

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2025.06.028

基于多源数据的中国干旱趋势及驱动要素分析

朱晓群, 王双银

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 在全球气候变化背景下, 中国干旱化趋势加剧, 对水资源与生态系统构成严峻威胁。然而, 干旱演变过程存在显著的时空异质性和驱动机制不确定性。本研究基于 GSWP3、CRU_TS 和 TerraClimate 三套多源气象数据, 分析了 1951—2024 年中国干旱指数 (Aridity Index, AI) 及干旱区面积的时空变化特征。结果表明: 全国旱地面积显著扩大, 干旱指数整体下降, 西北、华北和东北地区干旱化尤为突出。大气蒸发需求 (Atmospheric Evaporative Demand, AED) 的增强是干旱加剧的主要驱动力, 其对干旱指数下降的相对贡献在多数区域超过 70%, 在旱地扩张中的贡献率分别为 77.5%、97% 和 99.1%。相比之下, 降水变化影响较为有限, 仅在局部地区发挥缓解作用。研究揭示了中国干旱演变的复杂性与空间异质性, 为干旱风险评估及水资源适应性管理提供了科学依据。

关键词: 干旱; 大气蒸发需求; 趋势分析; 时空演变; 气候因子

中图分类号: S342.1; P426

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)06-0200-09

Drought Trends and Driving Factors in China Based on Multi-source Data

ZHU Xiaqun, WANG Shuangyin

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Drought in China has intensified with ongoing climate change, posing growing risks to water security and ecosystem stability. Nevertheless, the evolution of drought exhibits pronounced spatial-temporal heterogeneity and uncertainty in its driving mechanisms. Using three independent climate datasets (GSWP3, CRU_TS, and TerraClimate), this work systematically examined the spatiotemporal variations of the aridity index (AI) and dryland expansion in China from 1951 to 2024. Results indicated that a significant expanded of dryland areas and an overall declined in AI, with accelerating drought severity in Northwest, North, and Northeast China. Attribution analysis highlighted rising atmospheric evaporative demand (AED) as the dominant driver, contributing more than 70% to AI reduction in most regions, and accounting for 77.5%, 97%, and 99.1% of dryland expansion in the three datasets, respectively. In contrast, precipitation changes exerted weaker and regionally limited effects, sometimes alleviating drought locally. These findings underscored the complexity and spatial heterogeneity of drought evolution in China, providing a scientific basis for drought risk assessment and adaptive water resource management.

Keywords: drought; atmospheric evaporative demand; trend analysis; spatial temporal variability; climatic factor

干旱指由降水显著减少引发的土壤水分短缺和生态系统生产力下降的气象异常事件^[1]; 而干旱地区(旱地)泛指降水长期难以满足蒸散需求、生态系统持续处于水分亏缺状态的区域^[2]。这类区域通

常土壤贫瘠、植被稀疏、生态系统脆弱, 约占全球陆地面积的 41%, 支撑着超过 38% 的人口, 广泛分布于干旱半干旱带、季风边缘地带和温带草原区^[3-4]。全球变暖加剧与大气蒸发需求 (atmospheric evapora-

收稿日期: 2025-06-29

修稿日期: 2025-09-11

基金项目: 陕西水利科技计划项目 (2019slkj-03); 西北农林科技大学科技发展基金 (A2990215215)

作者简介: 朱晓群 (1969—), 男, 实验师, 主要从事水利水电工程教学工作。E-mail: 64700224@qq.com

通讯作者: 王双银 (1969—), 男, 副教授, 主要从事水文极值事件和水资源配置方面的研究工作。E-mail: wshy0806@nwsuaf.edu.cn

tive demand, AED)持续上升,导致多个区域干旱的频率、强度^[5]和持续时间显著增加^[6-7],旱地范围亦呈扩张趋势^[8]。这些变化不仅威胁区域水资源与生态安全,还可能加剧生物多样性丧失和土地退化^[9-10]。然而,部分区域观测到的“绿化”现象,与预期的荒漠化扩展不符,凸显了干旱演化过程的高度复杂性和区域异质性,其气候驱动机制认识仍存在显著不确定性。

在全球干旱加剧的背景下,中国干旱化态势尤为严峻^[11-13]。干旱频发、强度增强、范围扩大等现象在中国北方、西北、东北及西南等地区持续显现,对农业生产、水资源供给和生态系统稳定构成多重威胁,已成为制约经济社会可持续发展的关键因素^[14-18]。同时,中国旱地面临严重的土地退化与荒漠化风险,近年因荒漠化导致的直接经济损失每年高达数百亿元^[19-20]。这一过程受气候变化与人类活动的双重驱动,表现出显著的时空异质性和长期累积效应^[21-22]。尽管中国实施了“退耕还林”、“三北防护林”等重大生态工程,在防治土地退化与荒漠化方面取得显著成效^[23],但在持续变化的气候背景下,干旱演变趋势仍具高度不确定性^[24]。因此,亟需整合多源观测数据,系统开展中国地区干旱时空演化特征、趋势及其气候驱动机制的监测与归因研究,为提升国家生态安全与资源管理能力提供科学支撑。

