The Impact of Composite Dry Heat Events on Vegetation in Inner Mongolia

Cha Ersi[1,2,3,4], Ying Guo[1,2,3], Yi Bole[1,2,3,4], Sicheng Wei[1,2,3,4], Ziyuan Zhou[1,2,3,4],

Jiquan Zhang[1,2,3,4,*]

1 School of Environment, Northeast Normal University, Changchun 130024, China

2 Key Laboratory for Vegetation Ecology, Ministry of Education, Changchun 130024, China

3 State Environmental Protection Key Laboratory of Wetland Ecology and Vegetation Restoration, Changchun 130024, China

4 Jilin Province Science and Technology Innovation Center of Agro-Meteorological Disaster Risk Assessment and Prevention, Northeast Normal University, Changchun 130024, China

**Correspondence: zhangjq022@nenu.edu.cn; Tel.: +86-135-9608-6467*

ABSTRACT

In recent years, extreme climate events have occurred frequently, and extreme compound events often pose greater threats to ecosystems than single disasters. This study analyzed the impact of compound dry heat events in Inner Mongolia from 1982 to 2020 on vegetation, as well as the impact of drought events on vegetation phenology. This study constructed the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) and Composite Dry Heat Index (CDHI), and explored the effects of dry heat events and drought events on vegetation and vegetation phenology in Inner Mongolia, as well as the contributions of teleconnection factors. The results indicate that: (1) Dry heat events have a significant negative impact on grasslands, especially more fragile desert grasslands and typical grasslands, and have a certain positive effect on forests. Grasslands respond more quickly to compound dry heat events. The impact of Pacific Decadal Oscillation (PDO) on the relationship between dry heat events and vegetation is most significant. The results of this study provide a foundation for improving disaster warning systems, developing targeted mitigation strategies, and protecting fragile ecosystems.

Key words: *Composite Event, NDVI, WTC, Inner Mongolia*

复合干热事件对内蒙古植被的影响

查尔斯 [1,2,3,4], 郭莹 [1,2,3,4], 伊博乐 [1,2,3,4], 魏思成 [1,2,3,4], 周子媛 [1,2,3,4],

张继权 [1,2,3,4,*]

1.东北师范大学环境学院，吉林长春 130024

2 植被生态学教育部重点实验室，吉林长春 130024

© The Author(s) 2025

S. Qiao et al. (eds.), *Proceedings of the 11th Annual Meeting of Risk Analysis Council of China Association for Disaster Prevention (RAC 2024)*, Advances in Economics, Business and Management Research 367,
https://doi.org/10.2991/978-94-6463-946-9_29

3.湿地生态与植被恢复国家环境保护重点实验室，长春 130024

4.东北师范大学吉林省农业气象灾害风险评估与防范科技创新中心，长春 130024

**通讯作者邮箱：zhangjq022@nenu.edu.cn; Tel.: +86-135-9608-6467*

摘要

近年来极端气候事件频繁发生，而极端复合事件往往比单一灾害对生态系统具有更大的威胁。本研究分析了 1982 年至 2020 年内蒙古复合干热事件对植被的影响还分析了干旱事件对植被物候的影响。本研究构建了标准化降水蒸散指数（SPEI）复合干热指数（CDHI），并分别探讨了干热事件和干旱事件对内蒙古植被以及植被物候的影响，以及遥相关因素的贡献。结果表明：（1）干热事件对草原，特别是更脆弱的荒漠草原和典型草原的具有显著的负面影响，对森林具有一定的积极作用，草原对复合干热事件的反应更迅速。太平洋年代际振荡（PDO）对干热事件与植被关系的影响最为显著。本研究的结果为提高灾害预警系统、制定有针对性的减缓策略、保护脆弱生态系统提供了基础。

关键字：*复合事件，NDVI，WTC，内蒙古*

1.引言

气候变化是 21 世纪全球面临的重大挑战，其极端事件对自然生态系统构成严重威胁。IPCC 第六次评估报告显示，2011-2020 年间，全球平均地表温度较工业化前水平上升了 1.09°C，预计未来气候变暖将持续加剧。极端气候事件，如热浪、干旱和寒潮，通过影响水汽循环、土壤呼吸及植被生产力，显著干扰碳循环，对农业、生态及经济系统造成深远影响[1-3]。

