doi:10.3969/j.issn.1671-3168.2025.06.013

塞罕坝地区植被净初级生产力对气象干旱的响应研究

易永力[1],张弈悟哲[1],盖宇函[1],谭国明[1],杨雷斌[1],李艳君[2]
(1.承德市气象局,河北 承德 067000; 2.承德护理职业学院,河北 承德 067000)

摘要:利用气象干旱综合指数和 MODIS 产品,辅以趋势分析、相关分析和 Morlet 小波分析等方法,研究 2000—2020 年塞罕坝地区植被净初级生产力(NPP)与气象干旱综合指数序列(MCI)的相关性,以及 1951—2023 年干旱强度的年际变化特征。结果表明,植被 NPP 以 6.830 5 gC/(m^2·a)的速率递增,趋势通过了 99%显著性检验。MCI 累加值与植被 NPP 呈正相关关系,年度 MCI 累加值与植被 NPP 的相关性最强,而生长期内的干旱对植被 NPP 的影响要远大于非生长期,NPP 的变化受干旱强度的影响较小,受较长时间干旱的影响较大。从年际曲线上看,MCI 累加值以 1.005 的年度倾向率上升,干旱强度降低趋势明显,并通过了 99%显著性检验,而通过 Morlet 小波分析发现,按照干旱时间周期推算,塞罕坝地区未来较长时间内还将处于偏干旱的气候背景下。

关键词:植被净初级生产力;气象干旱综合指数;Morlet 小波分析;塞罕坝地区

中图分类号:S718.556;S718.512.3 **文献标识码**:A **文章编号**:1671-3168(2025)06-0090-06

引文格式:易永力,张弈悟哲,盖宇函,等. 塞罕坝地区植被净初级生产力对气象干旱的响应研究[J]. 林业调查规划,2025,50(6):90-95,193. doi:10.3969/j.issn.1671-3168.2025.06.013

YI Yongli, ZHANG Yiwuzhe, GAI Yuhan, et al. Response of Vegetation Net Primary Productivity to Meteorological Drought in Saihanba Region[J]. Forest Inventory and Planning, 2025, 50(6): 90-95,193. doi:10.3969/j.issn.1671-3168.2025.06.013

Response of Vegetation Net Primary Productivity to Meteorological Drought in Saihanba Region

YI Yongli[1], ZHANG Yiwuzhe[1], GAI Yuhan[1], TAN Guoming[1], YANG Leibin[1], LI Yanjun[2]
(1. Chengde Meteorological Bureau, Chengde, Hebei 067000, China;
2. Chengde Nursing Vocational College, Chengde, Hebei 067000, China)

Abstract: Utilizing the meteorological drought composite index (MCI) and MODIS products, supplemented by methods such as trend analysis, correlation analysis, and Morlet wavelet analysis, this study analyzed the correlation between vegetation net primary productivity (NPP) and the MCI series from 2000 to 2020, as well as the interannual variation characteristics of drought intensity from 1951 to 2023 in the Saihanba region. The results showed that vegetation NPP increased at a rate of 6.830 5 gC/m^2·a, a trend that passed the significance test at the 99% confidence level. The accumulated MCI value was positively correlated with vegetation NPP, with the annual accumulated MCI value showing the strongest correlation. Drought during the growing season had a far greater impact on vegetation NPP than drought dur-

收稿日期:2024-07-26;**修回日期**:2024-08-15
第一作者:易永力(1984-),男,副高级工程师. 研究方向为气象专业服务. Email:191777293@qq.com
责任作者:李艳君(1984-),女,硕士,讲师. 研究方向为英语教育. Email:1227315681@qq.com

ing the non-growing season. Changes in NPP were less influenced by short-term drought intensity and more significantly affected by prolonged drought conditions. From the interannual curve, the accumulated MCI value trended upward at an annual rate of 1.005, indicating a significant decreasing trend in drought intensity, which passed the 99% significance test. However, Morlet wavelet analysis revealed that, based on the drought cycle projection, the Saihanba region was expected to remain in a relatively arid climatic background for an extended period in the future.