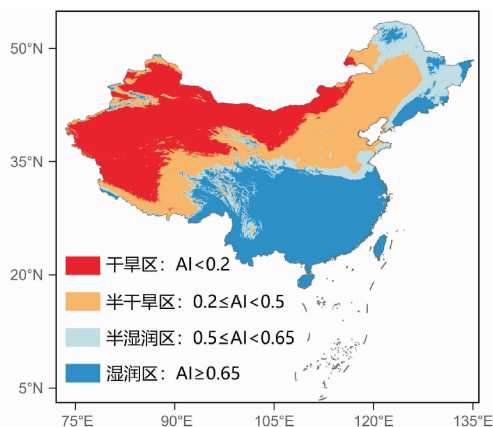
针对当前中国干旱地区在气候变化背景下日益加剧的演化趋势及其驱动机制仍存在不确定性的问题,本研究旨在基于多源观测与再分析数据,系统分析中国干旱的时空变化特征及其主要气候驱动因素。具体研究目标包括:①识别中国干旱地区的时空演变特征;②分析干旱指数(Arid Index, AI)对降水与大气蒸发需求两个气候因子的敏感性;③量化降水与大气蒸发需求变化对中国旱地扩张的相对贡献。成果有望提升对中国干旱变化过程的理解,为区域生态恢复、水资源配置及气候适应政策制定提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究以中国典型干旱区为主要研究区域,地理范围介于73°E—135°E、18°N—54°N之间(如图1)。依据干旱指数(Aridity Index, AI)的气候划分标准^[19],将全区划分为四类气候区域:湿润区($AI \geq 0.65$)、半湿润区($0.5 \leq AI < 0.65$)、半干旱区(0.2

$\leq AI < 0.5$)和干旱区($AI < 0.2$)^[8]。研究重点为典型干旱区,主要包括西北干旱区(涵盖塔里木盆地、准噶尔盆地等地)、内蒙古高原干旱区及青藏高原西北部干旱区。这些区域地处内陆或高原,降水稀少、年际变率大,年均降水量自东向西由约400 mm递减至不足50 mm,同时太阳辐射强,大气蒸发需求旺盛,生态系统对水分变化高度敏感,属于中国土地荒漠化与沙化发生的重点区域。



注:本图基于“全球干旱指数和潜在蒸散发数据集(1970—2000)”^[20]绘制。

图1 研究区概况与中国典型干旱区分布

1.2 数据来源

1.2.1 GSWP3-W5E5

为促进“能量-水-碳”循环及其相互作用的研究以及模型评估,全球土壤湿度项目第三阶段(the Global Soil Wetness Project Phase 3, GSWP3)开发了一个百年尺度的气候强迫数据集^[25-26],该数据集已广泛应用于全球和区域尺度的气象与水文研究^[27-28]。GSWP3 大气强迫数据的空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$,时间分辨率为3 h,覆盖陆地和海洋区域,时间范围从1901年至2019年。其中,降水数据基于两步偏差矫正:首先使用美国气候预测中心(Climatic Prediction Center, CPC)的统一降水分析产品(Unified Gauge-Based Analysis of Global Daily Precipitation)进行日尺度校正;随后采用全球降水气候中心(Global Precipitation Climatology Centre, GPCC)的月尺度降水产品进行长期月尺度校正^[21]。此外,其他气象变量则使用气候研究单位(Climatic Research Unit, CRU)数据集和辐射预算测量(Surface Radiation Budget, SRB)产品进行偏差矫正,以确保百年时间尺度上高分辨率气象强迫数据的可靠性。本研究选取1951—2019年的GSWP3-W5E5数据段。

1.2.2 CRU_TS v4.08

气候研究单位时间序列 (Climatic Research Unit Time-Series, CRU_TS) 数据集是广泛使用的高分辨率气候数据,由东安格利亚大学气候研究单位制作^[29-31]。CRU_TS 于 2000 年首次发布,采用角距离加权将气候变量插值到不包括南极洲的陆地 0.5° 格点。数据集持续更新来自多个来源的每月陆地气象站观测数据(包括降水、温度、蒸气压等),并不断改进处理方法。最新版本 CRU_TS v4.08 于 2024 年 6 月发布,覆盖 1901—2023 年。本研究选取了 1951—2023 年的数据段。

1.2.3 TerraClimate

TerraClimate 气象数据集提供从 1958 年至今的高空间分辨率 ($1/24^\circ$, 约 4 km)、月度气候与气候水平衡估计的长期时间序列^[25],可用于分析多年代际气候变化趋势。该数据集通过气候辅助插值技术,将 WorldClim 提供的高分辨率气候距平值与 CRU_TS v4.0 和日本 55 年再分析数据^[26]的较粗时变信息相结合,同时考虑地形等环境因子,从而获得更高的空间精度和一致性。此外,TerraClimate 对温度等变量采用复杂的偏差校正技术,以确保与地面观测更好一致。本研究选取 1958—2024 年的数据段。

本研究中使用上述三个数据集中的以下七个气象变量:最高和最低温度(2 m 高度处)、总降水量、近地面相对湿度、向下太阳辐射通量、近地面气压,以及风速。除降水量外,其余变量均用于计算大气蒸发需求。

1.3 干旱指数计算

干旱指数(无量纲)是年降水量与年大气蒸发需求的比率^[8],如式(1)所示。本研究使用 Penman-Monteith 模型计算大气蒸发需求^[32],如式(2)所示。Penman-Monteith 模型具有理论基础完善、适用性广的优势,能够综合考虑可用能量、相对湿度和风速等多种气象要素,从而在反映干旱过程的物理机理方面表现出较高的稳健性^[33]。此外,该模型的计算结果与多个地区蒸发皿观测变化的长期证据一致,进一步验证了其可靠性^[34-35]。

$$AI = \frac{P_{\text{ann}}}{AED_{\text{ann}}} \quad (1)$$

$$AED = \frac{0.408S(R_n - G) + \gamma u_2 (e_s - e_a) [900 / (T + 273)]}{S + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (2)$$

式中:AI 为干旱指数; P_{ann} 为年总降水量,mm/a;