在极端事件中，热浪不仅威胁水文平衡和植被生长，还破坏了区域的碳水循环。同时，干旱导致的水分胁迫抑制了植物光合作用，甚至引发植被死亡，削弱了碳吸收能力，对农业生产和自然生态系统构成重大挑战。值得注意的是，极端复合事件，如干热事件相较于单一灾害，往往造成更大的破坏和损失。近年来，全球范围内极端复合事件频发，引发了学者们的广泛关注。为了有效量化这些事件，研究者们开发了多种指数，如标准化干热指数（SDHI）和标准化复合事件指标（SCEI）[4,5]，以及基于降水（SPI）、潜在蒸散发（SPEI）和土壤湿度（SSMI）的干旱指标，用于评估复合事件的干旱程度。其中，SPEI 和 SSMI 因能更全面地反映干旱对植被的直接影响而备受青睐。

内蒙古地区作为生态脆弱区，频繁遭受极端气候事件的侵袭。历史上，该区域多次遭受旱灾、高温和低温冷害的叠加影响，导致农牧业严重受损，自然生态和经济发展遭受重创。因此，量化内蒙古地区的极端复合事件，并探究其对植被的影响机制，具有重要的实际意义。本研究拟采用 SPEI 和 SSMI 作为干旱指标，结合高温或低温指标（STI），构建基于气象和土壤的复合干热和干冷指数，以对比分析其特征。同时，利用归一化植被指数（NDVI）作为植被状况的表征，研究不同复合事件对内蒙古地区植被的影响。此外，本研究还将运用小波相干性分析（WTC）和部分小波相干分析（PWC），探讨厄尔尼诺~南方涛动（ENSO）、太平洋十年振荡（PDO）及太阳黑子（Sunspot）等遥相关因素对复合事件与植被关系的影响，以期揭示大气环流和太阳活动在极端复合事件中的贡献。

综上所述，本研究旨在深入理解内蒙古地区极端复合事件对植被的复杂影响机制，以及大气环流和太阳活动的潜在作用，为复合灾害的预防和生态系统恢复提供科学依据。通过这一研究，期望能够为内蒙古地区的可持续发展和生态环境保护贡献一份力量。

2.研究区与方法

2.1 研究区

内蒙古位处中国北部边疆，位于 7°12′-126°04′E 和 37°24′-53°23′N，是欧亚大陆草原的重要组成部分，天然草原面积 88 万平方公里,草原面积占全国草原总面积的 22%,占全区国土面积的 74%。该地区的降水量从东北向西南减少，年平均气温从东北向西南方增加。按照降雨量和温度的梯度变化，植被类型沿东北—西南一线依次为森林、草原和荒漠。且大部分植被地处干旱、半干旱农牧交错带地区，生态环境脆弱。受温带大陆性气候、温带季风气候影响，雨季较集中且分布不均匀，春秋较干旱，冷热变化剧烈。根据中

国气象灾害年鉴记录，内蒙古地区极易受干旱和极端高温复合灾害影响。

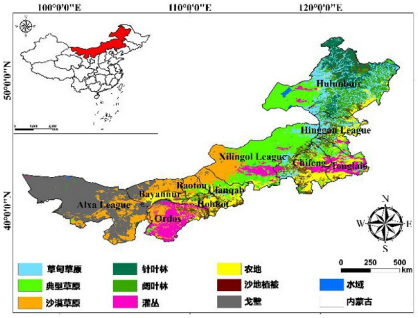

图 1 研究区概况

2.2 数据来源

本研究使用了 1982 年到 2020 年的气象站点数据并使用薄板样条技术插值。植被指数使用了 1982 年到 2015 年的 GIMMS NDVI 和 2000 年到 2020 年的 MODIS NDVI，并使用线性回归技术扩展了 GIMMS NDVI。遥相关数据使用了来自国家海洋和大气管理局（NOAA）的 ENSO 和 PDO 的月度数据，月度的太阳黑子数据来自太阳影响数据分析中心（SIDC）。

