

蒙古高原骤发干旱的时空特征及驱动因素

王阿嘎日, 佟斯琴*, 包玉海

内蒙古师范大学地理科学学院, 内蒙古 呼和浩特

收稿日期: 2025年3月26日; 录用日期: 2025年6月3日; 发布日期: 2025年6月11日

摘要

近年来, 干旱与高温并发现象频发, 导致具有突发性、快速发展的“骤旱”事件。然而, 蒙古高原生态系统的干旱响应研究主要集中于气象与农业干旱, 对骤旱的关注仍显不足。本研究中, 基于ERA5-Land再分析数据集的1980~2021年逐日的土壤湿度数据, 识别了蒙古高原的骤旱事件, 揭示近42年蒙古高原骤旱的时空特征、驱动因素。主要有以下结果: (1) 空间分布上, 骤旱集中在东南部和北部, 西部较少, 强度由西南向东北递增; 时间上, 骤旱事件主要集中在夏季。(2) 探究骤旱的气象驱动机制发现, 骤旱事件期间, 标准化降水指数(SPI)异常发生率远高于潜在蒸散发(PET)异常的发生率。本研究的发现为蒙古高原干旱监测、适应性管理以及生态系统综合管理提供了重要的科学依据和实践参考。

关键词

土壤湿度, 骤发干旱, 驱动因素, 蒙古高原

Spatiotemporal Characteristics and Driving Factors of Flash Drought on the Mongolian Plateau

Agari Wang, Siqin Tong*, Yuhai Bao

College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot Inner Mongolia

Received: Mar. 26th, 2025; accepted: Jun. 3rd, 2025; published: Jun. 11th, 2025

Abstract

In recent years, the frequent occurrence of concurrent drought and high temperatures has led to the emergence of flash drought events characterized by their sudden onset and rapid development. However, research on the drought response of the Mongolian Plateau ecosystem has primarily focused on meteorological and agricultural droughts, with relatively little attention paid to flash

*通讯作者。

文章引用: 王阿嘎日, 佟斯琴, 包玉海. 蒙古高原骤发干旱的时空特征及驱动因素[J]. 地理科学研究, 2025, 14(3): 484-494. DOI: 10.12677/gser.2025.143048

drought. In this study, based on daily soil moisture data from the ERA5-Land reanalysis dataset for the period 1980~2021, flash drought events on the Mongolian Plateau were identified, revealing the spatiotemporal characteristics and driving factors of flash drought over nearly 42 years. The main findings are as follows: (1) Spatially, flash drought events are concentrated in the southeast and northern regions, with fewer occurrences in the west, and their intensity increases gradually from the southwest to the northeast. Temporally, these events are mainly concentrated in the summer. (2) An investigation into the meteorological driving mechanisms of flash drought revealed that during these events, the occurrence rate of anomalies in the Standardized Precipitation Index (SPI) is much higher than that of anomalies in potential evapotranspiration (PET). The findings of this study provide important scientific evidence and practical references for drought monitoring, adaptive management, and integrated ecosystem management on the Mongolian Plateau.

Keywords

Soil Moisture, Flash Drought, Driving Factors, Mongolian Plateau

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

干旱是一段时期内, 由于长期异常干燥天气所造成的水资源短缺现象[1]。由干旱自然现象引起的旱灾是对人类和自然社会造成的最具破坏性的自然灾害之一, 影响面和经济损失远远超出了其他气象灾害[1][2]; 对区域生产、水资源以及生态环境(如荒漠化加剧、沙尘暴频发以及植被生产力减少等)造成严重影响[3]-[5]。值得注意的是, 随着人类活动的加剧、全球变暖、降水强度和频率变化的叠加背景下, 全球干旱强度和面积呈显著增加趋势, 一些地区干旱发生的频率和严重程度不断攀升至历史新高[6][7]。近年来, 高温天气频繁发生, 增加了区域干旱与高温天气同时发生的频率[8]。这引发了一种周期短且极具严重性的干旱事件, 该干旱事件被定义为“骤旱”[8][9]。

相较于传统干旱, 骤旱具有突发性强、发展快速、强度高、预测难度大等特点[10]。强烈的太阳辐射会加剧潜在蒸散发, 在干旱初期推升实际蒸散发并引发土壤湿度急剧下降, 最终触发骤旱事件[11][12]。

目前, 学术界对骤旱的定义尚未统一。MO [13]等人将骤旱划分为“热浪型骤旱”和“缺水型骤旱”, 其识别主要基于候平均尺度下的关键气象要素阈值。具体而言, 当某候气温距平值超过一倍标准差且土壤湿度低于第 30 百分位数时, 若蒸散发距平为正, 则定义为热浪型骤旱; 若为负, 则定义为缺水型骤旱。然而, 该定义未充分考虑骤旱快速发展的特征, 且难以区分复合干旱事件。Christian [14]等人提出了基于候平均标准化蒸发胁迫比例指数(Standardized Evaporative Stress Ratio, SERS)的定义, 即当干旱指数下降速率超过 SERS 气候态变化速率 25%时, 判定为骤旱。Ford [15]等人则将 20 至 30 天内候平均土壤湿度或标准化蒸发胁迫比例指数(Evaporative Stress Index, ESI)从第 40 百分位数下降至第 20 百分位数的过程定义为骤旱事件。然而, Christian 和 Ford 的定义仅关注骤旱的爆发, 忽略了其恢复过程。袁星[16]等人则在 Ford 提出的定义基础上进行了改进, 将候平均土壤湿度百分位数下降速率不低于 5%作为骤旱爆发期, 并将土壤湿度从低于 20%分位数恢复至 20%分位数以上时作为该骤旱事件终止, 同时规定整个骤旱事件持续时间不少于 3 候。该定义综合考虑了骤旱的爆发和恢复过程, 完整刻画了一次骤旱事件的全部过程。