AED_{ann} 为年总大气蒸发需求,mm/a; AED 为大气蒸发需求,mm/月; R_n 为净辐射, $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{日})$; G 为土壤热通量, $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{日})$; γ 为湿度常数, $\text{kPa}/^\circ\text{C}$; T 为气温, $^\circ\text{C}$; u_2 为距地表 2 m 处的风速, m/s ; S 为蒸气压赤字曲线的斜率, $\text{kPa}/^\circ\text{C}$; e_s 为温度 T 下的饱和蒸气压, kPa ; e_a 为实际蒸气压, kPa 。

1.4 斜率分析

采用非参数 Mann-Kendall 检验和 Theil-Sen 估计器分析干旱指数和旱地面积变化趋势的方向、幅度及统计显著性。Theil-Sen 估计器是一种用于估计两个变量之间线性关系斜率的稳健方法^[36]。当使用此方法识别随时间变化的数据变化时,将计算所有有序时间点斜率的中位数用作总斜率的估计值(即 Sen 的斜率)。Theil-Sen 估计器获得的结果对异常值不敏感,因此对于偏态分布和异方差数据,该方法比最小二乘法更准确。而 Mann-Kendall 检验作为一种非参数方法,则用于评估所检测到的趋势是否具有统计显著性(例如,是否在 $p < 0.05$ 水平上显著),它通过评估时间序列数据值顺序的一致性来判断是否存在单调上升或下降趋势。

1.5 贡献率分析

为量化降水与大气蒸发需求对干旱指数趋势的相对贡献,本研究参考文献[5]的方法,设置了两种敏感性试验:一是将降水固定于气候平均状态(Pclim 情景),二是将大气蒸发需求固定于气候平均状态(AEDclim 情景)。干旱指数趋势中由大气蒸发需求或降水所贡献的部分,通过比较“全变化情景(obs)”与相应固定情景(Pclim 或 AEDclim)下干旱指数趋势的差异来估算。具体地,大气蒸发需求的贡献率计算公式为:

$$C_{\text{AED}} = \frac{|T_{\text{obs}} - T_{\text{pclim}}|}{|T_{\text{obs}} - T_{\text{pclim}}| + |T_{\text{obs}} - T_{\text{AEDclim}}|} \quad (3)$$

式中: C_{AED} 为大气蒸发需求的贡献率; T_{obs} 为观测干旱指数趋势; T_{pclim} 为降水固定于气候平均状态情景的干旱指数趋势; T_{AEDclim} 为大气蒸发需求固定于气候平均状态情景的干旱指数趋势。

