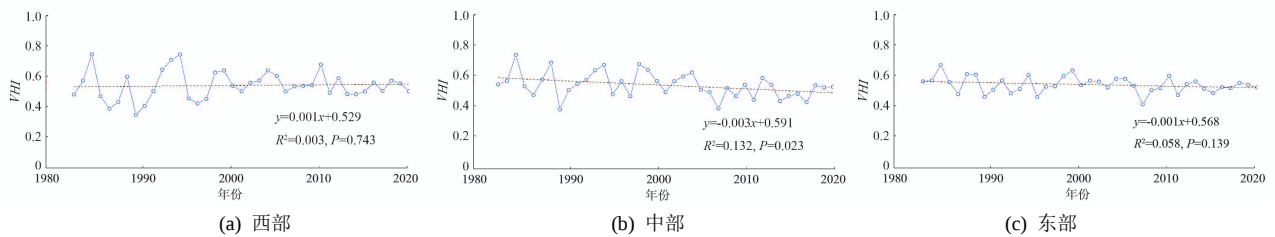


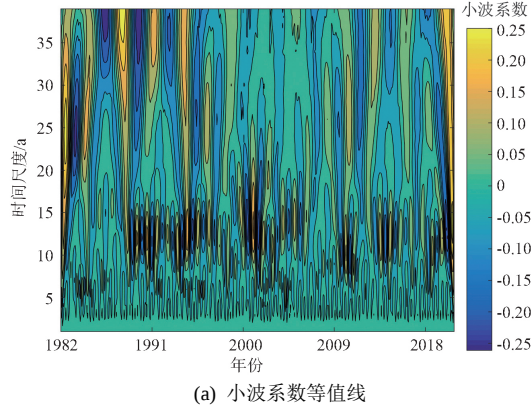
图3 内蒙古 1982—2020 年各分区年尺度 VHI 的变化趋势

Fig.3 Annual-scale VHI change trend at different zones in Inner Mongolia from 1982 to 2020

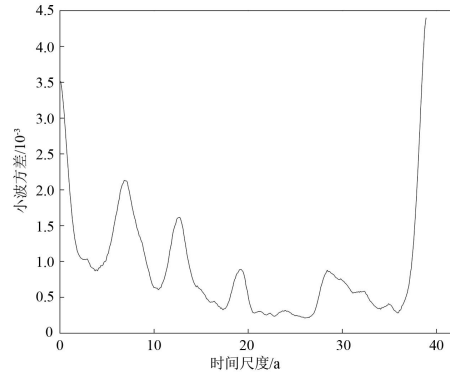
2.1.2 干旱周期特征

应用 Morlet 连续复小波变化分析内蒙古 1982—2020 年干旱周期（图 4）。由图 4 可知，大部分等值线中心为负，说明内蒙古整体气候相对偏旱。在年尺度上，内蒙古干旱表现出一定的交替性特征。由

图 4（b）可知，VHI 指数在 5~10、10~13、18~20、27~37 a 附近存在 4 个震荡周期，对应的峰值分别为 8、12、18、29 a。其中，5~10 a 和 10~13 a 的震荡周期较为强烈，因此，VHI 指数的第一主周期、第二主周期分别为 8、12 a。



(a) 小波系数等值线



(b) 小波方差

图4 内蒙古 VHI 指数小波系数等值线图及小波方差

Fig.4 Wavelet coefficients isoline and wavelet variance diagram of VHI in Inner Mongolia

2.2 干旱空间分布特征

图 5 为 1982—2020 年内蒙古 VHI 的空间分布。由图 5 可知，年尺度上，VHI 在 0.356~0.700 之间，均值为 0.541，旱情较严重区域发生在内蒙古中部偏北地带及西部地区。季尺度上，春季干旱的空间差异性相对较小，夏季西部及中部偏北地带较为干旱，秋季西部、中部偏北及东部偏北地区较为干旱，冬季东部地区及中部偏东地区较为干旱。VHI 均在 0.2~0.8 之间波动，并且冬季的 VHI 均值最小（0.525），表明冬季旱情最重。整体上来看，内蒙古中部偏北地区的

旱情较为严重。

由于 1989 年 VHI 为研究时段内最小值 0.403，该年内蒙古的干旱最严重，因此将 1989 年作为典型干旱年以分析其空间变化特征。由图 6 可知，年尺度上 VHI 处于 0.081~0.771 之间，内蒙古西部、中部地区干旱较严重，季尺度上，春季、夏季、秋季、冬季 VHI 均值分别为 0.430、0.479、0.368、0.357，可以看出冬季干旱最严重。1989 年内蒙古发生干旱较严重地带为西部地区。

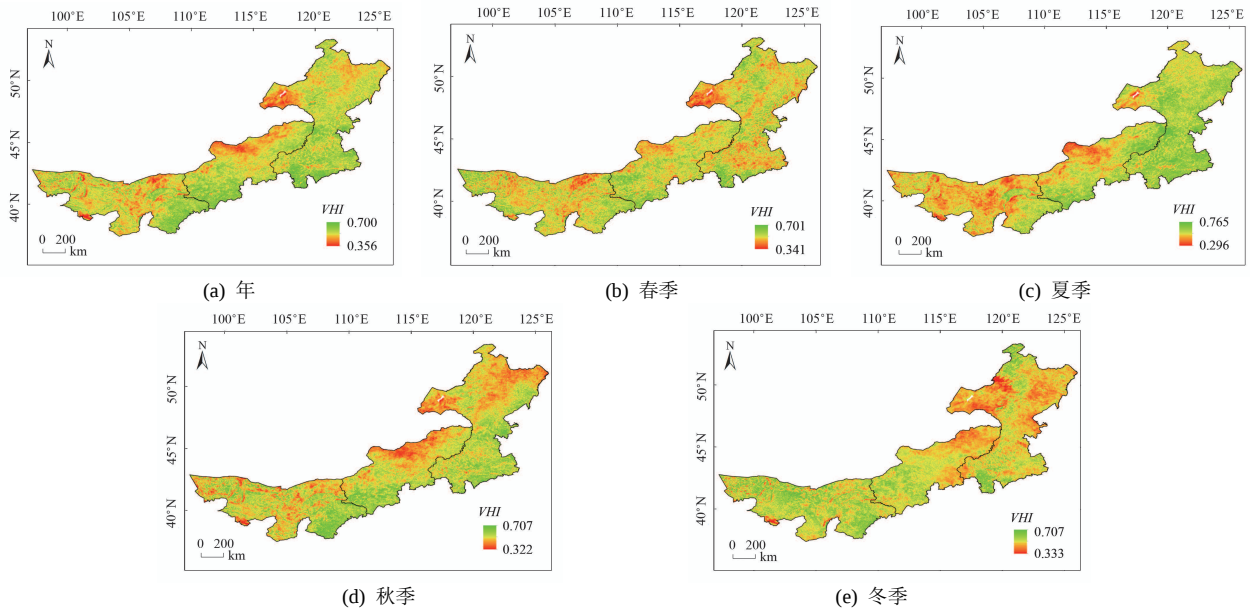


图5 内蒙古1982—2020年VHI的空间分布特征

Fig.5 Spatial distribution characteristics of VHI in Inner Mongolia from 1982 to 2020

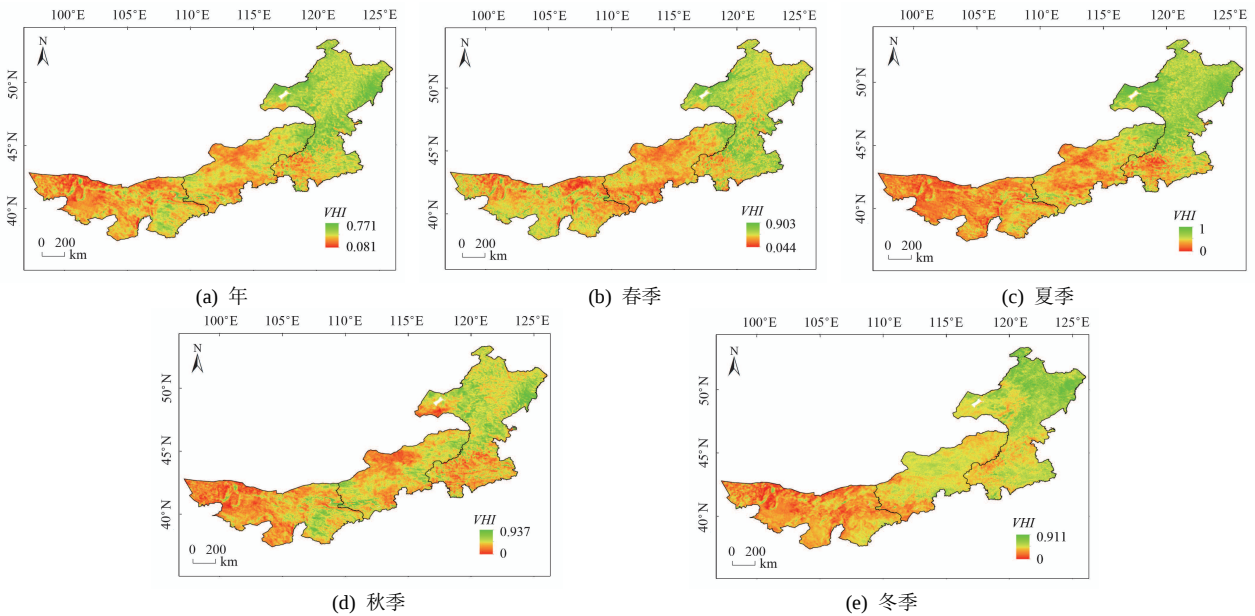


图6 1989年内蒙古VHI的空间分布特征

Fig.6 Spatial distribution characteristics of VHI in Inner Mongolia during 1989

2.3 干旱时空演变趋势

图7为内蒙古1982—2020年干旱变化趋势，包含Theil-Sen Median趋势分析、Mann-Kendall趋势检验以及耦合Theil-Sen Median和Mann-Kendall的干旱变化特征。表2为内蒙古干旱变化趋势，由表2可知，干旱趋势加重的面积占比为58.19%，干旱趋势减轻的面积占比为32.32%，干旱趋势稳定变化的面积占比为9.49%；Theil-Sen Median趋势检验的 S_{vhi} 值较低地区位于内蒙古中部地区，而 S_{vhi} 值较高地区位于西部及东部偏北地区。Mann-Kendall检验表明，内蒙古干旱趋势呈显著加重、不显著变化、显著减轻的面积占比分别为31.30%、52.96%和15.74%。综合Theil-Sen Median趋势分析和Mann-Kendall检验可以将干旱变化分为5种主要类型，分别为明显加重、轻微加重、

保持不变、轻微减轻和明显减轻，且这些类型的面积占比分别为31.30%、26.89%、9.49%、16.58%和15.74%，可见内蒙古干旱整体呈加重趋势，干旱加重的面积占比达到58.19%；干旱明显加重地区位于中部地区及东部少许地区，而西部地区主要呈干旱减轻趋势，此结果也与VHI的线性趋势一致。

2.4 干旱特征变量分析

表3为内蒙古各分区干旱事件识别结果。由表3可知，1982—2020年内蒙古西部地区共发生了23场干旱事件，平均干旱历时为3.39个月，平均烈度为1.218，平均烈度极大值为0.342；内蒙古中部地区共发生20场干旱事件，平均干旱历时为3.25个月，平均烈度为1.179，平均烈度极大值为0.345；内蒙古东部地区共发生17场干旱事件，平均干旱历时为2.29

个月, 平均烈度为 0.847, 平均烈度极大值为 0.355。年 3 月, 位于内蒙古西部地区, 该场干旱的历时为此外, 最严重的干旱事件发生于 1988 年 12 月—1990 16 个月, 烈度为 5.409, 烈度极大值为 0.188。

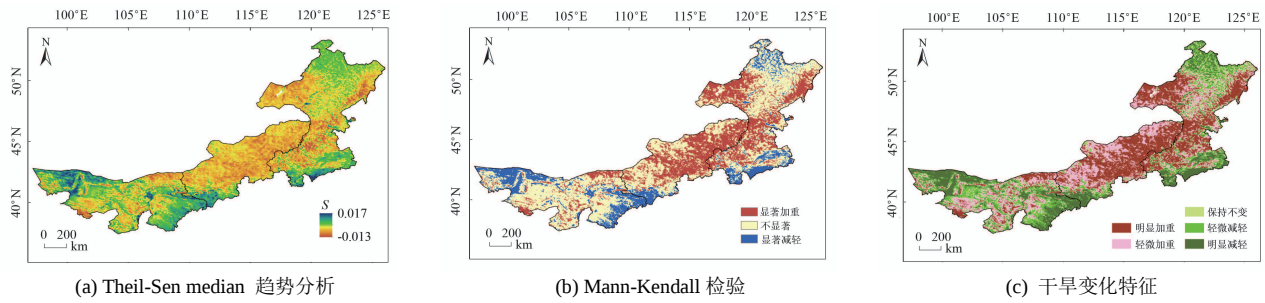


图 7 内蒙古 1982—2020 年干旱变化趋势

Fig.7 Drought change trend in Inner Mongolia from 1982 to 2020

表 2 内蒙古干旱变化趋势统计

Table 2 Statistics of drought change trend in Inner Mongolia

干旱趋势变化	Theil-Sen Median 趋势分析			Mann-Kendall 检验			Theil-Sen Median 趋势分析+Mann-Kendall 检验				
	加重	稳定	减轻	显著加重	不显著	显著减轻	明显加重	轻微加重	保持不变	轻微减轻	明显减轻
面积占比/%	58.19	9.49	32.32	31.30	52.96	15.74	31.30	26.89	9.49	16.58	15.74

表 3 内蒙古各分区干旱事件识别结果

Table 3 The results of drought event identification at different zones in Inner Mongolia

编号	西部地区				中部地区				东部地区			
	时间	历时	烈度	烈度极大值	时间	历时	烈度	烈度极大值	时间	历时	烈度	烈度极大值
1	198209—198210	2	0.751	0.374	198510—198510	1	0.384	0.384	198901—198903	3	0.970	0.283
2	198506—198510	5	1.817	0.333	198604—198606	3	1.116	0.302	198910—198912	3	1.185	0.375
3	198604—198609	6	1.675	0.222	198812—198905	6	2.283	0.351	199003—199003	1	0.357	0.357
4	198701—198702	2	0.771	0.382	198910—199005	8	2.835	0.292	199201—199202	2	0.769	0.380
5	198704—198705	2	0.777	0.358	199502—199502	1	0.400	0.400	199302—199303	2	0.774	0.381
6	198707—198709	3	1.149	0.360	199511—199512	2	0.790	0.387	199312—199312	1	0.392	0.392
7	198812—199003	16	5.409	0.188	199702—199704	3	1.190	0.375	199411—199412	2	0.729	0.355
8	199009—199011	3	1.141	0.357	200105—200109	5	1.655	0.301	199502—199502	1	0.346	0.346
9	199101—199102	2	0.802	0.392	200506—200510	5	1.889	0.361	199510—199512	3	1.029	0.330
10	199108—199108	1	0.369	0.369	200701—200702	2	0.747	0.372	200106—200107	2	0.807	0.395
11	199506—199507	2	0.732	0.338	200705—200709	5	1.545	0.267	200304—200306	3	1.114	0.339
12	199511—199511	1	0.350	0.350	200907—200910	4	1.314	0.297	200701—200702	2	0.697	0.317
13	199604—199606	3	1.047	0.344	201007—201008	2	0.688	0.342	200706—200709	4	1.450	0.352
14	199610—199706	9	3.348	0.254	201108—201110	3	1.140	0.335	201311—201401	3	1.183	0.353
15	200005—200007	3	1.157	0.372	201403—201404	2	0.767	0.359	201501—201502	2	0.666	0.327
16	200105—200108	4	1.427	0.309	201408—201410	3	1.104	0.352	201612—201702	3	1.173	0.377
17	200610—200611	2	0.682	0.324	201501—201502	2	0.768	0.369	202001—202002	2	0.760	0.373
18	200803—200803	1	0.399	0.399	201612—201702	3	1.192	0.382				
19	201111—201111	1	0.387	0.387	201706—201707	2	0.676	0.323				
20	201304—201304	1	0.390	0.390	201804—201806	3	1.089	0.342				
21	201401—201404	4	1.504	0.356								
22	201612—201702	3	1.169	0.359								
23	201804—201805	2	0.765	0.359								

图 8 为 1982—2020 年内蒙古不同地区各年代的干旱特征变量变化趋势。内蒙古西部干旱事件数呈先减小后增大趋势, 平均历时和平均烈度都呈逐渐减小趋势, 平均烈度极大值呈逐渐增大趋势, 说明研究期内内蒙古西部整体干旱程度减轻; 内蒙古中部干旱事件数呈先减小后增大趋势, 且 20 世纪 90 年代后增长较为迅速, 平均历时和平均烈度都呈先减小后增大再减小的趋势, 烈度极大值呈先增大后减小再增大的趋势, 说明研究期内内蒙古中部旱情波动变化; 内蒙古东部干旱事件数呈先增大后减小趋势, 平均历时和平均烈度均呈先减小后增大再轻微减小趋势, 烈度极大

值呈先轻微减小后增大趋势, 说明研究期内内蒙古东部地区旱情可能有所反复, 整体而言, 内蒙古东部旱情轻微增加。

2.5 干旱驱动因素研究

2.5.1 ENSO 对 VHI 影响

VHI 与 ENSO 的交叉小波能量谱和小波凝聚谱如图 9 所示。由图 9 (a) 可知, VHI 与 ENSO 在高能量区存在着明显的相关关系, 主要表现在 1986—2005 年的 24~64 个月显著共振周期, 1990—2005 年的 8~32 个月显著共振周期, 以及 2009—2017 年的 8~32 个月显著共振周期。小波凝聚谱反映的是 VHI 与 ENSO 在

低能量区的相关关系, 主要表现为 1985—2004 年的 40~64 个月显著共振周期、2000—2001 年的 8~12 个月显著共振周期, 以及 2014—2016 年的 24~40 个月

显著共振周期。同时, *VHI* 与 *ENSO* 还存在 1~8 个月尺度的间歇性共振周期。

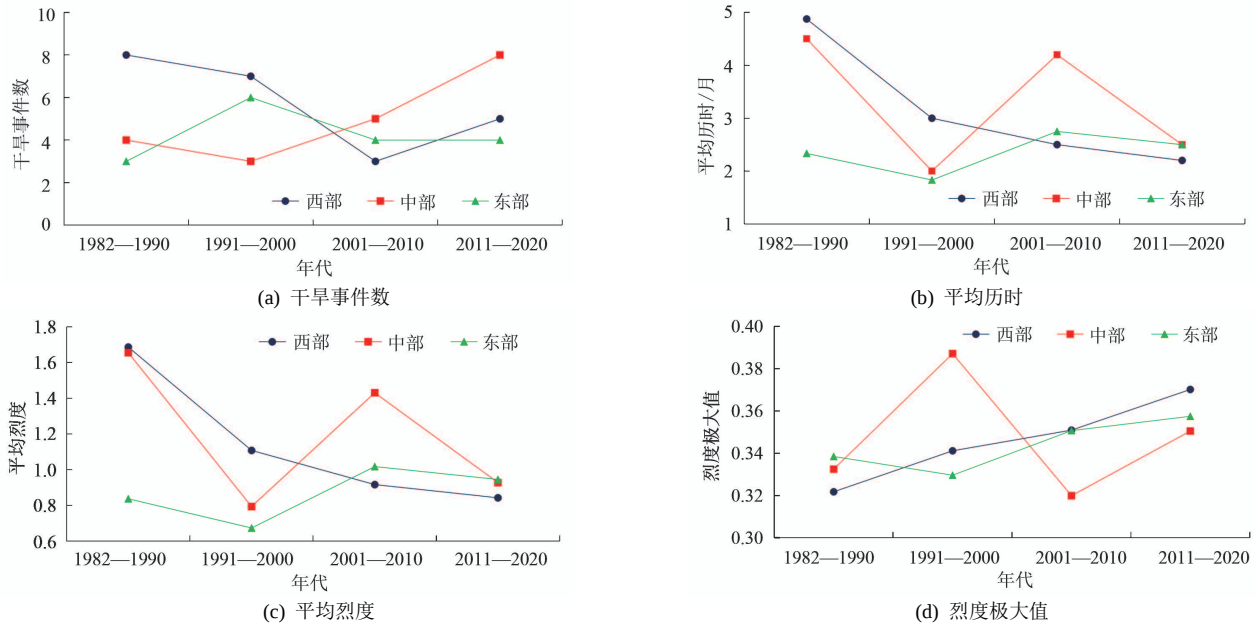


图 8 不同年代各分区干旱特征变量变化趋势

Fig.8 Change trend of drought characteristic variables at different zones in different periods

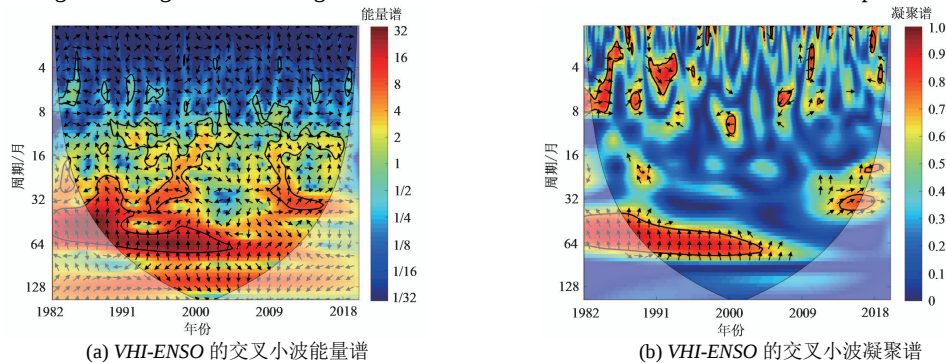


图 9 *VHI* 与 *ENSO* 的交叉小波能量谱和小波凝聚谱

Fig.9 Cross wavelet energy spectrum and wavelet condensation spectrum between *VHI* and *ENSO*

2.5.2 AO 对 *VHI* 的影响

VHI 与 *AO* 的交叉小波能量谱和小波凝聚谱如图 10 所示。由图 10 (a) 可知, *VHI* 与 *AO* 在高能量区存在一定的相关关系, 其中, 在 1987—1991 年存在 32~48 个月显著共振周期, 在 1987—1994 年存在 8~16 个月显著共振周期, 在 2000—2003 年存在 10~14 个月的显著共振周期, 在 2008—2012 年存在 7~14 个月的显著共振周期。由图 10 (b) 可知, *VHI* 与 *AO* 在低能量区主要存在 6 个显著共振周期, 在 1988—1990 年存在 2~8 个月显著共振周期, 在 1990—1993 年存在 10~14 个月显著共振周期, 在 1995—2018 年存在 20~30 个月显著共振周期, 在 2002—2006 年存在 5~12 个月显著共振周期, 在 2009—2011 年存在 8~14 个月显著共振周期, 在 2007—2018 年存在 20~60 个月显著共振周期。

2.5.3 太阳黑子对 *VHI* 的影响

通过 *VHI* 与太阳黑子的交叉小波能量谱和小波

凝聚谱 (图 11) 可以看出, *VHI* 与太阳黑子之间存在相关关系。在高能区主要表现为在 1993—1998 年存在 96~128 个月的显著共振周期以及一些间歇性共振周期。在低能区主要表现为在 1986—1995 年存在 32~48 个月的显著共振周期, 1989—1992 年存在 10~15 个月的显著共振周期, 2000—2003 年存在 13~16 个月的显著共振周期和 2010—2015 年存在 32~48 个月的显著共振周期, 同时, 还存在 2~8 个月的间歇性共振周期。整体来看, *VHI* 与太阳黑子间的相关关系相对不强。

表 4 为 *VHI* 与 *ENSO*、*AO* 和太阳黑子的交叉小波的 *PASC* 和 *AWC* 值。由表 4 可知, *ENSO* 对 *VHI* 的影响最大, *PASC*、*AWC* 分别为 9.31%、0.806 4; 太阳黑子对 *VHI* 的影响最小, *PASC*、*AWC* 分别为 4.96%、0.767 2。

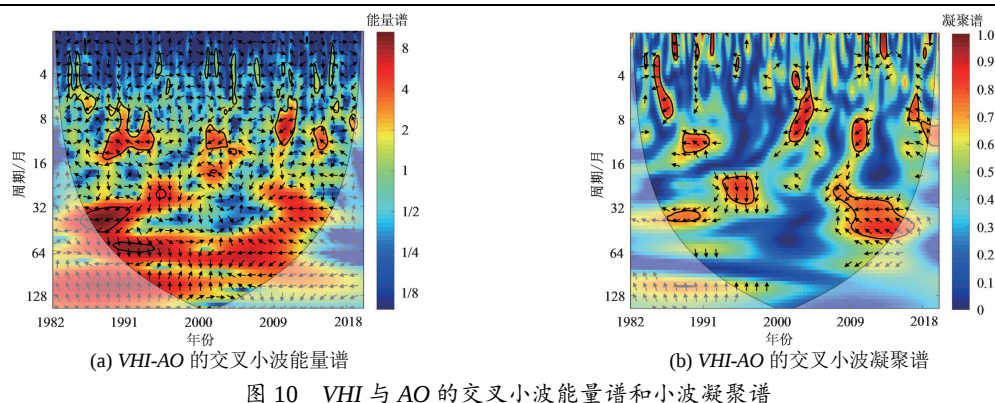


图 10 VHI 与 AO 的交叉小波能量谱和小波凝聚谱

Fig.10 Cross wavelet energy spectrum and wavelet condensation spectrum between VHI and AO

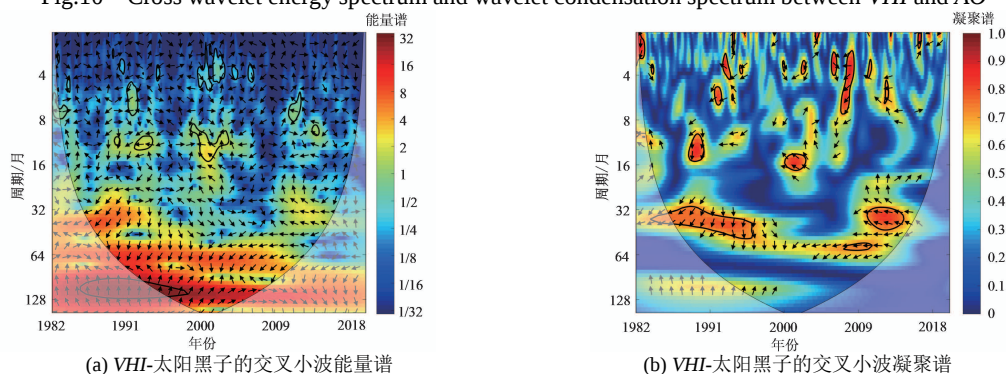


图 11 VHI 与太阳黑子的交叉小波能量谱和小波凝聚谱

Fig.11 Cross wavelet energy spectrum and wavelet condensation spectrum between VHI and sunspot activity

表 4 交叉小波 PASC、AWC 值

指标	VHI-ENSO	VHI-AO	VHI-太阳黑子
PASC/%	9.31	7.67	4.96
AWC	0.806 4	0.779 3	0.767 2

3 讨论

全球气候变化研究中,植被是联结土壤、水分和大气相互作用的天然纽带,植被变化作为陆地生态系统的关键组成部分,可以用来表征干旱变化^[46-47]。当前多数研究采用基于遥感植被指数的方法来识别陆地系统的干旱现象,而植被健康指数 VHI 结合了 TCI 和 VCI 的优势,在衡量由气象条件的差异而造成的干旱状况方面具有明显优势^[17]。本研究基于 VHI 指数识别内蒙古地区 1982—2020 年干旱演变特征,发现 VHI 指数呈下降趋势,这与 Javed 等^[21]研究结果一致。汪士为^[26]研究指出 2001—2020 年内蒙古地区总体干旱呈加重趋势,这与本研究结果一致。空间尺度上,本研究分析了内蒙古地区干旱的空间分布格局,并采用耦合的 Theil-Sen Median 趋势分析法和 Mann-Kendall 检验方法分析了内蒙古干旱的时空演变特征,结果表明内蒙古干旱主要集中在中部偏北地区,且中部地区干旱加重趋势较为明显,这与李虹雨等^[48]研究结果较为相似。李萌等^[49]研究指出,1980—2010 年内蒙古东部水分盈亏指数的气候倾向率减少,这与本研究结果不同,导致这一差别的主要原因是其研究的时间段为 1980—2010 年,而本文研究的时间

段为 1982—2020 年,2010—2020 年内蒙古东部地区干旱事件数、干旱历时、烈度均呈下降趋势,烈度极大值呈上升趋势(图 8),说明 2010—2020 年内蒙古东部地区干旱程度减轻,这可能是导致研究结果存在差异的原因。

在内蒙古干旱驱动因素的研究方面,本研究采用交叉小波方法分析了 ENSO、AO、太阳黑子对内蒙古干旱的影响,发现 ENSO 对内蒙古干旱的影响最大。ENSO 可以导致海温异常升高,进而导致干旱的发生^[29]。曹永强等^[50]研究表明,ENSO 冷暖事件在一定程度上可以影响辽宁省干旱情况;赵盼盼等^[51]研究发现,ENSO 对气象干旱和人文干旱的影响较大;白小娟等^[52]对 1961—2012 年内蒙古地区气候因子与 ENSO 事件的相关性进行研究发现,ENSO 事件会对内蒙古降水、气温等气候因子产生明显影响,导致干旱灾害发生可能性增加。因此,未来可将 ENSO 作为输入因子提升内蒙古干旱的预测能力。

4 结论

1) 时间尺度上,内蒙古地区干旱总体呈增加趋势,夏季干旱化趋势最为明显。内蒙古干旱的第一主周期、第二主周期分别为 8、12 a。

2) 空间尺度上,内蒙古中部偏北地区的旱情较为明显。1989 年干旱程度相对较重的原因可能是由于西南地区发生了较为严重的干旱。

3) 时空尺度上,内蒙古干旱呈加重趋势的面积

占比为 58.19%。其中, 干旱明显加重地区主要位于中部及东北部少许地区, 而南部则呈干旱减轻趋势。

4) 1982—2020 年内蒙古西部、中部、东部地区分别发生了 23、20、17 场干旱事件。最严重的干旱事件发生于 1988 年 12 月—1990 年 3 月, 位于内蒙古西部地区, 该场干旱的历时为 16 个月, 烈度为 5.409, 烈度极大值为 0.188。

5) 大气环流因子及太阳黑子与内蒙古干旱间均存在相关关系, *ENSO* 对干旱的影响最大, 太阳黑子对干旱的影响最小。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献:

- [1] 王飞. 多干旱类型视角下的黄河流域干旱时空演变特征研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2020.
WANG Fei. Study on the temporal and spatial evolution characteristics of drought from a multiple drought types perspective in the Yellow River Basin[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2020.
- [2] 姜大膀, 王晓欣. 对 IPCC 第六次评估报告中有关干旱变化的解读[J]. 大气科学学报, 2021, 44(5): 650-653.
JIANG Dabang, WANG Xiaoxin. A brief interpretation of drought change from IPCC Sixth Assessment Report[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2021, 44(5): 650-653.
- [3] 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.
- [4] JONG R, VERBESSELT J, ZEILEIS A, et al. Shifts in global vegetation activity trends[J]. Remote Sensing, 2013, 5: 1 117-1 133.
- [5] 康尧, 郭恩亮, 王永芳, 等. 温度植被干旱指数在蒙古高原干旱监测中的应用[J]. 应用生态学报, 2021, 32(7): 2 534-2 544.
KANG Yao, GUO Enliang, WANG Yongfang, et al. Application of temperature vegetation dryness index for drought monitoring in Mongolian Plateau[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(7): 2 534-2 544.
- [6] 牛文娟, 苟思, 刘超, 等. 生态干旱初探[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(S1): 84-89.
NIU Wenjuan, GOU Si, LIU Chao, et al. Preliminary studies on ecological drought[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(S1): 84-89.
- [7] 沈彦军, 李红军, 雷玉平. 干旱指数应用研究综述[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(4): 128-133, 186.
SHEN Yanjun, LI Hongjun, LEI Yuping. Research review on application of drought index[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(4): 128-133, 186.
- [8] 张红卫, 陈怀亮, 申双和. 基于 EOS/MODIS 数据的土壤水分遥感监测方法[J]. 科技导报, 2009, 27(12): 85-92.
ZHANG Hongwei, CHEN Huailiang, SHEN Shuanghe. Research on soil moisture remote sensing monitoring based on EOS/MODIS data[J]. Science & Technology Review, 2009, 27(12): 85-92.
- [9] 杜灵通, 候静, 胡悦, 等. 基于遥感温度植被干旱指数的宁夏 2000—2010 年旱情变化特征[J]. 农业工程学报, 2015, 31(14): 209-216.
DU Lingtong, HOU Jing, HU Yue, et al. Drought variation characteristics in Ningxia from 2000 to 2010 based on temperature vegetation dryness index by remote sensing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(14): 209-216.
- [10] AGUTU N O, AWANGE J L, ZERI HUN A, et al. Assessing multi-satellite remote sensing, reanalysis, and land surface models' products in characterizing agricultural drought in East Africa[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 194: 287-302.
- [11] 陈国茜, 周秉荣, 胡爱军. 垂直干旱指数在高寒农区春旱监测中的应用研究[J]. 遥感技术与应用, 2014, 29(6): 949-953, 1 026.
CHEN Guoxi, ZHOU Bingrong, HU Aijun. Application research of perpendicular drought index for spring drought monitoring in high and cold agricultural area[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2014, 29(6): 949-953, 1 026.
- [12] KOGAN F N. Droughts of the late 1980s in the United States as derived from NOAA polar-orbiting satellite data[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1995, 76(5): 655-668.
- [13] 吴黎, 解文欢, 张有智, 等. 基于温度植被干旱指数的黑龙江省 20 年干旱时空特征研究[J]. 水土保持研究, 2022, 29(5): 358-363.
WU Li, XIE Wenhuan, ZHANG Youzhi, et al. Research of drought characteristics in Heilongjiang Province nearly 20 years based on temperature vegetation dryness index by remote sensing[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(5): 358-363.
- [14] MUPEPI O, MATSA M M. A combination of vegetation condition index, standardized precipitation index and human observation in monitoring spatio-temporal dynamics of drought. A case of Zvishavane District in Zimbabwe[J]. Environmental Development, 2023, 45: 100 802.
- [15] WINKLER K, GESSNER U, HOCHSCHILD V. Identifying droughts affecting agriculture in Africa based on remote sensing time series between 2000—2016: Rainfall anomalies and vegetation condition in the context of *ENSO*[J]. Remote Sensing, 2017, 9: 831.
- [16] KOGAN F N. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection[J]. Advances in Space Research, 1995, 15(11): 91-100.
- [17] SULTANA M S, GAZI M Y, MIA M B. Multiple indices based agricultural drought assessment in the Northwestern part of Bangladesh using geospatial techniques[J]. Environmental Challenges, 2021, 4: 100 120.
- [18] BENTO V A, GOUVEIA C M, DACAMARA C C, et al. The roles of NDVI and Land Surface Temperature when using the Vegetation Health Index over dry regions[J]. Global and Planetary Change, 2020, 190: 103 198.
- [19] MASROOR M, SAJJAD H, REHMAN S, et al. Analysing the relationship between drought and soil erosion using vegetation health index and *RUSLE* models in Godavari middle sub-basin, India[J]. Geoscience Frontiers, 2022, 13(2): 27-39.
- [20] 尹国应, 张洪艳, 张良培. 2001—2019 年长江中下游农业干旱遥感监测及植被敏感性分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(8): 1 245-1 256, 1 270.
YIN Guoying, ZHANG Hongyan, ZHANG Liangpei. Remote sensing monitoring of agricultural drought and vegetation sensitivity analysis in the middle and lower reaches of the Yangtze River from 2001 to 2019[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(8): 1 245-1 256, 1 270.
- [21] JAVED T, LI Y, RASHID S, et al. Performance and relationship of four different agricultural drought indices for drought monitoring in China's mainland using remote sensing data[J]. Science of the Total Environment, 2021, 759: 143 530.
- [22] TIAN Q, LU J Z, CHEN X L. A novel comprehensive agricultural drought index reflecting time lag of soil moisture to meteorology: A case study in the Yangtze River Basin, China[J]. Catena, 2022, 209: 105 804.
- [23] WU B F, MA Z H, YAN N N. Agricultural drought mitigating indices derived from the changes in drought characteristics[J]. Remote Sensing of Environment, 2020, 244: 111 813.
- [24] 贾元童, 崔骁勇, 刘月仙, 等. 内蒙古自治区干旱脆弱性评价[J]. 生态学报, 2020, 40(24): 9 070-9 082.
JIA Yuantong, CUI Xiaoyong, LIU Yuexian, et al. Drought vulnerability assessment in Inner Mongolia[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(24): 9 070-9 082.
- [25] 马梓策, 孙鹏, 姚蕊, 等. 内蒙古地区干旱时空变化特征及其对植被的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(6): 231-240.
MA Zice, SUN Peng, YAO Rui, et al. Temporal and spatial variation of drought and its impact on vegetation in Inner Mongolia[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(6): 231-240.

- [26] 汪士为. 近 20 年内蒙古干旱时空动态及其对气候、蒸散发变化的响应[J]. 水土保持研究, 2022, 29(4): 231-239.
WANG Shiwei. Spatial and temporal dynamics of drought in Inner Mongolia in recent 20 years and its response to seasonal climate and evapotranspiration[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(4): 231-239.
- [27] FOROOTAN E, KHAKI M, SCHUMACHER M, et al. Understanding the global hydrological droughts of 2003—2016 and their relationships with teleconnections[J]. Science of the Total Environment, 2019, 650: 2 587-2 604.
- [28] VAZIFEHKAH S, KAHYA E. Hydrological and agricultural droughts assessment in a semi-arid basin: Inspecting the teleconnections of climate indices on a catchment scale[J]. Agricultural Water Management, 2019, 217: 413-425.
- [29] 王佳瑞, 孙从建, 郑振婧, 等. 近 57 年来黄土高原干旱特征及其与大气环流的关系[J]. 生态学报, 2021, 41(13): 5 340-5 351.
WANG Jiarui, SUN Congjian, ZHENG Zhenjing, et al. Drought characteristics of the Loess Plateau in the past 60 years and its relationship with changes in atmospheric circulation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(13): 5 340-5 351.
- [30] ZHAO Shuixia, ZHOU Quancheng, WANG Wenjun, et al. Dry-wet climate characteristics of Inner Mongolia based on standardized precipitation index[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2022, 20(1): 10-19.
- [31] 张成福, 王雨晴, 闫冬, 等. 内蒙古荒漠草原区气候变化及干旱趋势分析[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(S2): 20-25.
ZHANG Chengfu, WANG Yuqing, YAN Dong, et al. Analysis of climate change and drought trend in desert steppe of Inner Mongolia[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(S2): 20-25.
- [32] 范磊, 吕爱锋, 张文翔. 青海省干旱时空特征及与大气环流响应关系[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(12): 60-65.
FAN Lei, LYU Aifeng, ZHANG Wenxiang. Temporal-spatial variation characteristics of drought and its relationship with atmospheric circulation in Qinghai Province[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(12): 60-65.
- [33] 路金强, 甘容, 杨峰, 等. 基于 SPEI 指数的河南省干旱特征及与环流指数的相关性分析[J]. 中国农村水利水电, 2022(4): 17-24.
LU Jinqiang, GAN Rong, YANG Feng, et al. Drought characteristics and its correlation with circulation index in Henan Province based on SPEI index[J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(4): 17-24.
- [34] KOGAN F N. Operational space technology for global vegetation assessment[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2001, 82(9): 1 949-1 964.
- [35] FATHI-TAPERASHT A, SHAFIZADEH-MOGHADAM H, MINAEI M, et al. Influence of drought duration and severity on drought recovery period for different land cover types: Evaluation using MODIS-based indices[J]. Ecological Indicators, 2022, 141: 109 146.
- [36] ZHANG A Z, JIA G S. Monitoring meteorological drought in semiarid regions using multi-sensor microwave remote sensing data[J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 134: 12-23.
- [37] 毛文静, 姜田亮, 栗晓玲. 黄河流域河流生态干旱指数构建及生态干旱演变规律[J]. 人民黄河, 2022, 44(10): 71-77.
MAO Wenjing, JIANG Tianliang, SU Xiaoling. Building of river ecological drought index and the evolution of ecological drought in Yellow River Basin[J]. Yellow River, 2022, 44(10): 71-77.
- [38] 王天, 涂新军, 周宗林, 等. 基于 CMIP6 的珠江流域未来干旱时空变化[J]. 农业工程学报, 2022, 38(11): 81-90.
WANG Tian, TU Xinjun, ZHOU Zonglin, et al. Spatiotemporal variation of future droughts in the Pearl River Basin using CMIP6[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(11): 81-90.
- [39] 涂义, 姜亮亮, 刘睿, 等. 1982—2015 年中国植被 NDVI 时空变化特征及其驱动分析[J]. 农业工程学报, 2021, 37(22): 75-84.
TU You, JIANG Liangliang, LIU Rui, et al. Spatiotemporal changes of vegetation NDVI and its driving forces in China during 1982—2015[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(22): 75-84.
- [40] 袁丽华, 蒋卫国, 申文明, 等. 2000—2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化[J]. 生态学报, 2013, 33(24): 7 798-7 806.
YUAN Lihua, JIANG Weiguo, SHEN Wenming, et al. The spatio-temporal variations of vegetation cover in the Yellow River Basin from 2000 to 2010[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(24): 7 798-7 806.
- [41] 陶然, 张珂. 基于 PDSI 的 1982—2015 年我国气象干旱特征及时空变化分析[J]. 水资源保护, 2020, 36(5): 50-56.
TAO Ran, ZHANG Ke. PDSI-based analysis of characteristics and spatiotemporal changes of meteorological drought in China from 1982 to 2015[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(5): 50-56.
- [42] HE J, YANG X H, LI Z, et al. Spatiotemporal variations of meteorological droughts in China during 1961—2014: An investigation based on multi-threshold identification[J]. International Journal of Disaster Risk Science, 2016, 7(1): 63-76.
- [43] 王晓峰, 张园, 冯晓明, 等. 基于游程理论和 Copula 函数的干旱特征分析及应用[J]. 农业工程学报, 2017, 33(10): 206-214.
WANG Xiaofeng, ZHANG Yuan, FENG Xiaoming, et al. Analysis and application of drought characteristics based on Run theory and Copula function[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(10): 206-214.
- [44] 来和鑫, 张泽中, 王飞, 等. 1960—2019 年中国流域尺度干旱时空演变特征研究[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(8): 122-129, 138.
LAI Hexin, ZHANG Zezhong, WANG Fei, et al. Spatiotemporal variation in catchment-scale droughts from 1960 to 2019 across China[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(8): 122-129, 138.
- [45] CHENG Q P, ZHONG F L, WANG P. Baseflow dynamics and multivariate analysis using bivariate and multiple wavelet coherence in an alpine endorheic river basin (Northwest China)[J]. Science of the Total Environment, 2021, 772: 145 013.
- [46] CRAUSBAY S D, RAMIREZ A R, CARTER S L, et al. Defining ecological drought for the twenty-first century[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2017, 98(12): 2 543-2 550.
- [47] QUIRING S M, GANESH S. Evaluating the utility of the Vegetation Condition Index (VCI) for monitoring meteorological drought in Texas[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(3): 330-339.
- [48] 李虹雨, 马龙, 刘廷玺, 等. 基于标准化降水指数的内蒙古地区干旱时空变化特征[J]. 水文, 2018, 38(5): 47-51, 90.
LI Hongyu, MA Long, LIU Tingxi, et al. Temporal and spatial variation characteristics of drought in Inner Mongolia based on standardized precipitation index[J]. Journal of China Hydrology, 2018, 38(5): 47-51, 90.
- [49] 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.
- [50] 曹永强, 李可欣, 任博, 等. 基于 SPEI 的辽宁省气象干旱特征及驱动因素分析[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(5): 28-36.
CAO Yongqiang, LI Kexin, REN Bo, et al. Characteristics and driving factors analysis of meteorological drought in Liaoning Province based on SPEI[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(5): 28-36.
- [51] 赵盼盼, 吕海深, 王春艳. ENSO 事件对渭河流域气象干旱和水文干旱的影响[J]. 水电能源科学, 2018, 36(8): 9-13.
ZHAO Panpan, LYU Haishen, WANG Chunyan. Impact of ENSO event on meteorological drought and hydrological drought in Weihe River Basin[J]. Water Resources and Power, 2018, 36(8): 9-13.
- [52] 白小娟, 赵景波. 厄尔尼诺/拉尼娜事件对内蒙古自治区气候的影响[J]. 水土保持通报, 2012, 32(6): 245-249.
BAI Xiaojuan, ZHAO Jingbo. Effects of El Nino/La Nina events on climate in Inner Mongolia autonomous region[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(6): 245-249.

t/hm² (Y1) and 20 t/hm² (Y2) of maize biochar. The control was irrigation with deionized water (CK). The concentration of the brackish water was 3 g/L. In each treatment, we measured the movement of water, salt and soil pH. **【Result】** Amending soil with biochar combined with brackish water irrigation improved soil infiltration capacity and water retention in the soil. The wheat straw biochar worked better in improving infiltration than the maize straw biochar. Biochar amendment combined with brackish water irrigation also facilitated salt leaching, reducing salt content in the soil by 7.3% to 10.44%, compared to the CK. Wheat straw biochar worked better in de-salinizing the soil than maize straw biochar, especially the X1 whose desalination rate was 53.74%. The addition of biochar combined with brackish water irrigation increased soil pH, albeit not significantly, especially the maize straw biochar in X2 which affects soil pH most. **【Conclusion】** Amending the soil with 10 t/hm² of wheat straw biochar combined with brackish water irrigation was effective to improve the quality of the saline soils in the Yellow River Delta region. Results of this study provide guidance to sustainably utilize brackish water and biochar to improve productivity of the saline-alkaline soils in Yellow River delta and areas with similar conditions.

Key words: brackish water mineralisation; biochar; moderately saline soils; water-salt distribution; pH

责任编辑：赵宇龙

(上接第 89 页)

Using Vegetation Health Index to Calculate Spatiotemporal Variation in Drought and Its Determinants in Inner Mongolia

YIN Hang^{1,2}, ZHANG Zezhong³, ZHANG Weijie^{1,2}, LAI Hexin^{3*}, WANG Fei³

(1. Institute of Water Resources of Pastoral Area, Hohhot 010018, China; 2. Yinshanbeilu Grassland Eco-hydrology National Observation and Research Station, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: 【Objective】 Drought is the most important abiotic stress affecting crop production in North China. Understanding its characteristics is essential to agricultural management. This paper is to investigate the spatiotemporal variation in drought from 1982 to 2020 and its underlying determinants in Inner Mongolia. **【Method】** The vegetation health index (VHI) measured from 1982 to 2020 was used to analyze the temporal and spatial characteristics of the drought. The cross-wavelet method was used to elucidate the effects of El Niño-Southern Oscillation (ENSO), Arctic Oscillation (AO), and sunspots on the drought. **【Result】** Drought in the studied region varied intra-annually, with the most severe droughts occurring in the summer. The main drought period is 8 years and 12 years. The central-northern region in Inner Mongolia experienced more severe droughts than other regions. Drought was more severe in the middle and northeast, while the south had seen a relief in drought. The region had witnessed a total eleven droughts in the studied period, with the most severe droughts occurring from October 1989 to March 1990. The worst and least severe droughts were in the 1980s and 2010s, respectively. Atmospheric circulation and sunspots correlated with the drought, with ENSO having the greatest influence and sunspots having the least impact on drought. **【Conclusion】** From 1982 to 2020, drought in Inner Mongolia had been worsening. ENSO influences drought most. These findings improve our understanding of the reasons behind the droughts and can help improve effective drought management in Inner Mongolia.

Key words: drought; vegetation health index; spatial-temporal evolution; driving force analysis; Inner Mongolia

责任编辑：白芳芳