蒙古高原地处欧亚大陆腹地, 是以草原为主的典型干旱半干旱生态系统, 对气候变化极为敏感和脆弱。研究表明, 蒙古高原气候变暖速率显著高于全球平均水平[17], 并伴随湖泊萎缩[18][19], 降水量减

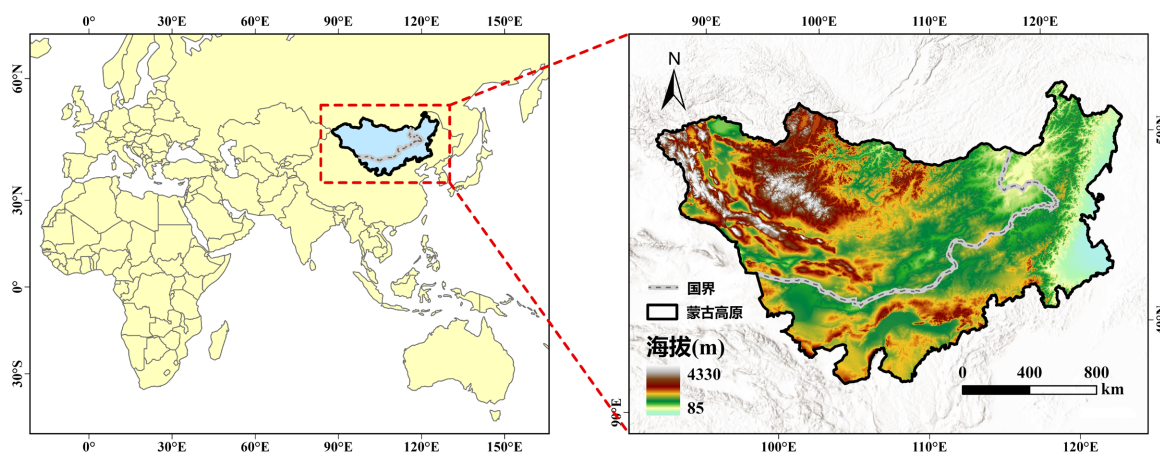
少[19][20]和干旱加剧[21][22]等环境问题。极端干旱日益频发的背景下, 蒙古高原生态系统对干旱的响应及其稳定性已成为当前的研究热点[23]。然而, 现有研究多集中于气象和农业干旱的变化及其影响[24], 对骤发干旱的关注相对不足。

为此, 本研究以蒙古高原为研究区, 基于 1980~2021 年长时间序列的土壤湿度遥感数据, 分析过去 42 年蒙古高原骤旱事件的发生频率、强度、时空分布格局及其变化趋势。同时, 通过构建植被响应模型, 深入探究骤旱与热骤旱对植被影响的差异, 揭示植被对不同类型骤旱事件的响应机制。

2. 数据与方法

2.1. 研究区概况

蒙古高原(87°43'~126°04'E, 37°22'~53°20'N)地处欧亚大陆腹地(图 1), 主体包括中国内蒙古和蒙古国, 总面积约 $2.74 \times 10^6 \text{ km}^2$ [25]。该区域地势西高东低, 平均海拔约 1580 米[26], 属于典型的温带大陆性气候, 昼夜温差大[27]。年平均降水量约 200 mm, 多年平均气温约 4℃, 但年际变化较大, 夏季最高气温超过 30℃, 冬季最低气温低于-33℃ [28]。



注: 底图采用自然资源部标准地图制作, 审图号为 GS(2024)0650 号, 对底图边界无修改。

Figure 1. Geographic location and elevation of the Mongolian Plateau

图 1. 蒙古高原的地理位置与海拔

2.2. 数据来源

2.2.1. 气象数据

本研究使用的气象数据来自于欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)提供的 ERA5-Land 再分析数据集。该数据集提供了长期陆地参数变化的一致记录, 相较于 ERA5, 其空间分辨率更高($0.1^\circ \times 0.1^\circ$), 时间分辨率更精细(1 小时)。研究数据涵盖 1980 年至 2021 年的土壤湿度水文气象数据[29][30]。其中, 土壤湿度数据包含四个层次, 分别为 0~7 cm、7~28 cm、28~100 cm、100~289 cm。本研究重点关注 100 cm 深度的土壤湿度, 因为该深度能够满足大部分作物根系对水分和养分的需求[31]。

2.2.2. 其他数据

海拔梯度数据来源于 NASA 网站(<https://appears.earthdatacloud.nasa.gov/>)提供的数字高程模型 DEM 数据, 数据的空间分辨率为 30 m。

2.3. 研究方法

2.3.1. 骤旱事件识别

本研究参考袁星等人[16]的方法, 将土壤湿度 40%和 20%分位数作为阈值识别骤旱事件, 具体方法如下: (1) 当候(5 天)平均土壤湿度低于 40%分位数时, 骤旱事件开始; (2) 每候土壤湿度下降速率不低于 5%; (3) 快速下降后的候平均土壤湿度低于 20%分位数; (4) 当候平均土壤湿度再次恢复到 20%分位数时, 骤旱事件结束(图 2)。为了进一步探究气温和短波辐射在骤旱期间的作用, 根据奚夏珍等人的研究[32]。