2.3 研究方法

2.3.1 基于彭曼方程的潜在蒸散发

本研究中的潜在蒸散发（PET）是使用联合国粮食及农业组织（FAO）推荐的 Penman-Monteith 方程计算得到，该方法使用包括气温、辐射、气压、风速等多个指标进行计算的物理过程，具有更高的准确性[6]。具体数学过程如下：

$$PET = \frac{0.408\Delta(R_n-G)+r\frac{900}{T+237}U_2(e_s-e_a)}{\Delta+r(1+0.3U_2)} \quad (1)$$

其中，Rn 表示地表净辐射，G 表示土壤热通量；T 表示 2 米高的平均温度；U2 表示 2 米高的风速；es 表示饱和蒸气压；ea 表示实际蒸气压;，Δ表示饱和蒸气压曲线的斜率；r 代表湿度计常数

2.3.2 复合干热指数 CDHI 的构建

将本研究综合考虑降水、潜在蒸散发以及土壤湿度对干旱的影响，基于降水（P）与潜在蒸散发（PET）的差值（P-PET, 记为 PPET）与最高气温 TMAX 作为联合分布变量。分别将 PPET 和 TMAX 表示为变量 X 和 Y，以建立基于气象干旱的复合干热指数（CDHI），则变量 X 和 Y 的联合分布可表示为：

$$P(X\le x, Y\le y)=p \quad (2)$$

其中，p 表示变量 X（PPET）和变量 Y（TMAX）的联合概率分布。本研究根据非参数化联合分布概念，基于经验二元联合概率可通过[7]提出的位置划分公式估计：

$$P(x_k,\ y_k)=\frac{m_k-0.44}{n+0.12} \quad (3)$$

其中，n 表示观测值的个数，mk 是(x_k，y_k)中满足条件 xi≤xk 与 yi≤yk（1≤i≤n）的事件个数。因此，通过推导联合概率分布后，CDHI 可基于联合概率分布 p 定义为：

$$CDHI_PPET=\emptyset\text{^}(-1)(p) \quad (4)$$

其中，∅表示标准正太分布函数。因此，与 SPEI 类似，CDHI 可以实现不同时间尺度上表征干热事件。为充分考虑到干热和干冷事件的累积效应，在本研究中，我们计算了所有 1 月到 12 月尺度的复合干热指数。SPEI 和 STI 的构建是通过使用单变量形式[7]位置划分公式的经验方法推导边缘概率从而计算得到：

$$P(x_i)=(i-0.44)/(n+0.12) \quad (5)$$

其中：n 表示样本数；i 表示观测值变量从最小值开始到其自身值的排序。构建复合指数时基于同样的这个方法拟合变量的边缘分布。由于 PPE 分布的低值为干旱，构建干热指数时，对 TEM_{MAX} 的边际概率分布做了逆分布处理，即 1-P（TEM_{MAX}）。此处理用以匹配低值为高温，使构建的干热指数低值识别为干。本研究对各类复合干热等级的划分参考[8]采用的统一标准（表 1）。

表 1 CDHI 等级分类

干热（或干冷）类型	标准化指数
无干热事件	-0.79～-0.5
轻度干热事件	-1.29～-0.8
中度干热事件	-1.59～-1.3
重度干热事件	-1.99～-1.6
特重干热事件	≤ -2.0

本研究中，基于气象干旱指标、土壤干旱指标分布和最高温，我们最终获得了 1982 年到 2020 年逐月的 1 到 12 个月尺度的 CDHI。

2.3.3 分离趋势和季节项的突变点方法

分离趋势和季节项的突变点方法（BFAST）方法最初由 Verbeselt 设计，用于检测时间序列中的干扰[9]。目前，BFAST 算法在气象学、气候学、经济发展和

植被动力学中得到了广泛的应用。它使用适合分段线性趋势的参数和季节趋势模。与传统的年际线性回归相比，BFAST 可以表达更多的趋势细节并检测突变断点。公式定义如下：

$$CDHI_t=Trend_t+Seasonal_t+Remainder_t, t=1,2,3\ldots n \quad (6)$$

$$Trend_t=\alpha_i+\beta_i t \quad (7)$$

$$L=(\alpha_i-1-\alpha_i)+(\beta_i-1-\beta_i)t \quad (8)$$

$$Seasonal_t=\sum_{k-1}^{j}\alpha_{j,k}\sin\left(\frac{2\pi kt}{f}\right)+\delta_{j,k} \quad (9)$$