Key words: vegetation net primary productivity; meteorological drought composite index; Morlet wavelet analysis; Saihanba region

研究发现,自 19 世纪初以来,人类排放的大量温室气体已导致全球气候逐渐变暖,且未来 20 年全球升温将达到或超过 1.5℃[1-2]。森林是陆地生态系统的重要组成部分,其碳储蓄量约占陆地生态系统的一半,在调节气候、维持碳平衡、减缓 CO_2 浓度增长等方面具有至关重要的作用[3]。然而,植被在调节生态系统的同时,气候变化也同样是植被活动年际变化的重要影响因素[4],比如,干旱不仅会抑制光合作用,还能影响生态系统的自养呼吸和异养呼吸,从而削弱陆地生态系统生产力,导致碳固定能力下降,减弱碳汇功能,甚至把生态系统从碳汇改变成碳源[5]。

塞罕坝地区位于围场满族蒙古族自治县最北部,是三北防护林工程区的重要组成部分,是京津冀地区的重要生态屏障,能够有效阻挡北部沙地的南侵,但塞罕坝地区作为一个复杂的生态系统,其生态环境状况受干旱因素影响较大。植被净初级生产力(net primary productivity,NPP)作为陆地生态系统中物质与能量转换研究的基础,能反映植物在自然环境下的生产力[6],是在光合作用下产生的有机质总量(gross primary productivity,GPP)扣除自养呼吸(autotrophic respiration,RA)所消耗的部分有机质后剩余的部分[7]。较多研究认为,植被 NPP 变化的主要因素是气温和降水[8-9]。如赵苗苗等[10]研究发现,植被 NPP 与年平均降水存在显著正相关,而与气温存在负相关关系。气象干旱相对其他自然灾害,其影响范围广、持续时间长、发生频率高、灾害损失大,成为影响生态环境最严重的气象灾害之一[11]。ZHAO 等[12]发现,因为干旱等气候事件,导致过去数十年全球陆地植被 NPP 出现明显下降。此外,随着气候变暖和蒸发加剧,而降水量无有效增加甚至微弱减少,导致地区性暖干化趋势呈明显上升态势[13]。虽然有很多学者研究了不同环境因子对植被 NPP 的影响,但目前大部分的研究都着重于气候对植被 NPP 的影响,而通过气象干旱的规律和趋势分析植被 NPP 趋势的研究较少。气象干旱综合指数综合考虑了气温、降水、蒸发等各类气象因子,易于量化。研究基于卫星遥感数据和气象干旱综合指数数据,辅以趋势分析和相关分析法,探讨植被 NPP 对不同干旱强度和持续时间的响应,借助 Morlet 小波分析法,对干旱周期变化规律进行分析,达到对植被 NPP 影响分析预测的目的。这对塞罕坝地区生态系统碳循环等相关研究具有重要意义,为科学应对干旱对植被 NPP 造成的影响提供参考依据,为生态环境保护提供科学支撑。

1 研究区概况

研究区位于围场满族蒙古族自治县最北部,地理位置为 116.78°~117.65°E,42.06°~42.60°N,地形分坝上、坝下两部分,北部为坝上地区,中部和南部属坝下地区[14]。坝上是内蒙古高原南缘,以丘陵、曼甸为主,土壤类型主要为风沙土,伴随有草甸土和沼泽土,海拔 1 500~1 940 m;坝下是阴山山脉与大兴安岭余脉交汇处,典型的山地地形,土壤类型以棕壤和灰色森林土为主,海拔 1 010~1 500 m[15]。该地区属寒温带大陆季风气候,年均蒸发量 1 438.5 mm,年均降水量 462.8 mm,年均日照时数 2 664.7 h,年均温 5.5℃。境内有省属大型国有林场塞罕坝机械林场,其为中国面积最大的人工林林场,总面积 926.347 km^2,是典型的人工森林地带[16]。塞罕坝地区植被种类丰富,由针叶林、阔叶林、灌丛、草丛、草甸和沼生植被组成,主要树种有落叶松(*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv.)、白桦(*Betula platyphylla* Suk.)、云杉(*Picea asperata* Mast.)等[17],森林覆盖率超过 80%。该地区植被生长期为每年的 5—9 月[18]。