降水贡献率(C_p)的计算方法类似。该方法能有效分离两因子对干旱指数趋势变化的相对影响。

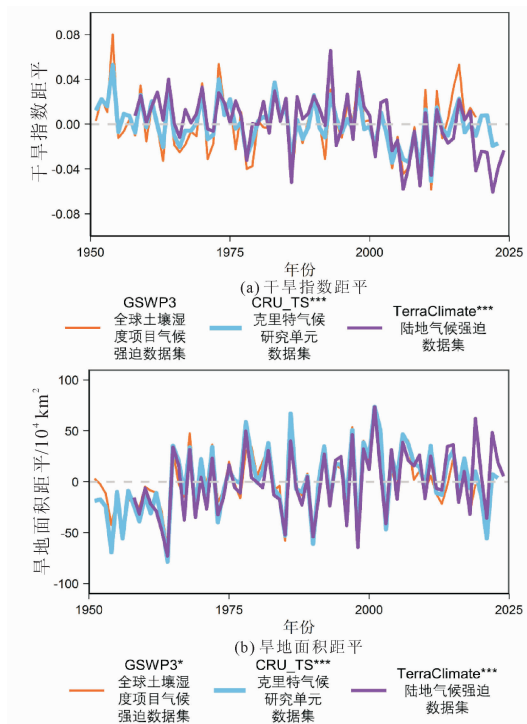
2 结果与分析

2.1 中国地区干旱状况的时空演变特征

图 2 和图 3 系统展现了中国地区干旱时空演变特征,基于 GSWP3、TerraClimate 和 CRU_TS 三套气

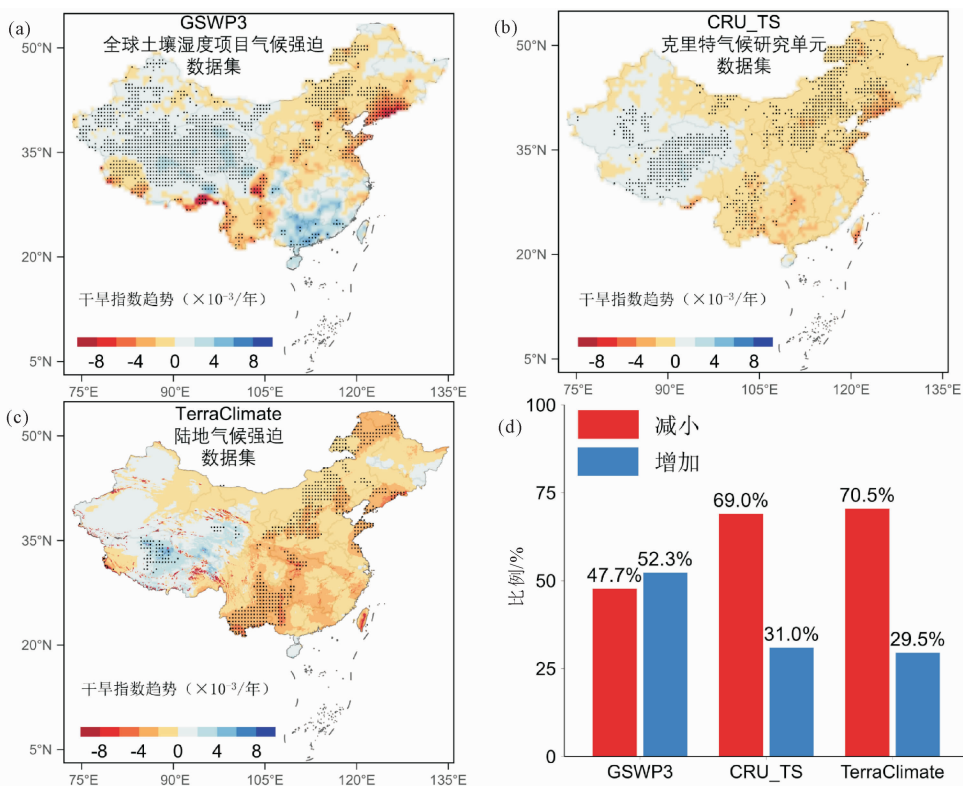
候再分析数据的分析结果在整体干旱变化的识别上表现出较高的一致性,并分别反映出不同数据源在干旱监测中的特点。时序上,自 1951 年至 2024 年,中国地区干旱指数距平呈现出明显的年际波动,尽管不同数据在部分时段存在一定差异,但整体上均指示出干旱化加剧的趋势(图 2(a))。特别是在 20 世纪中后期及 21 世纪初期,干旱指数频繁出现正负距平交替,反映出中国地区经历了多次干湿状态的转换。三套数据所反映的旱地面积变化也较为一致,进一步印证了干旱影响范围扩大的总体趋势(图 2(b))。旱地面积变化与干旱指数距平在年际波动上表现出协同性,体现了干湿变化在空间范围上的响应。

在空间分布方面,三套数据共同显示中国北方地区、西北内陆和华南沿海等地存在较为一致的干旱化加剧趋势;部分地区如东北、西南和长江中下游则显示出湿润化趋势(图 3(a)—图 3(c))。不同数据在干旱趋势的空间细节上存在一定差异:例如, TerraClimate 数据在青藏高原东部和华北地区表现出更显著的干旱化趋势,而 GSWP3 与 CRU_TS 在西南及黄淮地区的一致性较高。这些差异可能源于各再分析数据在气象要素模拟中的系统偏差,从而影



注:*, **, *** 分别表示趋势通过置信水平 90%、95% 和 99% 的斜率 *t* 检验。

图 2 中国地区 1951—2024 年干旱指数和旱地面积的年际变化



注:(a)—(c)黑色表示该格点趋势通过 99% 置信水平的斜率 *t* 检验。

图 3 中国地区干旱指数长期变化的空间趋势

响了干旱趋势的空间刻画。从干旱变化趋势的面积占比来看,CRU_TS 和 TerraClimate 中干旱化趋势(干旱指数减小)的区域比例较高,而 GSWP3 中干旱化与湿润化趋势的区域比例较为接近(图 3(d))。综上所述,中国干旱时空演变表现出明显的区域差异和多源数据带来的不确定性,但多数数据表明典型干旱区总体呈加剧干旱趋势。

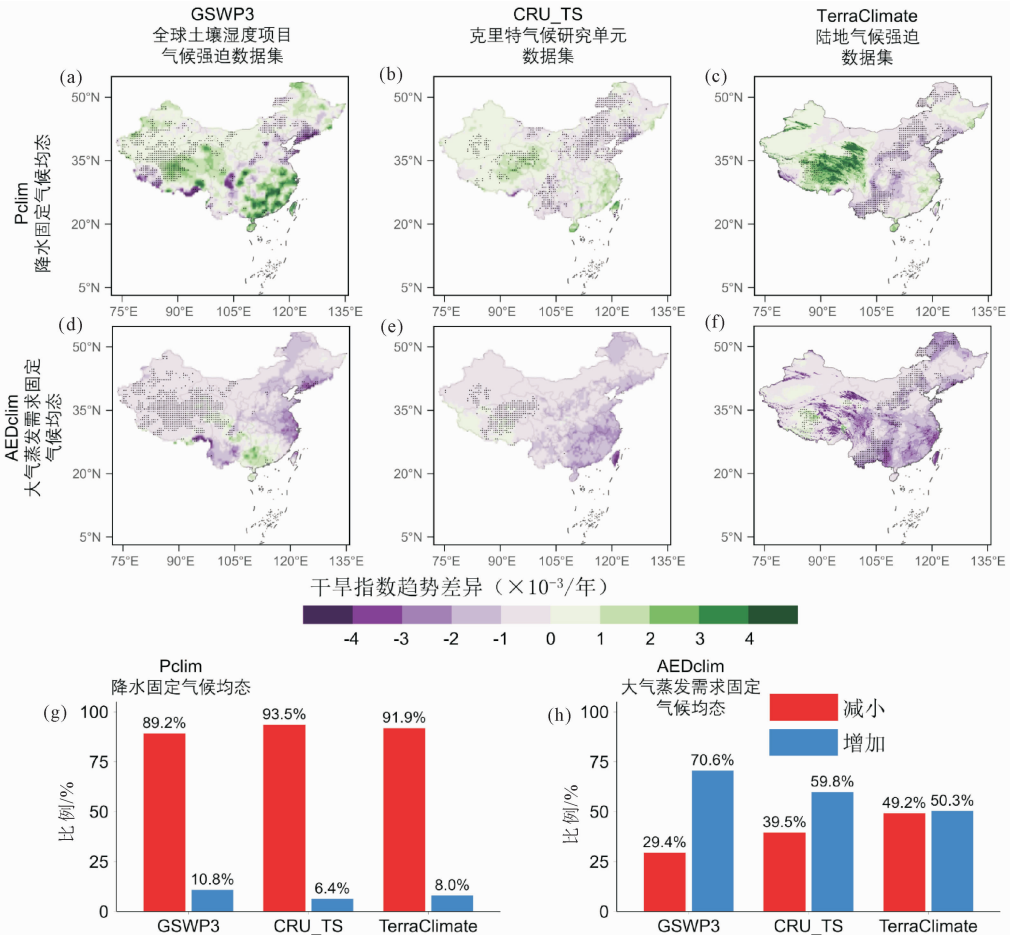
2.2 中国地区干旱指数变化的主要气候驱动因素

为量化降水与大气蒸发需求对中国干旱指数长期变化的相对贡献,本研究基于 GSWP3、CRU_TS 和 TerraClimate 三套数据,分别构建两种敏感性试验:将降水固定于气候平均状态(Pclim 情景),以及将大气蒸发需求固定于气候平均状态(AEDclim 情景)。参考文献[5]的方法,干旱指数趋势中由大气蒸发需求或降水所贡献的部分,通过比较“全变化情景(Obs)”与相应固定情景(Pclim 或 AEDclim)下干旱指数趋势的差异来估算。

在 Pclim 情景下(图 4(a)—图 4(c)),干旱指数的下降趋势在中国西南、华北和东北等干旱化显

著区域明显减弱,表明大气蒸发增加是这些地区干旱加剧的重要驱动因素。相比之下,在西北干旱区与青藏高原边缘等地,干旱指数仍呈上升趋势,反映出大气蒸发需求的减弱有助于缓解干旱。从像元比例来看(图 4(g)),Pclim 情景下全国干旱加重区域的比例显著上升(GSWP3:89.2%;CRU_TS:93.5%;TerraClimate:91.9%),进一步凸显大气蒸发需求增加对干旱化的放大作用。

在 AEDclim 情景下(图 4(d)—图 4(f)),降水变化成为影响干旱指数趋势的主要因素。该情景下干旱指数下降趋势在东北平原、黄淮流域及西北地区普遍减缓,与观测到的干旱化空间格局高度一致。同时,全国干旱指数增加区域的比例有所提高(GSWP3:70.6%;CRU_TS:59.8%;TerraClimate:50.3%)。与 Pclim 情景下干旱减缓区域比例(如 GSWP3 中仅 10.8%)的对比表明,大气蒸发需求增加是近年来中国干旱加剧更广泛且更关键的气候驱动因子。



注:(a)—(f)黑色表示该格点趋势通过99%置信水平的斜率 t 检验。

图 4 中国地区干旱指数变化的驱动因子分析

图5进一步展示了两因子对干旱指数趋势相对贡献的空间格局。青藏高原大部、西北干旱区及华北平原的干旱指数负趋势主要归因于降水减少(贡献率>50%)。而在华中地区、东北平原及黄淮流域,大气蒸发需求增加的贡献占主导地位,多数区域

贡献率超过70%。CRU_TS数据在华北平原显示的降水正贡献区域范围小于GSWP3和TerraClimate,反映出数据间的一定差异。总体而言,大气蒸发需求增加在全国多数区域是干旱指数下降及干旱加剧的主导驱动力。

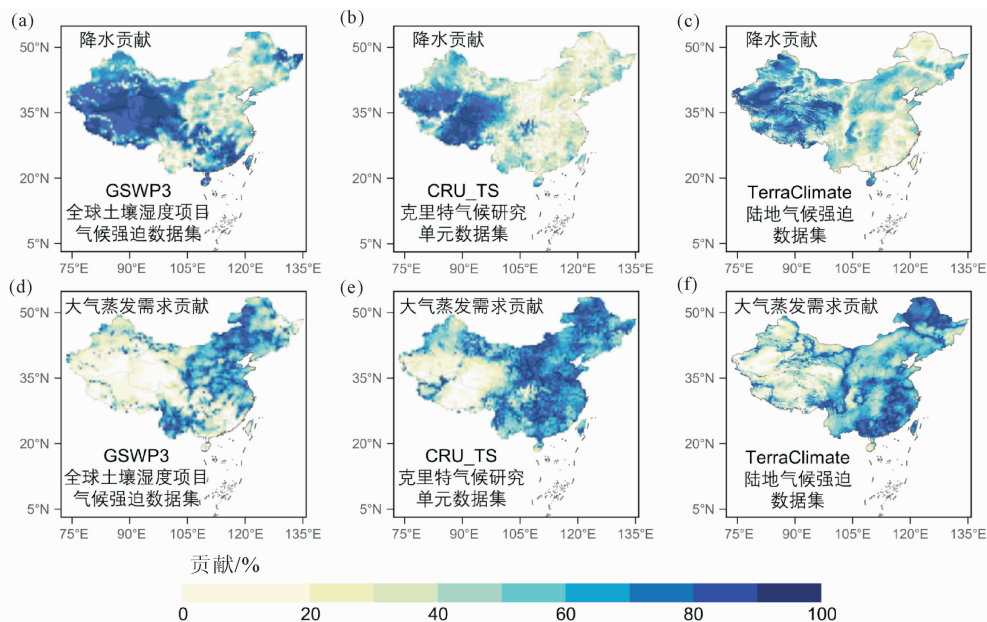
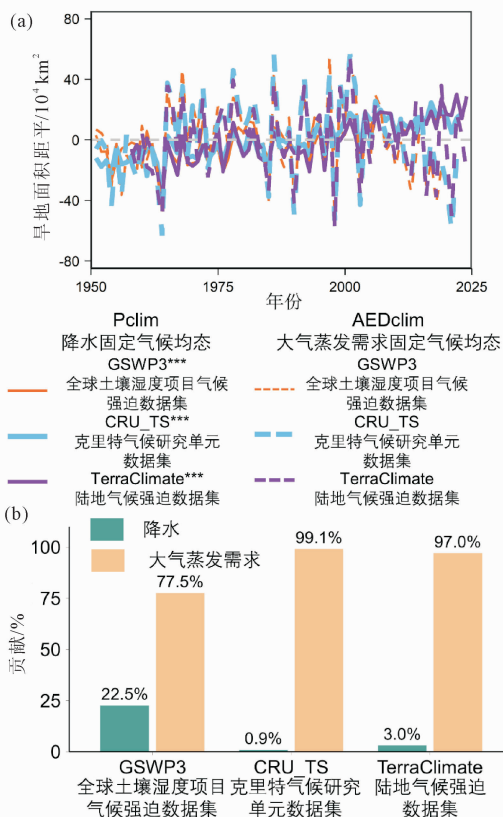


图5 中国地区干旱指数动态驱动要素贡献空间格局

2.3 中国地区旱地扩张的气候驱动机制分析

在识别干旱指数演变主控因子的基础上,本研究进一步探讨了气候因子对中国旱地范围变化的驱动机制。基于GSWP3、CRU_TS和TerraClimate三套数据,通过构建降水固定于气候平均态(Pclim)和大气蒸发需求固定于气候平均态(AEDclim)两类敏感性情景,评估了干旱面积(干旱指数 $AI < 0.65$)的演变趋势。三套数据一致显示,1951—2024年间中国旱地面积呈现显著上升趋势,印证了干旱程度加剧与旱地空间扩张的紧密关联。在降水固定于气候平均态情景下,降水维持多年平均状态,旱地面积显著扩大($p < 0.01$),明确揭示了大气蒸发需求增强是驱动旱地扩张的关键因子。相反,在大气蒸发需求固定于气候平均态情景下,旱地面积变化对降水波动表现出更高的敏感性,但旱地面积长期并无显著趋势。这一对比清晰表明,降水与大气蒸发需求在主导旱地动态变化上存在显著差异。

从全国尺度的归因结果来看,中国旱地面积的变化主要受大气蒸发需求增加的主导影响(图6(b))。三套气候数据均表明,旱地扩张过程中由大气蒸发需求变化解释的贡献显著高于降水变化,占比分别达到77.5%、97%和99.1%。相比之下,降水



注:***表示趋势通过置信水平99%的斜率 t 检验。

图6 中国地区旱地面积变化及其主导气象因子识别结果

变化虽在一定年份对旱地范围具有影响,但其作用主要表现为与大气蒸发需求的变化共同放大干旱程度,而非长期主导趋势。由于气温升高导致大气蒸发需求增加,是驱动中国旱地面积持续扩大的关键气候因素;降水的年际波动则主要在区域和短期尺度上调节旱地变化的年际波动。总体而言,中国旱地扩张可以归因于大气蒸发需求增强的主导效应与降水变化的次级作用的综合影响,这揭示了干旱演化过程中复合气象因子的协同驱动机制。

3 讨论

本研究利用多源数据,系统分析了 1951—2024 年间中国干旱指数和干旱区面积的时空变化。结果发现,全国旱地面积明显扩大,干旱指数整体呈下降趋势,尤其在西北、华北和东北地区,干旱化问题更加突出。机制分析表明,大气蒸发需求增加是主要驱动因素,对干旱指数下降的贡献在大部分地区超过 70%。这些结果与近年其他关于中国干旱变化的研究大体一致,不过在区域细节、因子贡献以及数据方法上仍存在若干值得讨论的异同点。

从区域变化来看,本研究显示中国干旱趋势存在明显的空间差异:北方多数地区干旱加重,而西南部分区域反而呈现湿润化趋势。这一点与基于标准化降水蒸散指数(SPEI)等指数的研究结论较为吻合^[12,13,17]。例如,孙嘉敏等^[12]指出西南地区、黄土高原和东北南部干旱加剧,而西北东部和华北部分地区呈现变湿特征;刘杨奕等^[14]也指出西北地区整体呈现“东干西湿”的格局。这种区域差异可能与大气环流调整、季风减弱及青藏高原热力作用有关。

在干旱驱动机制方面,本研究强调大气蒸发需求是关键气候因子,其影响超过降水变化。这一发现与 Gebrechorkos 等的全球分析及 Xu 等对中国干旱区驱动机制的研究高度一致^[5,37]。Gebrechorkos 等^[5]指出,在全球尺度上大气蒸发需求对干旱加剧的贡献可达 40%,尤其在干旱半干旱区更为显著;Xu 等^[37]也认为在干旱区,蒸散发变化的作用不容忽视,且标准化降水蒸散指数(SPEI)对大气蒸发需求的敏感性高于标准化降水指数(SPI)。值得一提的是,本研究采用 Penman-Monteith 模型计算大气蒸发需求,该模型综合考虑温度、湿度、辐射与风速等多要素,相较于仅依赖温度或降水的指标更具物理机制优势。

然而,当前研究仍存在一定不确定性。首先,不

同干旱指数因计算方法和参数不同可能导致结论差异。例如孙嘉敏等^[12]发现,在干旱半干旱区,标准化降水蒸散指数(SPEI)与标准化降水指数(SPI)、帕尔默干旱指数(scPDSI)的结果不一致,而在湿润区一致性较高;史尚渝等^[15]也指出不同指数识别的干旱面积与强度在时空上存在偏差。其次,所使用的再分析数据与融合产品虽覆盖广、时序长,但在气象站点稀疏地区(如青藏高原与西北干旱区)可能存在较大误差^[38],影响趋势判断。此外,干旱不仅受气候系统内部变率影响,还与土地利用、植被变化及水资源管理等人类活动密切相关^[10],目前对这些因素的量化仍较薄弱。

未来可进一步融合高分辨率气象预报与地表过程模型,提升干旱监测和预警能力。

总之,本研究从多源数据融合与机制分析角度揭示了大气蒸发需求在中国干旱化过程中的关键作用,为干旱风险管理提供科学依据,对制定区域水资源适应策略具有参考价值。

4 结论

本研究基于 GSWP3、CRU_TS 和 TerraClimate 三套气象数据,系统分析了 1951—2024 年中国干旱指数及干旱区面积的时空变化特征。这三类数据分别源自陆面模式、站点插值产品和再分析数据集,具有不同的时空覆盖范围,有助于更全面地揭示中国干旱演变的基本规律。采用 Mann-Kendall 趋势检验与 Theil-Sen 估计方法进行统计评估,并设置降雨固定于气候平均态与大气蒸发需求固定于气候平均态两组敏感性试验,以辨析不同气候因子对干旱过程的影响。得到如下结论:

(1) 全国干旱区面积显著增加,干旱指数总体呈下降趋势,反映出干旱程度持续加剧,其中西北、华北和东北地区干旱化趋势尤为突出。

(2) 大气蒸发需求的增加是干旱化和干旱区扩展的主要驱动因素,而降水变化的影响相对较弱,仅在局部地区对干旱进程表现出一定的缓解作用。

(3) 降水与大气蒸发需求对干旱趋势的相对贡献存在明显的区域差异,体现出中国干旱演化过程的复杂性和空间异质性。

参考文献:

- [1] Middleton N, Thomas D. World Atlas of Desertification [M]. Oxford Univ. Press, 1997.
- [2] D'odorico P, Porporato A. Dryland Ecohydrology [M].

- Springer, 2019.
- [3] Reynolds J F, Smith D M S, Lambin E F, et al. Global desertification: building a science for dryland development[J]. *Science*, 2007,316:847-851.
- [4] Berdugo M, Kéfi S, Soliveres S, et al. Plant spatial patterns identify alternative ecosystem multifunctionality states in global drylands[J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2017,1(2):0003.
- [5] Gebrechorkos S H, Sheffield J, Vicente-Serrano S M, et al. Warming accelerates global drought severity[J]. *Nature*, 2025,642:628-635.
- [6] Chen L, Brun P, Buri P, et al. Global increase in the occurrence and impact of multiyear droughts[J]. *Science*, 2025,387:278-284.
- [7] Petrova I Y, Miralles D G, Brient F, et al. Observation-constrained projections reveal longer-than-expected dry spells[J]. *Nature*, 2024,633:594-600.
- [8] Huang Jianping, Yu Haipeng, Guan Xiaodan, et al. Accelerated dryland expansion under climate change[J]. *Nature Climate Change*, 2016,6(2):166-171.
- [9] Mahecha M D, Bastos A, Bohn F J, et al. Biodiversity loss and climate extremes-study the feedbacks[J]. *Nature*, 2022,612:30-32.
- [10] 胡铁军,张亮. 1961—2020年中国西北地区干旱时空演变特征及其对植被的影响[J]. *节水灌溉*, 2025(4):96-102,117.
- [11] 刘晓勇. 基于 SPEI 的中国百年干旱时空变化特征分析[J]. *水利与建筑工程学报*, 2018,16(5):228-232.
- [12] 孙嘉敏,王爱慧. 近 120 年中国干旱年际变化特征及主要的影响因子[J]. *气候与环境研究*, 2024,29(6):681-694.
- [13] 高晴,孙金伟,赵晓雪,等. 基于 SPEI 的中国干旱多尺度时空特征分析[J]. *节水灌溉*, 2024(6):111-120,127.
- [14] 刘杨奕,毛文静,李思琦,等. 中国西北地区气象干旱时空演变特征[J]. *水资源与水工程学报*, 2022,33(1):86-92.
- [15] 史尚渝,王飞,金凯,等. 基于 SPEI 的 1981—2017 年中国北方地区干旱时空分布特征[J]. *干旱地区农业研究*, 2019,37(4):215-222.
- [16] 李明,王贵文,张莲芝. 基于 SPEI 的中国东北地区干旱分区及其气候特征分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2016,30(6):65-70.
- [17] 贾艳青,张勃,马彬,等. 1960—2015 年中国西南地区持续性干旱事件时空演变特征[J]. *干旱区资源与环境*, 2018,32(5):171-176.
- [18] 刘海,姜亮亮,刘冰,等. 近 40 年中国干旱特征及其对植被变化的影响[J]. *生态学报*, 2023,43(19):7936-7949.
- [19] Fu Fengyu, Wang Shuai, Wu Xutong, et al. Locating hydrologically unsustainable areas for supporting ecological restoration in China's drylands[J]. *Earth's Future*, 2024,12:e2023EF004216.
- [20] 胡云锋,张云芝,韩月琪. 2000—2015 年中国荒漠化土地识别和监测[J]. *干旱区地理*, 2018,41(6):1321-1332.
- [21] 吴凡,杨肖丽,任立良,等. 人类活动影响下的中国各大流域水文干旱状态演变规律[J]. *水利学报*, 2024,55(12):1448-1460.
- [22] 卢冬燕,朱秀芳,刘婷婷,等. 2℃ 温升情景下中国气象干旱特征变化[J]. *干旱区地理*, 2023,46(8):1227-1237.
- [23] Qi Ke, Zhu Jiaojun, Zheng Xiao, et al. Impacts of the world's largest afforestation program (Three-North Afforestation Program) on desertification control in sandy land of China[J]. *GIScience & Remote Sensing*, 2023,60(1):2167574.
- [24] 李占玲,霍鹏颖,叶瀛韬,等. 北京地区干旱预测不确定性来源贡献度量化[J]. *水科学进展*, 2024,35(5):794-804.
- [25] Zomer R J, Xu J, Trabucco A. Version 3 of the Global Aridity Index and Potential Evapotranspiration Database[J]. *Scientific Data*, 2022,9:409.
- [26] Kim H. Global Soil Wetness Project Phase 3 Atmospheric Boundary Conditions (Experiment 1) [C]// 2017, Tokyo/Japan: Data Integration and Analysis System (DIAS).
- [27] Bonan G B, Lombardozzi D L, Wieder W R, et al. Model structure and climate data uncertainty in historical simulations of the terrestrial carbon cycle (1850—2014) [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2019,33:1310-1326.
- [28] Tangdamrongsub N, Han S C, Decker M, et al. On the use of the grace normal equation of inter-satellite tracking data for estimation of soil moisture and groundwater in Australia [J]. *Hydrology Earth System Science*, 2018,22:1811-1829.
- [29] Harris I, Osborn T J, Jones P, et al. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset[J]. *Scientific Data*, 2020,7:109.
- [30] Abatzoglou J, Dobrowski S, Parks S, et al. Terra climate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958—2015[J]. *Scientific Data*, 2018,5:170191.

- [31] Kobayashi S, Ota Y, Harada Y, et al. The JRA-55 re-analysis: general specifications and basic characteristics [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 2015,93(1):5-48.
- [32] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. FAO irrigation and drainage paper 56. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements[M]. FAO, 1996.
- [33] Sheffield J, Wood E, Roderick M. Little change in global drought over the past 60 years [J]. Nature, 2012,491:435-438.
- [34] Liu Yujie, Chen J, Pan Tao. Analysis of changes in reference evapotranspiration, pan evaporation, and actual evapotranspiration and their influencing factors in the North China Plain during 1998—2005 [J]. Earth and Space Science, 2019,6:1366-1377.
- [35] Abtew W, Obeysekera J, Iricanin N. Pan evaporation and potential evapotranspiration trends in South Florida [J]. Hydrological Processes, 2011,25:958-969.
- [36] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau [J]. Journal of the American Statistical Association, 1968,63(324):1379-1389.
- [37] Xu Jinqin, Zeng Yan, Qiu Xinfa, et al. Aridity changes and related climatic drivers in the drylands of China during 1960—2019 [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2021,60:607-617.
- [38] 王开存. 全球大气再分析及其在中国的适用性[J]. 大气科学学报,2025,48(4):529-555.

(上接第 123 页)

- [17] 刘毅. 三峡库区万州区堆积体滑坡地下水响应及稳定性研究[D]. 北京:中国地质大学,2021.
- [18] Strozzi T, Farina P, Corsini A. Survey and monitoring of landslide displacements by means of L-band satellite SAR interferometry [J]. Landslides, 2005,2(3):193-201.
- [19] 吴琼,唐辉明,王亮清. 库水位升降联合降雨作用下库岸边坡中的浸润线研究[J]. 岩土力学, 2009,30(10):3025-3031.
- [20] 彭响龙. 地基不均匀沉降对多层混凝土框架结构的影响分析[D]. 长沙:长沙理工大学,2017.
- [21] 黄立. 库岸边坡稳定性特征及边坡房屋不均匀沉降裂缝分析[D]. 长沙:中南大学,2022.
- [22] Neuman S. Saturated-unsaturated seepage by finite elements[J]. Journal of Hydraulics Division Asce, 2003,99(12):2233-2250.
- [23] 杨金,简文星,杨虎锋. 三峡库区黄土坡滑坡浸润线动态变化规律研究[J]. 岩土力学,2022,33(3):853-858.
- [24] 汪过兵. 湿陷性黄土地基不均匀沉降对砌体结构影响的研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2022.
- [25] 吴铁营. 库水对桥梁基础的影响分析及防护研究[D]. 长沙:中南大学,2020.
- [26] 唐晓松,郑颖人,林成功. 浸润面位置的确定方法对涉水边坡稳定性分析的影响[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(S1):2814-2819.
- [27] 李晓莲,郭亚兵. 岩土体材料特性对土质边坡稳定性影响的敏感性分析[J]. 四川水泥,2023(3):48-50.
- [28] 张瑞金,胡奇凡. 摩尔库伦和修正摩尔库伦本构有限元模拟结果对比分析[J]. 中国房地产业,2015(8):256-258.
- [29] 吴强,吴章利. 摩尔库伦本构模型参数敏感性分析及修正[J]. 陕西水利,2012(2):148-149.
- [30] 董林伟. 数值模拟中常用岩土本构模型及其参数研究[D]. 青岛:青岛理工大学,2011.
- [31] 李翠兰,王冶志. 基于 Geo-Studio 与渗流试验的寒区堤防工程安全性研究[J]. 水利科技与经济,2024,30(6):79-84.
- [32] Cho S E, Lee S R. Instability of unsaturated soil slopes due to infiltration [J]. Computers and Geotechnics, 2001,28(3):185-208.
- [33] 刘英杰,韩秀娟,库永慧,等. 甘肃河西地区山前洪积扇地段水库全库盘土工膜防渗关键技术研究与应用[J]. 水利规划与设计,2019(1):113-115,142.
- [34] 李斌. 尾矿库环保防渗措施设计探讨[J]. 有色冶金设计与研究,2009,30(1):10-11.