其中 $CDHI_t$、$Trend_t$、seasonal 和 Remainder 分别是 1982-2020 年的月度 CDHI、趋势分量、季节分量和剩余残差。趋势与特定路段的坡度和 l+1 个不同部分的截距呈分段线性关系。因此，有 l 个断点，$\tau_{i-1},\ldots\tau_l$，其中 i=1，2，3……l，定义$\tau_0=0$ 和$\tau_{l+1}=n$。断点 L 的幅度可以使用α_i 和β_i 之间的趋势截距来估计 t_{i-1} 和 t_i。$t_0=0$ 定义为 $t_j<t\leq t_j+1$，以适应频率，其中 j 表示断点的出现时间，j=1,2,3…L，k 表示谐波项的数量；断点总数为 l；α_j，k 和δ_j，k 分别表示分段特定的振幅和相位。

2.3.4 小波相干分析和偏小波相干分析

小波相干分析（WTC）：时间序列通常是非平稳的，即它们的频率内容会随着时间而变化，对于这些时间序列，重要的是时频平面中的相关性或相干性。WTC 通过两个时间序列的频带和时间间隔来评估时频域中的局部相关性[10,11]。对于两个时间序列 x 和 y 可以定义：

$$R_n^2(a)=\frac{\left|S\left(a^{-1}W_n^{xy}(a)\right)\right|^2}{S\left(a^{-1}|W_n^x(a)|^2\right)\left(a^{-1}|W_n^y(a)|^2\right)} \quad (10)$$

其中，W_n^x和W_n^x分别是时间序列 x 和 y 的小波变换；W_n^{xy}是 x 和 y 的交叉小波功率谱；s 是平滑算子，$R_n^2(a)$是 x 和 y 的小波相干性系数，取值范围为[0，1]，值越接近 1 相关性越强，相干性的显著性检验使用蒙特卡罗方法实现。

偏小波相干分析(PWC)：类似于偏相关分析，在研究 x_1 和 y 这两个时间序列的相干性时，可以使用 PWC 排除某些可能干涉 x_1 和 y 的其他因素 x_2[12,13]。在本研究中，我们使用 PWC 分别排除 ENSO、PDO 和太阳黑子对复合指数和 NDVI 的相干性的影响，并对比未排除遥相关因素时，复合指数和 NDVI 的 WTC 的 the change in the percentage area of significant coherence（PASC）来确定影响力最显著的遥相关因素。关于 PWC 的推导和详细原理可参考(Ng and Chan 2012)。

3.结果

3.1 植被动态对复合干热事件的响应

为揭示内蒙古植被动态对干热事件的响应，我们计算了 12 个尺度的干热指数和干冷指数与内蒙古 NDVI 的最大相关系数（MPCC），以及对应的尺度（图 2 和 3）。CDHI 与内蒙古植被具有显著的相关性，分别有 55.06%和 45.4%的像元与 NDVI 呈极显著正相关（p<0.01）。主要分布于内蒙古东北的典型草原带，中西部的典型草原和荒漠草原带。此外，分别有 8.85%和 9.96%的像元与 NDVI 呈显著正相关（p<0.05）。主要分布于内蒙古东北部的草甸草原和阔叶林区。CDHI 有 7.88%的像元与内蒙古东北的针叶林呈极显著（p<0.01）的负相关性。

CDHI 相关性最好的尺度为 2 月和 3 月，像元占比分别为 38.22%和 29.23%，主要覆盖了内蒙古的草原生态系统，而林区受 5 月尺度的影响较大。

总体来看，草原生态系统中，荒漠草原和典型草原受干热事件的影响最强，其次是草甸草原，且尺度较小，林区受累积干热影响较大。

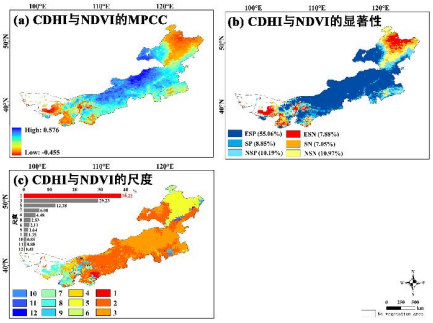

图 2 CDHI 和 NDVI 的 MPCC、显著性和相应尺度月份

注：ESP：极显著正相关（p<0.01）；SP：显著正相关（p<0.05）；NSP：无显著正相关（p>0.05）；ESN：极显著负相关（p<0.01）；SN：显著负相关（p<0.05）；NSN：无显著负相关（p>0.05）