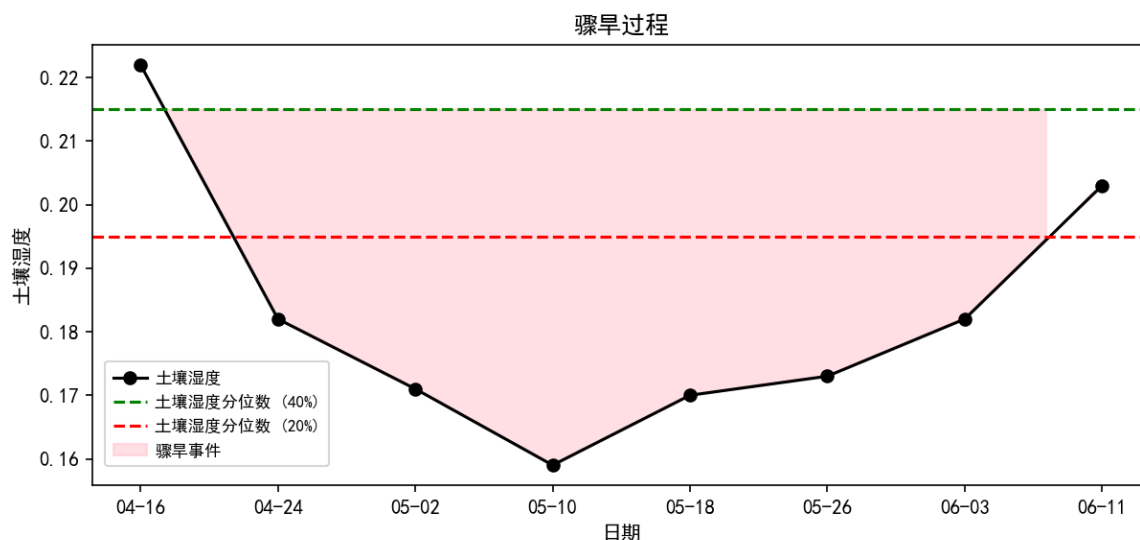


Figure 2. Schematic diagram of the flash drought occurrence process

图 2. 骤发干旱发生过程示意图

为深入分析骤旱特征, 本研究从持续时间、严重程度和强度三方面进行量化分析。具体定义如下[33]:

- (1) 持续时间(天): 土壤湿度低于 20%分位数阈值的天数。
- (2) 严重性: 持续时间内土壤湿度低于 20%分位数阈值的土壤湿度的总和。
- (3) 强度(天^{-1}): 严重性与持续时间的比值, 用于表征单位时间内骤旱的严重程度。

2.3.2. 土壤湿度百分位数

根据骤旱识别方法, 本文需要利用土壤湿度值来换算土壤湿度百分位数, 计算步骤如下[34] [35]:

将 1980~2021 年的土壤湿度数据按从小到大的顺序排列, 其中 $SM(i)$ 表示排序后序列中的第 i 个值。土壤湿度百分位数计算公式如下:

$$(n+1)X\% = i + j \quad (1)$$

在式(2)中, i 表示整数部分, j 表示小数部分, X 表示当前序列中的百分位数。 n 表示土壤湿度数据序列中的总数据点数。当 $j = 0$ 时, 土壤湿度数据序列中的 X 百分位数是:

$$X = SM(i) \quad (2)$$

当 $j \neq 0$ 时, 土壤湿度百分位数的计算公式如下:

$$X = j \cdot SM(i+1) + (1-j) \cdot SM(i) = SM(i) + j \cdot [SM(i+1) - SM(i)] \quad (3)$$

2.3.3. 骤旱发展的驱动因子

为量化气象因素对骤旱发展的贡献,本研究以降水、潜在蒸散发等要素为候选变量,选取蒙古高原骤旱高发区作为研究区域。针对区域内每个独立的骤旱事件,在其时间范围内计算标准化降水指数(SPI)与潜在蒸散发(PET)异常。骤旱期间的异常频率通过以下标准确定:(1) $SPI \leq -1$; (2) PET 异常 ≥ 1 ; (3) 在快速干旱发展期间, SPI 异常与 PET 异常同时发生(SPI & PET); (4) 在骤旱期间至少发生一个异常(SPI or PET) [36] [37]。

3. 蒙古高原骤旱时空变化特征及驱动因素

3.1. 骤旱的时间变化特征

图 3 展示了 1980~2021 年蒙古高原不同季节骤旱事件发生面积占比的变化。参考来全[38]等人基于标准化降水蒸散指数(SPEI)的研究结果,蒙古高原的干旱状况在 1998 年份发生了突变。为保持研究一致性,本文依据该突变年份将研究时段划分为两个阶段进行分析。骤旱在春季和夏季的变化趋势呈现一致性。1980~1998 年期间,骤旱在春季和夏季的发生面积占比呈上升趋势,其中骤旱在 1990 年、1997 年和 2008 年的占比均超过 25%,表明这些年份干旱影响较为严重。1999 年后,骤旱的发生面积占比开始下降,1980~1998 年春季骤旱的平均占比面积为 15.4%,而 1999 年后降至 13%。

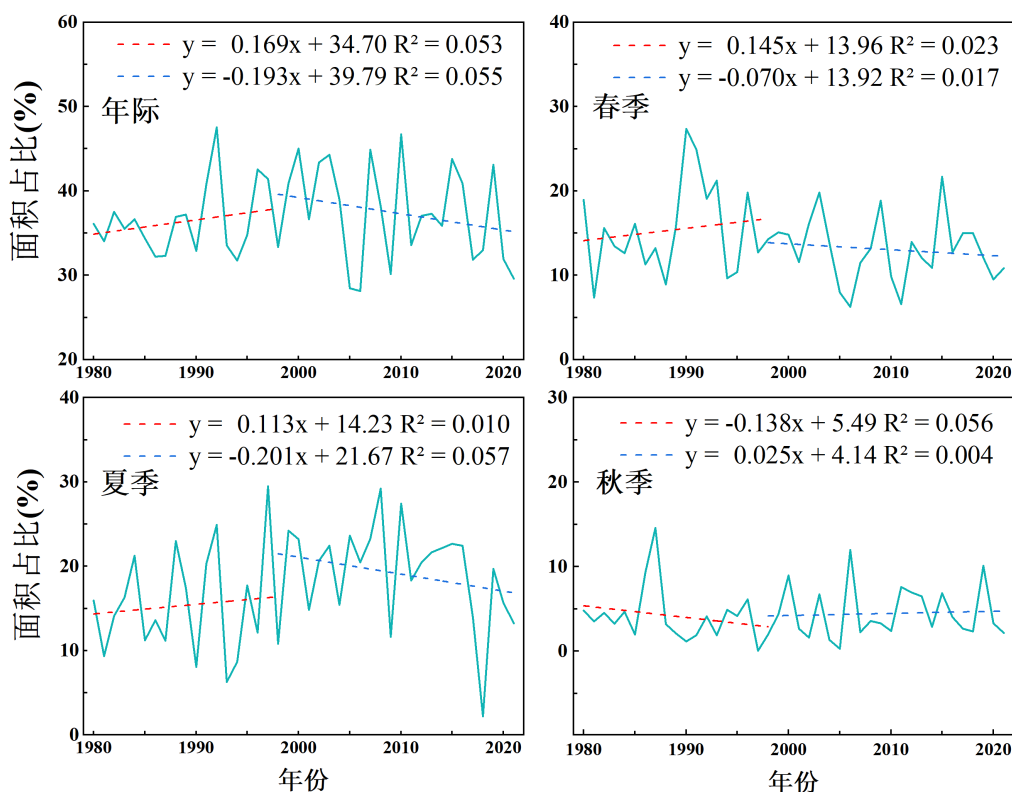


Figure 3. Area proportions affected by flash drought events on the Mongolian Plateau from 1980 to 2021

图 3. 1980~2021 年蒙古高原骤旱事件影响的面积占比

在秋季,骤旱的变化趋势呈现出差异。1980~1998 年,骤旱的发生面积占比呈下降趋势,平均占比面积为 4.12%;而 1999 年后转为上升趋势,平均占比面积增至 4.56%,并在 1987 年、2006 年和 2019 年超过 10%,表明秋季骤旱的影响在近年有所增强。

年际尺度上,1980~1998年,呈现上升趋势,其中骤旱的平均占比面积分别为36.39%;1999~2021年则转为下降趋势,但平均占比面积较前期有所增加,骤旱的平均占比面积分别为37.55%。这表明,尽管1999年后骤旱的占比面积呈下降趋势,但其平均影响范围仍高于1980~1998年。

根据图3结果表明,1980~1998年,骤旱事件的面积均具有上升的趋势,但在1998~2021年,则显示为下降趋势。根据图4可知,骤旱的数据分布更加广泛且更为均匀,大部分数据分布在15%至40%之间。

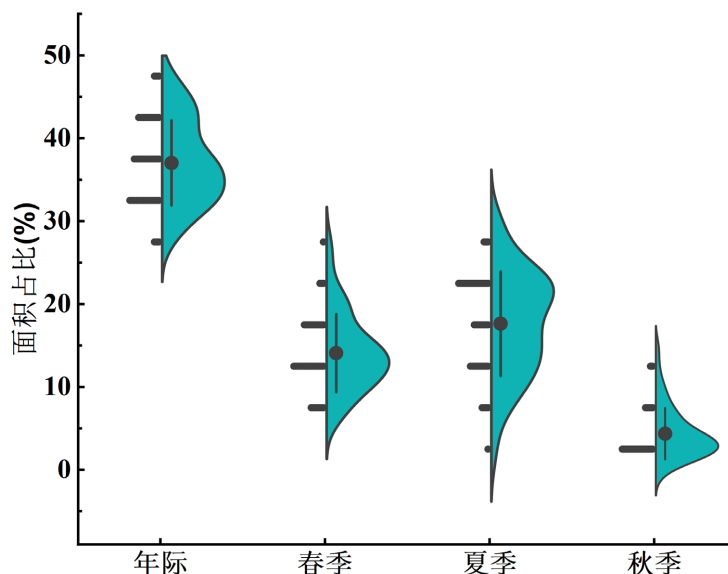


Figure 4. Distribution and probability density of area proportions affected by flash drought and hot flash drought events on the Mongolian Plateau from 1980 to 2021

图 4. 1980~2021 年蒙古高原骤旱事件影响的区域比例数据分布及概率密度

3.2. 骤旱的空间变化特征

图5展示了1980~2021年蒙古高原地区骤旱事件的发生次数、持续时间、严重程度和强度的空间分布特征及其在两个时段的动态变化。从发生频次的空间格局来看(图5(a)),研究区东南部 and 北部是骤旱事件的高发区域。其中,骤旱事件发生次数普遍介于22~48次之间,局部区域超过48次;西部地区,特别是西南部,骤旱事件的发生频率相对较低,骤旱次数基本维持在11次以下。对比1980~1998年和1999~2021年两个时段,骤旱事件的变化趋势具有相似性:骤旱次数增加的区域主要分布在蒙古高原北部和东南部,约占研究区总面积的54%。

在持续时间方面(图5(c)),东部和西北部部分区域表现出较长的累计干旱历时。骤旱累计历时普遍超过535天,局部区域超过755天;相比之下,西北部地区骤旱历时相对较短(165~390天),而西南部地区干旱事件的历时均为最短(骤旱少于165天)。就严重性而言(图5(e)),其空间分布格局与发生次数和持续时间具有一致性,北部和东部地区呈现较高值。具体而言,骤旱严重性指数介于12.34~32.11之间,其中东南部部分区域的干旱事件严重性均达到峰值(骤旱超过32.12)。从时空变化特征来看,骤旱的持续时间和严重度变化率呈现出相似的分布模式。与1980~1998年基准期相比,研究区大部分区域的骤旱持续时间和严重度有所降低。干旱强度的空间分布特征(图5(g))与其他指标存在差异,呈现出明显的西南向东北递增趋势。研究区东北部及西北部部分区域表现出最高强度值,其中骤旱强度超过0.058,热骤旱强度超过0.053。

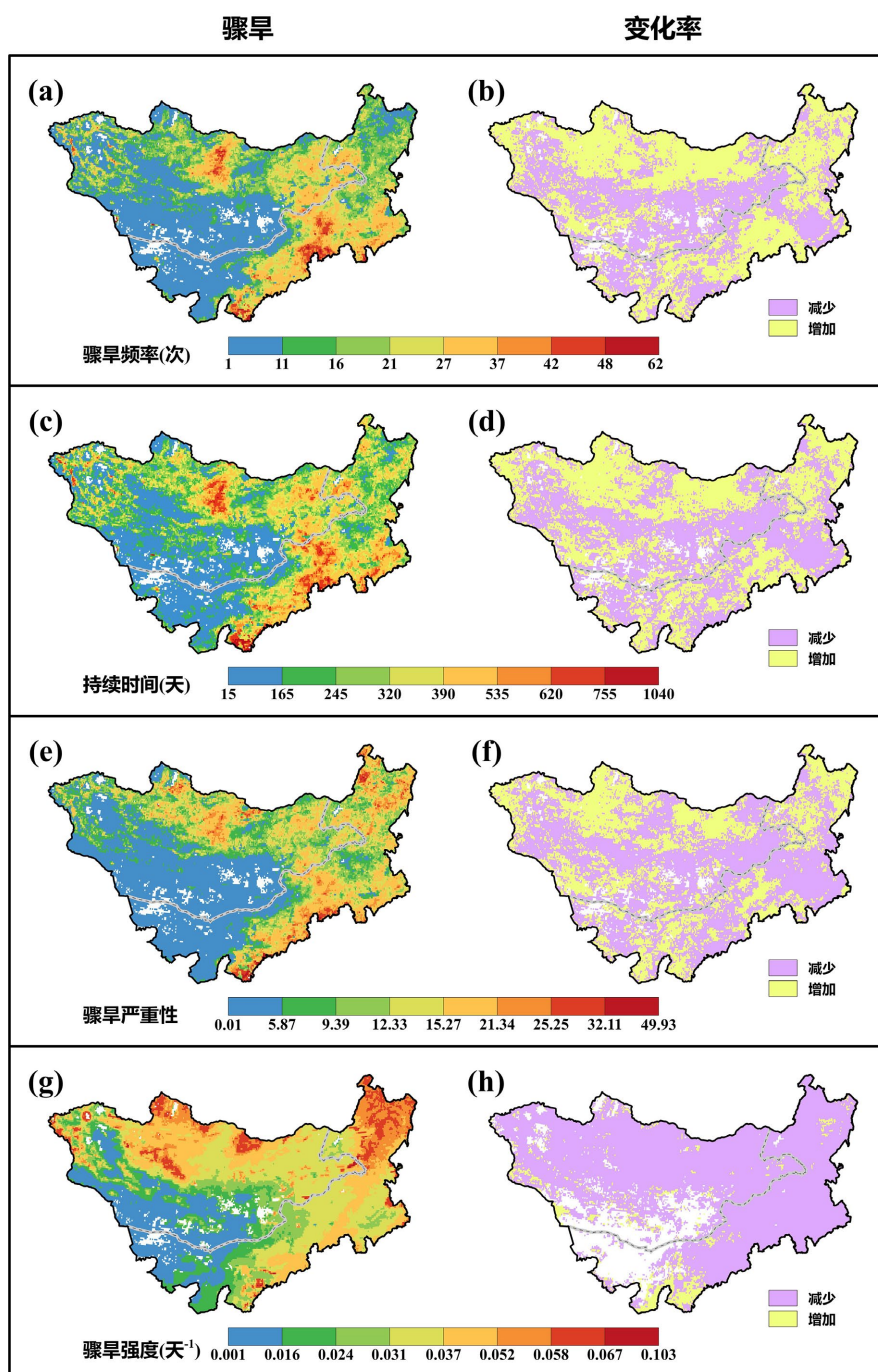


Figure 5. Flash drought and heat flash drought events on the Mongolian Plateau, 1980~2021. (a) Number of flash drought occurrences; (c) Duration of flash droughts; (e) Severity of flash droughts; (g) Intensity of flash droughts; (h) Intensity of heat flash droughts (with the rate of change for each characteristic on the right)

图 5. 蒙古高原 1980~2021 年骤旱与热骤旱事件。(a) 骤旱发生次数; (c) 骤旱持续时间; (e) 骤旱严重性; (g) 骤旱强度; (h) 热骤旱强度(右边为各特征变化率)

3.3. 骤发干旱的驱动因素

为深入探究骤旱形成的气象驱动机制, 本研究根据每次骤旱发生的时间分析了骤旱发展过程中关键

气象要素的变化特征。图 6 的结果表明, 骤旱事件期间潜在蒸散发(PET)异常发生率为 1.4%, 而标准化降水指数(SPI)异常发生率高达 8.18%。值得注意的是, 研究区域内 9.4% 的骤旱事件同时伴随严重的 SPI 与 PET 异常, 表明干旱的形成是多因素共同作用的结果。从空间分布来看, 蒙古高原的骤旱驱动机制呈现显著的区域差异。具体而言, 蒙古高原北部和西部地区以潜在蒸散发异常主导型骤旱为主, 而东部和南部地区则以标准化降水异常型骤旱为主。进一步分析发现, 不同地区气象要素对骤旱形成的影响程度存在显著差异。其中, 西南地区尤为特殊, 其降水不足导致的骤旱事件发生频率显著高于其他地区, 且降水不足与潜在蒸散发异常同时出现的概率也较高。

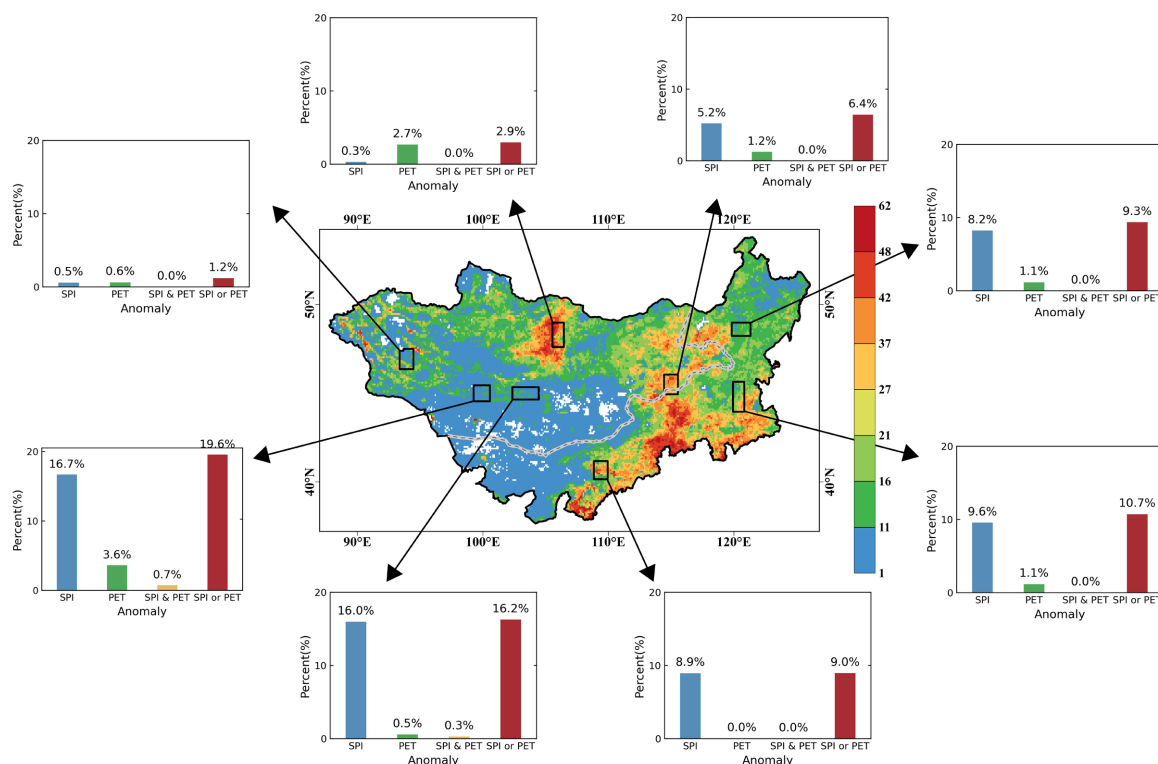


Figure 6. Driving factors of flash drought events on the Mongolian Plateau from 1980 to 2021

图 6. 蒙古高原 1980~2021 年骤旱事件的驱动因素

总的来说, PET 异常和 SPI 异常在骤旱事件中普遍存在。具体而言, 在 8.18% 由 SPI 异常引发的骤旱事件以及 1.4% 由 PET 异常引发的骤旱事件中, 均观察到这两种异常共存的现象。这一结果充分表明, 降水异常对骤旱形成和演变的影响显著强于蒸发需求。

4. 讨论

本研究系统分析了蒙古高原骤旱的时空特征及其驱动因素, 揭示了骤旱的时间演变规律、空间分布格局以及 SPI 与 PET 异常对骤旱发生的关键作用。研究结果表明, 蒙古高原南部以及东部部分地区是骤旱的高发区, 这一发现与 Xi [32] 和 Yuan [16] 等人的研究结果一致。然而, 尽管南部地区骤旱发生频率较高, 但东北部地区的骤旱强度更为显著。年际变化分析显示, 秋季骤旱的面积呈增加趋势, 这与陈治仲 [39] 等人的研究结果一致。

气候因素是影响骤旱发生的主要驱动力。本研究发现, 降水不足(SPI 异常)是引发骤旱的主导因素, 而潜在蒸散(PET)异常也在部分事件中起到重要作用。然而, 仅有约 10% 的骤旱事件是由 SPI 与 PET 异

常共同驱动的,这一结果与 Christian 等人[36]的研究存在差异。这种差异可能源于研究区域的气候类型、数据来源及分析方法的不同。例如,蒙古高原作为典型的干旱半干旱区,其降水变率较大,而蒸散发过程受气温和辐射的强烈影响,这些因素可能导致骤旱驱动机制的复杂性。此外,本研究主要基于 SPI 和 PET 指标分析骤旱驱动因素,尚未充分考虑其他关键气象变量(如风速、相对湿度、土壤水分等)的影响,这些因素可能通过调节地表能量平衡和水热交换过程进一步影响骤旱的形成与发展。未来研究需要结合多源观测数据和更全面的气候因子分析,以更系统地揭示骤旱的多尺度驱动机制。

尽管本研究基于 ERA5-Land 再分析数据对骤旱进行了系统分析,但仍存在一些局限性。首先,数据本身的局限性可能影响结果的准确性,不同数据集在变量上可能存在差异,可能导致骤旱识别结果的不一致。此外,本研究采用传统季节划分方法识别骤旱,可能遗漏部分跨越季节节点的骤旱事件,从而影响结果的全面性。最后,本研究在骤旱驱动因素分析中未充分考虑人类活动(如土地利用变化、水资源管理)及其他气候变量(如风速、湿度)的长期影响,这些因素可能在区域尺度上对骤旱的发生和演变产生重要作用。未来研究可结合更多方法和数据集来进一步揭示骤旱的驱动机制及其在气候变化背景下的演变趋势。

5. 结论

本文基于 1980~2021 年逐日的土壤湿度数据,系统识别了蒙古高原的骤旱事件,揭示近 42 年骤旱与热骤旱的时空演变特征、驱动因素及其对植被的影响。主要结论如下:

(1) 1980~1998 年,骤旱面积占比上升,1998 年后下降。骤旱事件分布更广,变化趋势更明显。春季和夏季骤旱影响较大。

(2) 蒙古高原骤旱的空间分布在东南部和北部是高发区,西部发生频率较低。东部和西北部累计历时较长,西南部历时最短。北部和东部严重性较高,东南部部分区域达到最高值。干旱强度呈现西南向东北递增趋势,东北部和西北部强度最高。

(3) SPI 异常是蒙古高原骤旱与热骤旱发生的主要驱动因素,其影响显著强于 PET 异常。

基金项目

内蒙古自治区“草原英才”工程青年创新创业项目;内蒙古自然科学基金,(2023MS04001);一流学科科研专项项目(YLXKZX-NSD-031)。

参考文献

- [1] Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G., *et al.* (2013) Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change*, **5**, 1-1552.
- [2] Byun, H. and Wilhite, D.A. (1999) Objective Quantification of Drought Severity and Duration. *Journal of Climate*, **12**, 2747-2756. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<2747:oqodsa>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<2747:oqodsa>2.0.co;2)
- [3] Orłowsky, B. and Seneviratne, S.I. (2011) Global Changes in Extreme Events: Regional and Seasonal Dimension. *Climatic Change*, **110**, 669-696. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0122-9>
- [4] Sternberg, T. (2011) Regional Drought Has a Global Impact. *Nature*, **472**, 169. <https://doi.org/10.1038/472169d>
- [5] 张余庆. 气候变化背景下赣江流域骤发干旱研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2017.
- [6] Dai, A. (2012) Increasing Drought under Global Warming in Observations and Models. *Nature Climate Change*, **3**, 52-58. <https://doi.org/10.1038/nclimate1633>
- [7] Sheffield, J. and Wood, E.F. (2007) Projected Changes in Drought Occurrence under Future Global Warming from Multi-Model, Multi-Scenario, IPCC AR4 Simulations. *Climate Dynamics*, **31**, 79-105. <https://doi.org/10.1007/s00382-007-0340-z>
- [8] Mukherjee, S. and Mishra, A.K. (2021) Increase in Compound Drought and Heatwaves in a Warming World. *Geophysical Research Letters*, **48**, e2020GL090617. <https://doi.org/10.1029/2020gl090617>

- [9] Chen, X.-L., Wei, J., Yin, G.-T., *et al.* (2021) Effects of Soil Moisture on Photosynthesis of Winterly Tobacco during Vigorous Growing Stage.
- [10] Hunt, E.D., Svoboda, M., Wardlow, B., Hubbard, K., Hayes, M. and Arkebauer, T. (2014) Monitoring the Effects of Rapid Onset of Drought on Non-Irrigated Maize with Agronomic Data and Climate-Based Drought Indices. *Agricultural and Forest Meteorology*, **191**, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.02.001>
- [11] Hoerling, M., Eischeid, J., Kumar, A., Leung, R., Mariotti, A., Mo, K., *et al.* (2014) Causes and Predictability of the 2012 Great Plains Drought. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **95**, 269-282. <https://doi.org/10.1175/bams-d-13-00055.1>
- [12] Svoboda, M., LeCompte, D., Hayes, M., Heim, R., Gleason, K., Angel, J., *et al.* (2002) The Drought Monitor. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **83**, 1181-1190. <https://doi.org/10.1175/1520-0477-83.8.1181>
- [13] Mo, K.C. and Lettenmaier, D.P. (2015) Heat Wave Flash Droughts in Decline. *Geophysical Research Letters*, **42**, 2823-2829. <https://doi.org/10.1002/2015gl064018>
- [14] Christian, J.I., Basara, J.B., Otkin, J.A., Hunt, E.D., Wakefield, R.A., Flanagan, P.X., *et al.* (2019) A Methodology for Flash Drought Identification: Application of Flash Drought Frequency across the United States. *Journal of Hydrometeorology*, **20**, 833-846. <https://doi.org/10.1175/jhm-d-18-0198.1>
- [15] Ford, T.W. and Labosier, C.F. (2017) Meteorological Conditions Associated with the Onset of Flash Drought in the Eastern United States. *Agricultural and Forest Meteorology*, **247**, 414-423. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.08.031>
- [16] Yuan, X., Wang, Y., Ji, P., Wu, P., Sheffield, J. and Otkin, J.A. (2023) A Global Transition to Flash Droughts under Climate Change. *Science*, **380**, 187-191. <https://doi.org/10.1126/science.abn6301>
- [17] Dagvadorj, D., Natsagdorj, L., Dorjpurev, J., *et al.* (2009) Mongolia: Assessment Report on Climate Change. Ministry of Nature, Environment and Tourism.
- [18] Zhou, Y., Dong, J., Xiao, X., Liu, R., Zou, Z., Zhao, G., *et al.* (2019) Continuous Monitoring of Lake Dynamics on the Mongolian Plateau Using All Available Landsat Imagery and Google Earth Engine. *Science of the Total Environment*, **689**, 366-380. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.341>
- [19] Tao, S., Fang, J., Zhao, X., Zhao, S., Shen, H., Hu, H., *et al.* (2015) Rapid Loss of Lakes on the Mongolian Plateau. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **112**, 2281-2286. <https://doi.org/10.1073/pnas.1411748112>
- [20] Jiang, L., Yao, Z. and Huang, H. (2016) Climate Variability and Change on the Mongolian Plateau: Historical Variation and Future Predictions. *Climate Research*, **67**, 1-14.
- [21] John, R., Chen, J., Kim, Y., Ou-yang, Z., Xiao, J., Park, H., *et al.* (2015) Differentiating Anthropogenic Modification and Precipitation-Driven Change on Vegetation Productivity on the Mongolian Plateau. *Landscape Ecology*, **31**, 547-566. <https://doi.org/10.1007/s10980-015-0261-x>
- [22] Chen, J., John, R., Sun, G., Fan, P., Henebry, G.M., Fernández-Giménez, M.E., *et al.* (2018) Prospects for the Sustainability of Social-Ecological Systems (SES) on the Mongolian Plateau: Five Critical Issues. *Environmental Research Letters*, **13**, Article ID: 123004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaf27b>
- [23] 白庆坤, 阿拉腾图娅. 2001-2020 年蒙古高原草地覆盖度变化对干旱的响应[J]. 草业科学, 2022, 39(3): 443-454.
- [24] Cao, X., Feng, Y. and Shi, Z. (2020) Spatio-Temporal Variations in Drought with Remote Sensing from the Mongolian Plateau during 1982-2018. *Chinese Geographical Science*, **30**, 1081-1094. <https://doi.org/10.1007/s11769-020-1167-3>
- [25] Tong, S., Lai, Q., Zhang, J., Bao, Y., Lusi, A., Ma, Q., *et al.* (2018) Spatiotemporal Drought Variability on the Mongolian Plateau from 1980-2014 Based on the SPEI-PM, Intensity Analysis and Hurst Exponent. *Science of the Total Environment*, **615**, 1557-1565. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.121>
- [26] Li, Y., Tong, S., Bao, Y., Guo, E. and Bao, Y. (2020) Prediction of Droughts in the Mongolian Plateau Based on the CMIP5 Model. *Water*, **12**, Article No. 2774. <https://doi.org/10.3390/w12102774>
- [27] 张港栋, 包刚, 元志辉. 2001-2020 年蒙古高原昼夜非对称变暖对植被返青期的影响[J]. 干旱区地理, 2023, 46(5): 700-710.
- [28] 杜佳梦, 包刚, 佟斯琴, 等. 1982-2015 年蒙古国植被覆盖变化及其与气候变化和人类活动的关系[J]. 草业学报, 2021, 30(2): 1-13.
- [29] Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., *et al.* (2021) Era5-Land: A State-of-the-Art Global Reanalysis Dataset for Land Applications. *Earth System Science Data*, **13**, 4349-4383. <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>
- [30] Gomis-Cebolla, J., Rattayova, V., Salazar-Galán, S. and Francés, F. (2023) Evaluation of ERA5 and Era5-Land Reanalysis Precipitation Datasets over Spain (1951-2020). *Atmospheric Research*, **284**, Article ID: 106606. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.106606>
- [31] Wang, L. and Yuan, X. (2018) Two Types of Flash Drought and Their Connections with Seasonal Drought. *Advances in*

- Atmospheric Sciences*, **35**, 1478-1490. <https://doi.org/10.1007/s00376-018-8047-0>
- [32] Xi, X. and Yuan, X. (2023) Remote Sensing of Atmospheric and Soil Water Stress on Ecosystem Carbon and Water Use during Flash Droughts over Eastern China. *Science of the Total Environment*, **868**, Article ID: 161715. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161715>
- [33] Yin, X., Wu, Y., Zhao, W., Liu, S., Zhao, F., Chen, J., *et al.* (2023) Spatiotemporal Responses of Net Primary Productivity of Alpine Ecosystems to Flash Drought: The Qilian Mountains. *Journal of Hydrology*, **624**, Article ID: 129865. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129865>
- [34] Xue, Z., Chen, Y., Yin, Y., Chen, W., Jiao, Y., Deng, P., *et al.* (2024) Spatio-Temporal Characteristics and Driving Factors of Flash Drought in Northern China from 1978 to 2020. *Global and Planetary Change*, **232**, Article ID: 104326. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2023.104326>
- [35] Zhu, Y., Liu, Y., Wang, W., *et al.* (2021) Analysis of Spatio-Temporal Characteristics of Flash Drought and Slowly-Evolving Drought Using Soil Moisture Percentile. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, **37**, 114-122.
- [36] Christian, J.I., Basara, J.B., Hunt, E.D., Otkin, J.A., Furtado, J.C., Mishra, V., *et al.* (2021) Global Distribution, Trends, and Drivers of Flash Drought Occurrence. *Nature Communications*, **12**, Article No. 6330. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26692-z>
- [37] Sun, J., Zhang, Q., Liu, X., Sun, J., Chen, L., Wu, Y., *et al.* (2024) Flash Droughts in a Hotspot Region: Spatiotemporal Patterns, Possible Climatic Drivings and Ecological Impacts. *Weather and Climate Extremes*, **45**, Article ID: 100700. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2024.100700>
- [38] Jin, L., Zhang, J., Wang, R., Zhang, M., Bao, Y., Guo, E., *et al.* (2019) Analysis for Spatio-Temporal Variation Characteristics of Droughts in Different Climatic Regions of the Mongolian Plateau Based on Spei. *Sustainability*, **11**, Article No. 5767. <https://doi.org/10.3390/su11205767>
- [39] 陈治仲, 陈上, 縑子仪, 等. 黄淮海平原植被日光诱导叶绿素荧光对骤旱的响应[J]. 农业机械学报, 2024, 55(10): 327-338.