2 数据与方法

2.1 数据来源和预处理

气象数据来源于围场满族蒙古族自治县国家基

本气象站1951—2023年整编日资料,主要包括逐日降水、气温、蒸发量、湿度等,数据起始时间:1951年01月01日至2023年12月31日(不含2月29日)。

植被NPP数据源于MOD17A3数据集,时间分辨率为1 d,空间分辨率为500 m,经合成得到塞罕坝地区2000—2020年逐年植被NPP数据。

2.2 研究方法

2.2.1 植被净初级生产力

植被NPP基于陆地生态系统碳通量(terrestrial eco-system carbon budget,TEC)模型计算,计算公式为:

$$NPP_{ij} = GPP_{ij} - R_{ij} \tag{1}$$

$$GPP_{ij} = \varepsilon_{ij} \times FPAR \times PAR_{ij} \tag{2}$$

$$NPP_i = \sum_{j=1}^{n} NPP_{ij} \tag{3}$$

式中:NPP_{ij}、GPP_{ij}、R_{ij}($gC \cdot m^{-2}$)分别为第i年第j月的植被净初级生产力、总初级生产力、呼吸消耗量;ε_{ij}($gC \cdot MJ^{-1}$)为第i年第j月的光能实际利用率,反映温度、水分等因子对光合作用的影响;FPAR为植被吸收光合有效辐射比例;PAR_{ij}($MJ \cdot m^{-2}$)为第i年第j月的入射光合有效辐射;NPP_i($gC \cdot m^{-2}$)为第i年植被净初级生产力;n为一年总月份数,$n=12$[19]。

2.2.2 气象干旱综合指数

气象干旱综合指数(MCI)是2017年国家气候中心在CI指标的基础上进行的修订,引进了标准化权重降水指数$SPIW_{60}$,考虑了更长时间降水的影响(150 d标准化降水指数SPI_{150}),引进了季节调节系数Ka,根据不同区域和不同季节对经验系数进行调整,解决了降水过程反应太灵敏和重大干旱过程反映偏轻两个问题[20-21]。

根据国标《气象干旱等级》计算2000—2020年逐日MCI值:

$$MCI = Ka \times (a \times SPIW_{60} + b \times MI_{30} + c \times SPI_{90} + d \times SPI_{150}) \tag{4}$$

式中:a、b、c、d为权重系数,北方冬、春季一般取0.2、0.2、0.3、0.4,夏、秋季一般取0.3、0.4、0.3、0.2(按照天文学作为四季划分标准,3—5月为春季,6—8月为夏季,9—11月为秋季,12—次年2月为冬季[22-24]);$SPIW_{60}$为近60 d标准化权重降水指数;MI_{30}为近30 d相对湿润度指数;SPI_{90}、SPI_{150}分别为近90 d和150 d的标准化降水指数。

MCI干旱等级分级情况如表1所示。

表1 气象干旱综合指数等级划分

Tab.1 Classification of meteorological drought composite index levels

等级	类型	MCI
1	无旱	-0.5<MCI
2	轻旱	-1.0<MCI≤-0.5
3	中旱	-1.5<MCI≤-1.0
4	重旱	-2.0<MCI≤-1.5
5	特旱	MCI≤-2.0

根据MCI等级划分标准和MCI值可以判断当日干旱强度,干旱等级分为5级,分别对应无旱、轻旱、中旱、重旱和特旱,当日MCI值≤-0.5时,则确定出现轻旱及以上的干旱。某时间段内的干旱强度以该时间段内轻旱及以上等级干旱的日MCI累加值来表示,当某时间段内的MCI累加值越小,干旱强度就越强,反之干旱强度就越弱[25]。

2.2.3 趋势分析

采用Theil-Sen Median趋势分析塞罕坝地区植被NPP和MCI累加值年际变化趋势。使用Mann-Kendall法检验判断植被NPP和MCI累加值年际变化趋势的显著性,具体方法参考文献[26-28]。

2.2.4 相关性分析

植被NPP与各干旱因子相关性采用Pearson相关分析,利用t检验对相关系数的显著性进行检验[29],计算公式为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}} \tag{5}$$

式中:r为Pearson相关系数;x、y分别为第1个、第2个变量的数值;$\bar{x}$、$\bar{y}$为变量的算术平均值。

2.2.5 Morlet小波分析

采用Morlet小波方差图对MCI周期变化规律进行分析,以揭示塞罕坝地区干旱周期性特征[30]。

3 结果分析

3.1 塞罕坝地区植被NPP年际变化特征

从近20 a塞罕坝地区植被NPP年际曲线看,年度植被NPP最低值为494 gC/m^2,出现在2000年;年度NPP植被最高值为735 gC/m^2,出现在2015年。2002—2005年、2009—2012年、2014—2015年植被NPP呈明显上升趋势,其中2000—2001年增

长最多,达到 150 gC/m^2,较前一年增长 30.4%;2002、2007、2009、2014、2019 年出现 5 次较低的谷值,其中 2001—2002 年降低最多,为 131 gC/m^2,较前一年降低 20.4%。植被 NPP 增长的 10 a 里,年均增幅为 14.4%,植被 NPP 降低的 10 a 里,年均降幅为 9.1%。通过计算得出,植被 NPP 以 6.830 5 gC/(m^2·a)的速率递增,并通过了 99%显著性检验,植被 NPP 上升趋势明显,但是波动幅度较大,较易受到自然因素的影响[31](图 1)。

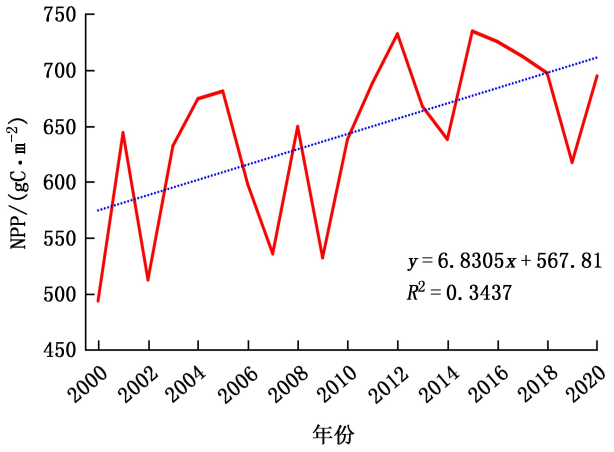

图 1　2000—2020 年植被 NPP 年际曲线

Fig. 1　Interannual variation of vegetation from 2000 to 2020

3.2 植被 NPP 与气象干旱综合指数的相关性

通过计算,得出 2000—2020 年每日 MCI 值,当日 MCI 值≤-0.5,按照不同的统计要求进行累加,统计出最长持续时间干旱、不同干旱强度、不同时间周期等干旱因子的 MCI 累加值,分别与植被 NPP 计算相关性(表 2)。

表 2　各类干旱因子与植被 NPP 的相关性分析

Tab. 2　Correlation analysis between various drought factors and vegetation NPP

干旱因子	生长期	非生长期	全年
MCI 累加值	0.737 **	0.511 *	0.779 **
连续干旱 MCI 累加值	0.753 **		0.729 **
轻旱 MCI 累加值	0.642 **		0.667 **
中旱 MCI 累加值	0.474 *		0.523 *
重旱 MCI 累加值			0.412
特旱 MCI 累加值			0.472 *

注:** 相关性在 0.01 层上显著(双尾);* 相关性在 0.05 层上显著(双尾)。

分析结果显示,所有的因子与植被 NPP 的相关性均为正相关,相关系数值为 0.412~0.779,除一项因子外均通过了 0.01 或 0.05 显著性检验。生长期内的干旱对植被 NPP 的影响要大于非生长期,植被 NPP 的变化对干旱的强度不是十分敏感,反而容易受较长时间干旱的影响,所以当生长期内出现较长时间的干旱,会对植被 NPP 造成较大影响。

对比 2000—2020 年 MCI 年度累加值和植被 NPP 年际曲线可以发现,两者的变化趋势一致,即 MCI 年度累加值降低,植被 NPP 降低,反之植被 NPP 增长。植被 NPP 出现的几次谷值均发生在 MCI 年度累加值较低的年份,且当 MCI 年度累加值较前一年降低时,当年植被 NPP 会出现明显下降趋势(图 2)。

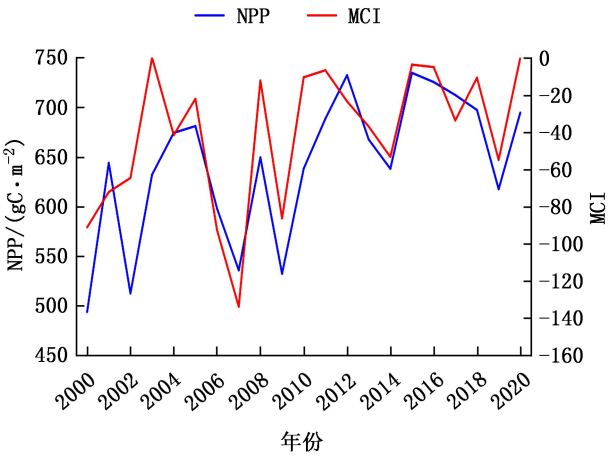

图 2　2000—2020 年 MCI 年度累加值和植被 NPP 年际曲线

Fig. 2　Interannual curves of annual accumulated MCI and vegetation NPP from 2000 to 2020

3.3 近 70 a 干旱指数年际变化特征

对塞罕坝地区干旱强度的年际变化进行分析可知,近 70 a 塞罕坝地区 MCI 年度累加值呈波动上升趋势,年度倾向率为 1.005,干旱强度呈降低趋势;年度植被生长期内 MCI 累加值呈波动上升趋势,年度倾向率为 0.341,干旱强度呈降低趋势。年度植被生长期内的 MCI 累加值占全年的 62.5%,且干旱主要集中在春、秋两季(图 3)。

MCI 年度累加值的 UB、UF 曲线相交于 1991 年,且交点在置信区间内,UF 曲线于 2014 年通过 0.01 水平的临界线,年度干旱强度减弱的突变通过信度为 0.01 的显著性检验。2005—2007 年 UF 曲线有小幅下降,年度干旱强度在该阶段有所加强,2021—2023 年 UF 曲线下降幅度较大,年度干旱强度在该阶段有更加明显的加强(图 4)。

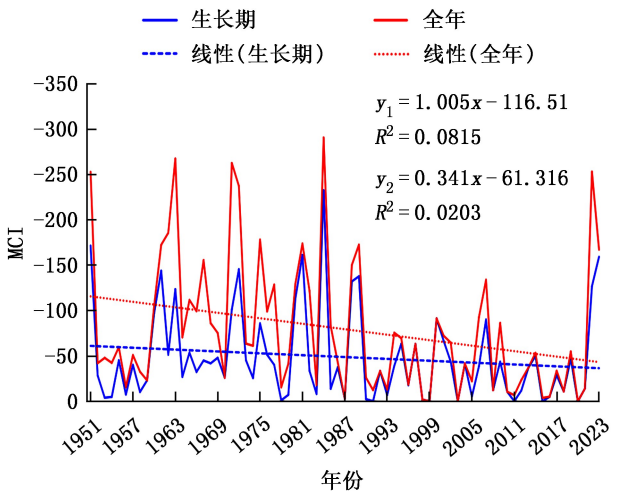

图 3　1951—2023 年 MCI 累加值年际变化

Fig. 3　Interannual variation of accumulated MCI values from 1951 to 2021

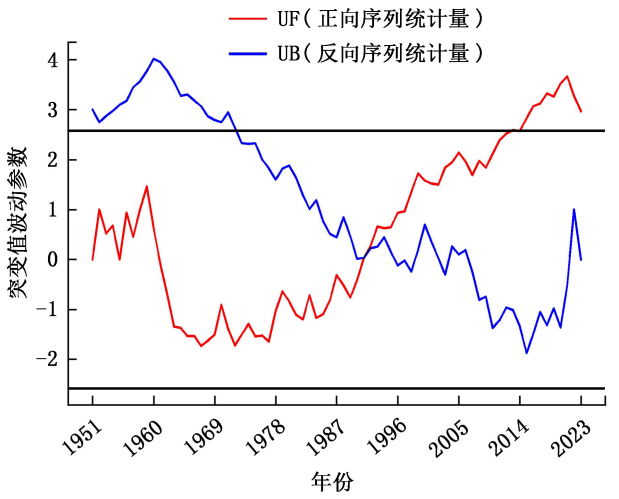

图 4　1951—2023 年 MCI 年度累加值突变检验

Fig. 4　Abrupt change test of the annual accumulated MCI values from 1951 to 2023

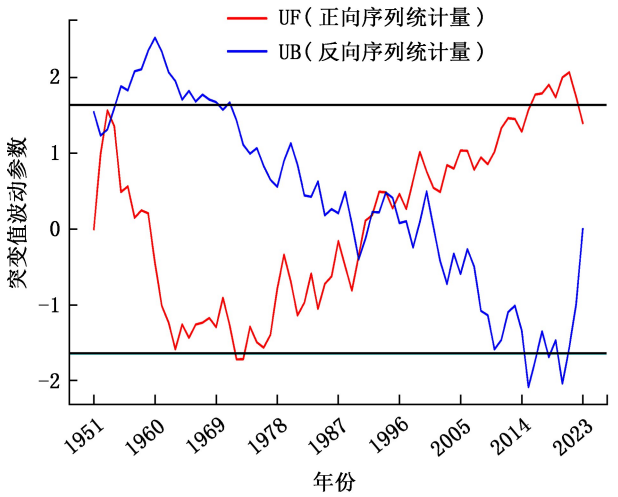

图 5　1951—2023 年植被生长期内 MCI 累加值突变检验

Fig. 5　Abrupt change test of the accumulated MCI values during the vegetation growing season from 1951 to 2023

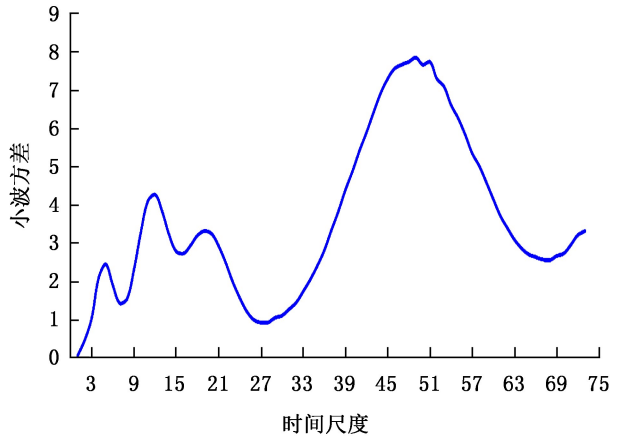

图 6　年度干旱强度小波方差

Fig. 6　Wavelet variance of annual drought intensity

年度植被生长期内 MCI 累加值的 UB、UF 曲线相交于 1990 年，且交点在置信区间内，UF 曲线于 2016 年通过 0.1 水平的临界线，植被生长期内干旱强度减弱的突变通过信度为 0.1 的显著性检验。1999—2002 年和 2021—2023 年 UF 曲线下降幅度较大，植被生长期内干旱强度在该阶段有更加明显的加强(图 5)。

年度干旱强度小波方差有 4 个峰值，表明其存在 4 个周期。其中第一主周期对应时间尺度为 49 a，说明该地区年度干旱强度 49 a 左右的周期振荡最强，第二、三、四主周期依次为 12 a、19 a 和 5 a(图 6)。

年度干旱强度在第一和第二主周期时间尺度下的小波系数变化曲线见图 7。

对图 7 分析可知，年度干旱强度在 49 a 尺度周期上分别经历了两次波峰(1954 年和 2004 年)和一次波谷(1977 年)，按照干旱周期推算，预计到 2026 年左右，塞罕坝地区干旱强度会达到最强，之后干旱强度会逐渐减弱，但是在 21 世纪中叶前，该地区还将维持在波谷周期内，属于干旱强度较强阶段。年度干旱强度在 12 a 尺度周期上则分别经历了 6 次波峰和 7 次波谷，分析这几次波峰和波谷的时间规律，预计到 2025 年之前，该地区干旱强度仍会保持最强状态，之后的一个 12 a 周期内，干旱强度会逐渐减弱，这也与 49 a 尺度周期上的分析结果相对应。

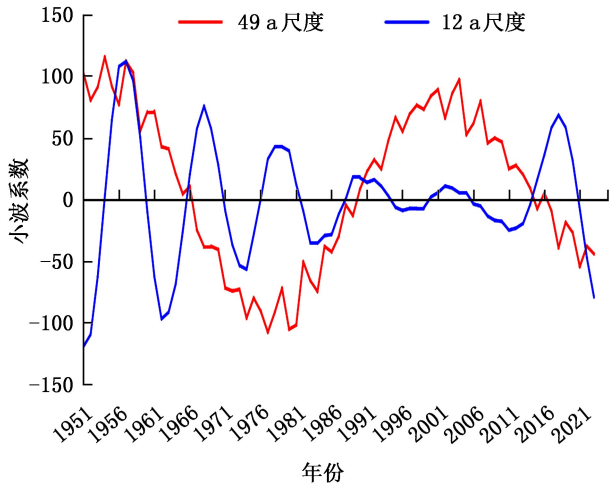

图 7　年度干旱强度小波系数变化曲线

Fig. 7　Variation curve of the wavelet coefficients for annual drought intensity

4 讨论与结论

利用气象干旱综合指数和 MODIS 产品,分析了 2000—2020 年塞罕坝地区植被 NPP 与气象干旱综合指数的相关性,以及 1951—2023 年气象干旱综合指数近 70 a 的年际变化特征。

植被 NPP 以 6.830 5 gC/(m^2·a)的速率逐年递增,趋势通过了 99%显著性检验,植被 NPP 上升趋势明显但波动幅度较大,较易受到自然因素的影响。

气象干旱综合指数与植被 NPP 为正相关关系,两者的变化趋势一致,即 MCI 累加值降低,植被 NPP 降低,反之植被 NPP 增长。年度 MCI 累加值与植被 NPP 的相关性最强,而生长期内的干旱对植被 NPP 的影响要远大于非生长期,NPP 的变化受干旱强度的影响较小,受较长时间干旱的影响较大,所以生长期内出现较长时间的干旱会对植被 NPP 造成较大影响。

从年际曲线上看,MCI 年度累加值以 1.005 的年度倾向率上升,干旱强度降低趋势明显,并通过了 99%显著性检验。通过 Morlet 小波分析发现,按照干旱时间周期推算,预计到 2026 年左右,塞罕坝地区干旱强度会达到最强,之后干旱强度会逐渐减弱,但是在 21 世纪中叶前,该地区还将维持在波谷周期内,属于干旱强度较强阶段。所以未来该地区较长时间内仍将处于偏干旱的气候背景下,建议未来塞罕坝地区要因地制宜地实施抗旱工作,在植被生长期抓住有利天气过程,及时实施人工增雨作业,防止形成长期持续的干旱,对植被造成重大损害。

参考文献:

[1] 周波涛. 全球气候变暖:浅谈从 AR5 到 AR6 的认知进展[J]. 大气科学学报,2021,44(5):667-671.

[2] 郭咏琪,孟晗,邓代兰,等. 气候变暖对微囊藻的生长、代谢及机制研究进展[J]. 环境生态学,2023,5(7):79-86.

[3] 朴世龙,张新平,陈安平,等. 极端气候事件对陆地生态系统碳循环的影响[J]. 中国科学:地球科学,2019,49(9):1321-1334.

[4] 王连喜,李萌萌,李琪,等. 基于 CASA 模型的陕西省 NPP 遥感估算[J]. 西部林业科学,2022,44(2):74-79.

[5] 田汉勤,徐小锋,宋霞. 干旱对陆地生态系统生产力的影响[J]. 植物生态学报,2007,31(2):231-241.

[6] 李登科,王钊. 基于 MOD17A3 的中国陆地植被 NPP 变化特征分析[J]. 生态环境学报,2018,27(3):397-405.

[7] 谷雷,岳彩荣,张国飞,等. 基于 Google Earth Engine 平台的大湄公河次区域 2001—2019 年植被 NPP 时空变化分析[J]. 西部林业科学,2021,50(2):132-139.

[8] 王飞,王宗敏,杨海波,等. 基于 SPEI 的黄河流域干旱时空格局研究[J]. 中国科学:地球科学,2018,48(9):1169-1183.

[9] 杨艳,周德成,宫兆宁,等. 基于植被生产力的黄土高原地区生态脆弱性及其控制因子分析[J]. 生态环境学报,2022,31(10):1951-1958.

[10] 赵苗苗,刘熠,杨吉林,等. 基于 HASM 的中国植被 NPP 时空变化特征及其与气候的关系[J]. 生态环境学报,2019,28(2):215-255.

[11] 姚玉璧,张强,李耀辉,等. 干旱灾害风险评估技术及其科学问题与展望[J]. 资源科学,2013,35(9):1884-1897.

[12] ZHAO M,RUNNING S W. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009[J]. Science,2010(329):940-943.

[13] PIAO S,FANG J,ZHOU L,et al. Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetation[J]. Global Change Biology,2006,12(4):672-685.

[14] 周红敏,张国东,王昶景,等. 塞罕坝地区高空间分辨率叶面积指数时序估算与变化检测[J]. 遥感学报,2021,25(4):1000-1012.

[15] 韩阳媚,王锦,于世涛,等. 塞罕坝地区生态网络构建及优化[J]. 干旱区资源与环境, 2023,37(5):112-121.

[16] 王晓红,阳丽虹,马明浩,等. 塞罕坝机械林场生态环境质量评价[J]. 华北理工大学学报(自然科学版),2023,45(3):11-18.

[17] 杨焕金,彭博,范慧涛,等. 不同林分类型叶面积指数与地形因子相关性研究[J]. 河北林业科技,2018(3):1-6.

(下转第 193 页)

[14] 崔志华,杨昕雨. 基于 GIS 的南京市中山陵景区核心区域声景观评价[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2019,43(2):121-127.
[15] 陈鹏,元丽娇. 基于分形理论的城市空间结构及其影响因素研究——以贵阳市为例[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版),2024,37(1):88-96.
[16] 刘慧民,宫思羽,邹铁安,等. 基于 GIS 技术规划城市节水型绿地系统的研究[J]. 农业工程学报,2019,35(6):287-295.
[17] 严军,王飞,蔡安哲,等. 基于分形理论的城市滨水景观天际线量化分析——以南京玄武湖东岸为例[J]. 现代城市研究,2017(11):45-50.
[18] 肖卓. 基于分形几何学的地景建筑空间设计策略研究[D]. 长沙:湖南大学,2016.
[19] 谭玮颐,周忠发,殷超,等. 基于分形理论的喀斯特地区土地利用结构研究——以贵州省平坝区为例[J]. 科技通报, 2019,35(4):45-51,81.
[20] 郁献军,过伟敏,贡雪. 基于分形理论的现代景观雕塑及其空间维度研究[J]. 艺术百家,2018,34(3):239-242,252.
[21] 于婧,陈艳红,彭婕,等. 基于 GIS 和 Fragstats 的土地生态质量综合评价研究——以湖北省仙桃市为例[J]. 生态学报,2020,40(9):2932-2943.
[22] 苏年. 基于分形理论的观光茶园景观规划设计研究——以广西龙胜福摩海茶园为例[D]. 桂林:桂林理工大学,2018.
[23] 张琦,夏继红,汪颖俊,等. 基于分形维数的中小河流滩地沉积物空间分布研究[J]. 水土保持研究,2019,26(2):370-373,380.
[24] 卢遥,张继贤,韩文立,等. 一种基于分形的地表覆盖产品质量评估空间抽样方法[J]. 测绘科学,2023,48(8):144-152,162.

责任编辑:许易琦

(上接第 95 页)

[18] 何可宜,沈亚文,冯继广,等. 植物残体输入改变对樟子松人工林土壤呼吸及其温度敏感性的影响[J]. 北京大学学报(自然科学版),2021,57(2):361-370.
[19] 陈燕丽,唐梅蓉,张会,等. 广西喀斯特地区植被覆盖度和净初级生产力对 SPEI 干旱指数的响应差异[J]. 干旱气象,2022,40(6):1042-1050.
[20] 中国气象局. 气象干旱等级:GB/T 20481—2017[S]. 北京:中国标准出版社,2017.
[21] 武荣盛,侯琼,杨玉辉,等. 多时间尺度气象干旱指数在内蒙古典型草原的适应性研究[J]. 干旱气象,2021,39(2):177-184.
[22] 易永力,翟卫东,王朋朋,等. 潘家口水库上游区域气候变化及对水库运行的影响[J]. 河北水利,2018(11):27-28.
[23] 张林林,陈铁喜. 1989—2018 年京津冀地区人体舒适度的变化特征[J]. 天津师范大学学报(自然科学版),2021,41(4):53-60.
[24] 苗正伟,徐利岗,路梅. 基于 SPEI 指数的京津冀地区干旱特征分析[J]. 人民黄河, 2018,40(7):51-62.
[25] 吴秀兰,段春锋,玛依拉·买买提艾力,等. 基于 MCI 的新疆近 60 a 干旱时空特征分析[J]. 干旱区研究,2022,39(1):75-83.
[26] 王小红,刘宪锋,孙高鹏,等. 2001—2020 年秦巴山区植被生产力对干旱的响应[J]. 应用生态学报,2022,33(8):2105-2112.
[27] 王耀斌,赵永华,韩磊,等. 2000—2015 年秦巴山区植被净初级生产力时空变化及其驱动因子[J]. 应用生态学报,2018,29(7):2373-2381.
[28] 王朋朋,薛思嘉,易永力,等. 潘家口水库上游面雨量气候特征及入库水量预测模型探究[J]. 海河水利,2021(4):39-44.
[29] 洪乐乐,沈艳,马红彬,等. 2000—2019 年宁夏植被净初级生产力时空变化及其驱动因素[J]. 应用生态学报,2022,33(10):2769-2776.
[30] 李梦婷,李春光. 1961—2020 年黄土高原地区气象干旱时空演变特征研究[J]. 人民珠江,2023,44(11):1-10.
[31] 张茹,宋孝斌,张继勋. 黄河流域植被净初级生产力对干旱和蒸散发的响应[J]. 水利水电技术(中英文),2022,53(9):57-69.

责任编辑:杨焌焓