3.2 复合干热和干冷指数趋势和突变检测

根据对比 CDHI 与 NDVI 的 MPCC，我们选择了内蒙古最具代表性尺度的复合干热指数 CDHI2（图 3）进行趋势分析和突变点检测。 在内蒙古，CDHI2 在 1982 年 1 月到 1998 年 1 月经历了趋势为 0.034/year 的显著上升；在 1998 年 1 月到 2001 年 6 月经历了趋

势为-0.601/year 的骤减；在 2001 年 6 月到 2013 年 6 月和 2013 年 6 月到 2020 年 12 月经历了趋势分别为 -0.025/year 和-0.016/year 的不显著的下降。结果表明，总体上，1999 年后，内蒙古干热事件趋于严重，1998 年到 2001 年间经历了十分严重的干热事件。

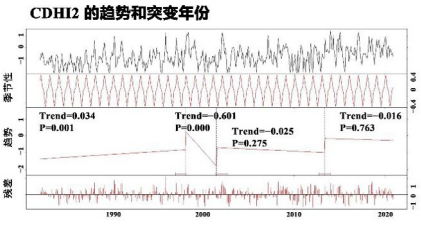

图 3 内蒙古干热事件的变化趋势和突变

3.3 影响反应关系的主要遥相关因素

大规模气候模式以及太阳活动对区域如降水、温度等气候因素产生影响，从而可能间接影响复合干热对与植被之间的关系。基于上一节的结果，CDHI2 被选择作为最具代表性尺度的复合指数，基于 WTC 和 PWC 并利用显著一致性面积百分比（PASC）的变化定量分析了 ENSO、PDO 和太阳黑子等遥相关因子对植被与复合干事件响应关系的影响。

图 4 a 展示了 CDHI2 和 NDVI 的 WTC，图 4 b-d 分别展示了在排除 ENSO、PDO 和太阳黑子的影响后的 PWC。彩色条表示能量密度，置信水平 95%的显著性为黑色加粗轮廓区域。相位关系由箭头的方向表示（相反的相位指向左侧，相同的相位指向右侧）。表 2 展示了在排除了每个遥相关因素后的 PASC 的变化。

表 2 排除三个遥连接因素影响后 PASC 的变化

复合指数	ENSO	PDO	太阳黑子
CDHI2	-6.93%	-9.82%	-6.63%

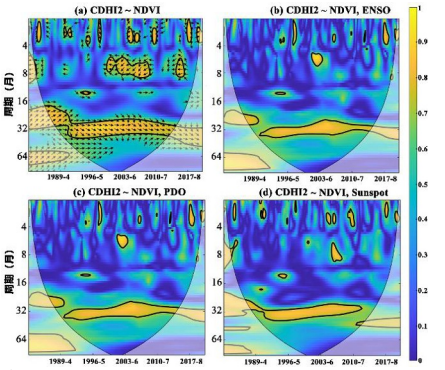

图 4 CDHI2（a）和 NDVI 的 WTC；排除 ENSO、PDO 和太阳黑子后 CDHI2（b-d）和 NDVI 的 PWC

4 结论：

极端复合事件往往比单一灾害造成更大的破坏和损失，甚至有可能导致一系列的自然灾害。因此本研究分别利用气象干旱与温度指标构建内蒙古 1982 年至 2020 年的复合干热指数。分析了复合干热事件对内蒙古植被影响。通过 PWC 并基于 PASC 定量分析了三种遥相关因素对复合干热事件与植被响应关系的影响。

（1）干热事件对草原，特别是更脆弱的荒漠草原和典型草原的具有显著的负面影响，但对森林具有一定的积极作用。此外，草原对复合干热事件的反应比森林更迅速，仅需要 1 到 2 个月的累积。但森林植被受干热事件影响通常需要 5 到 9 个月的累积。

（2）根据 WTC 的结果表明，CDHI2 与 NDVI 呈显著正相关性，且共振连续性较好。PWC 的结果表明，影响 CDHI2 和植被关系最主要的遥相关因素为 PDO，排名其次的分别是 ENSO 和太阳黑子。总体上，三种遥相关因素对复合干热事件与内蒙古植被的关系具有不同程度的影响，其中 PDO 的影响最为强，而 ENSO 和太阳黑子影响力差异较小。

致谢

本研究得到吉林省科技重大专项(20230303009SF)的支持。

参考文献

[1] Zhao, M.; Running, S.W. Response to

Comments on "Drought-Induced Reduction in Global Terrestrial Net Primary Production from 2000 Through 2009". Science 2011, 333,http://doi.org/.10.1126/science.1199169

[2] Zhao, M.; Running, S.W. Drought-Induced Reduction in Global Terrestrial Net Primary Production from 2000 Through 2009. Science 2010, 329, 940-943,http://doi.org/.10.1126/science.1192666

[3] Samanta, A.; Costa, M.H.; Nunes, E.L.; Vieira, S.A.; Xu, L.; Myneni, R.B. Comment on "Drought-Induced Reduction in Global Terrestrial Net Primary Production from 2000 Through 2009". Science 2011, 333,http://doi.org/.10.1126/science.1199048

[4] Hao, Z.; Singh, V.P.; Hao, F. Compound Extremes in Hydroclimatology: A Review. Water 2018, 10,http://doi.org/.10.3390/w10060718

[5] Hao, Z.; Hao, F.; Xia, Y.; Singh, V.P.; Zhang, X. A monitoring and prediction system for compound dry and hot events. Environmental Research Letters 2019, 14,http://doi.org/.10.1088/1748-9326/ab4df5

[6] Guga, S.; Ma, Y.; Riao, D.; Zhi, F.; Xu, J.; Zhang, J. Drought monitoring of sugarcane and dynamic variation characteristics under global warming: A case study of Guangxi, China. Agricultural Water Management 2023, 275,http://doi.org/.10.1016/j.agwat.2022.108035

[7] Gringorten, I.I. A plotting rule for extreme probability paper. Journal of Geophysical Research 1963, 68, 813-814

[8] Hao, Z.C.; AghaKouchak, A.; Nakhjiri, N.; Farahmand, A. Global integrated drought monitoring and prediction system. Scientific Data 2014, 1,http://doi.org/.10.1038/sdata.2014.1

[9] Verbesselt, J.; Hyndman, R.; Newnham, G.; Culvenor, D. Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series. Remote sensing of Environment 2010, 114, 106-115

[10] Zhou, Z.; Liu, S.; Ding, Y.; Fu, Q.; Wang, Y.; Cai, H.; Shi, H. Assessing the responses of vegetation to meteorological drought and its influencing factors with partial wavelet coherence analysis. Journal of Environmental Management 2022, 311,http://doi.org/.10.1016/j.jenvman.2022.114879

[11] Torrence, C.; Compo, G.P. A practical guide to wavelet analysis. Bulletin of the American Meteorological Society 1998, 79, 61-78,http://doi.org/.10.1175/1520-0477(1998)079<0061:Apgtwa>2.0.Co;2

[12] . Mihanovic, H.; Orlic, M.; Pasaric, Z. Diurnal thermocline oscillations driven by tidal flow around an island in the Middle Adriatic. Journal of Marine Systems 2009, 78, S157-S168,http://doi.org/.10.1016/j.jmarsys.2009.01.021

[13] Hu, W.; Si, B. Technical Note: Improved partial wavelet coherency for understanding scale-specific and localized bivariate relationships in geosciences. Hydrology and Earth System Sciences 2021, 25, 321-331,http://doi.org/.10.5194/hess-25-321-2021

Open Access This chapter is licensed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/), which permits any noncommercial use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons license and indicate if changes were made.

The images or other third party material in this chapter are included in the chapter's Creative Commons license, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the chapter's Creative Commons license and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder.