

基于SPEI指数的阿克苏地区干旱时空分布特征

杨思慧^{1,2}, 高培^{1,2*}, 李育辉^{1,2}, 王小迪^{1,2}

¹中国气象局气象干部培训学院新疆分院, 新疆 乌鲁木齐

²新疆信息工程学校, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2026年7月15日; 录用日期: 2026年8月27日; 发布日期: 2026年9月4日

摘要

基于1961~2025年阿克苏地区5个气象站点(阿克苏、乌什、拜城、新和、沙雅)的逐日气象资料, 计算了1、3、6、12个月四种时间尺度的标准化降水蒸散指数(SPEI), 并结合Mann-Kendall趋势检验、Sen斜率估计和干旱频率统计, 分析了该地区干旱的年际变化、年代际演变、季节分布及空间格局。结果表明: (1) 近65年来, 阿克苏站和乌什站呈显著干旱化趋势(MK-Z分别为-5.27和-2.41, 均通过95%置信度检验), 沙雅站呈显著湿润化趋势(MK-Z = 2.32), 拜城站和新和站变化不显著, 整体呈“西干东湿”格局。(2) 年代际上, 1990年代为全区最湿润期, 2000年代后干旱明显加剧。(3) 季节上, 春季干旱最重(5站平均频率81.6%), 夏季次之(47.4%), 秋冬较少, 春旱是该地区最突出的季节性特征。(4) SPEI-6和SPEI-12反映的中长期干旱频率普遍高于SPEI-1的短期干旱, 说明该地区中长期水分亏缺问题较为突出。

关键词

SPEI指数, 干旱, 时空分布, M-K检验, 阿克苏地区

Spatiotemporal Distribution Characteristics of Drought in Aksu Region Based on SPEI Index

Sihui Yang^{1,2}, Pei Gao^{1,2*}, Yuhui Li^{1,2}, Xiaodi Wang^{1,2}

¹China Meteorological Cadre Training College (Xinjiang Branch), Urumqi Xinjiang

²Xinjiang Information Engineering School, Urumqi Xinjiang

Received: July 15, 2026; accepted: August 27, 2026; published: September 4, 2026

*通讯作者。

文章引用: 杨思慧, 高培, 李育辉, 王小迪. 基于 SPEI 指数的阿克苏地区干旱时空分布特征[J]. 自然科学, 2026, 14(5): 590-600. DOI: 10.12677/ojns.2026.145063

Abstract

Based on daily meteorological data from five stations (Aksu, Wushi, Baicheng, Xinhe, and Shaya) in the Aksu region from 1961 to 2025, this study calculated the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) at four time scales (1, 3, 6, and 12 months). By integrating the Mann-Kendall trend test, Sen's slope estimator, and drought frequency statistics, the interannual variations, inter-decadal evolution, seasonal distribution, and spatial patterns of drought in the region were analyzed. The results indicate that: (1) Over the past 65 years, the Aksu and Wushi stations exhibited significant aridification trends (MK-Z values of -5.27 and -2.41 , respectively, both significant at the 95% confidence level), whereas the Shaya station presented a significant wetting trend (MK-Z = 2.32). Changes at the Baicheng and Xinhe stations were not statistically significant, resulting in an overall spatial pattern of "dry in the west and wet in the east". (2) On an interdecadal scale, the 1990s marked the wettest period for the entire region, while drought intensified significantly after the 2000s. (3) Seasonally, spring droughts were the most severe, with an average frequency of 81.6% across the five stations, followed by summer (47.4%); droughts were less frequent in autumn and winter, highlighting spring drought as the most prominent seasonal characteristic of the area. (4) The frequency of medium- to long-term droughts, as reflected by SPEI-6 and SPEI-12, was generally higher than that of short-term droughts reflected by SPEI-1, indicating that water deficits in this region are predominantly a medium- to long-term issue.

Keywords

SPEI Index, Drought, Spatiotemporal Distribution, Mann-Kendall Test, Aksu Region

Copyright © 2026 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

干旱是一种发生频率高、影响范围广的气象灾害，在全球气候变暖背景下，其强度和频率均呈加重趋势，对区域水资源安全、粮食生产和生态系统稳定构成严峻挑战[1]。新疆地处欧亚大陆腹地，是我国典型的干旱半干旱区。阿克苏地区位于新疆中部、天山南麓、塔里木盆地北缘，既是塔里木河流域的重要源流区，也是新疆主要的农业生态功能区[2]。该地区降水稀少、蒸发强烈，干旱已成为制约生态和经济发展的关键因素[3]。因此，准确刻画阿克苏地区干旱的时空分布特征，对区域水资源配置、农业防灾减灾和生态保护都具有重要意义。

依据成因差异，干旱可划分为气象干旱、农业干旱、水文干旱和社会经济干旱四类，各类干旱分别由降水匮乏、土壤水分缺失及水资源供需失衡等因素诱发[4]。其中，气象干旱是其余各类干旱发生的核心诱因与本质前提[5]。标准化降水蒸散指数(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI)综合考虑降水量和潜在蒸散量，能够有效表征区域水分盈亏状况，已成为干旱研究的核心指标之一[6]-[8]。与仅依赖降水序列的标准化降水指数(SPI)相比，SPEI 引入了温度敏感的蒸散项，更能识别气候变暖背景下干旱加剧的演变趋势[9][10]。近年来，基于 SPEI 的干旱研究在全球和中国多个区域广泛开展，为揭示干旱时空演变规律提供了有力工具。Cao 等[11]结合 SPEI 指数与植被状态指数(VCI)表征西北地区气象干旱与农业干旱状况，深入剖析两类干旱的演变规律及关键影响因子。Xu 等[12]通过对比三种干旱指数的降水捕捉能力发现，相较于自校准帕尔默干旱强度指数(scPDSI)、标准化降水指数(SPI)，SPEI 指数对气象

干旱特征的拟合效果更好；在中国 70%~80%的区域内，降水年际变化规律与 SPI、SPEI 指数的波动特征高度契合，进一步验证了 SPEI 指数的适用性。任培贵等[13]选取 1959~2011 年西北地区降水与气温气象数据，核算研究区逐年标准化降水蒸散指数(SPEI)，系统分析区域干旱演变特征。研究结果表明，过去 52 年间西北地区整体呈现持续变干的演变趋势；进一步证实 SPEI 指数能够精准适配西北地区干旱特征，在区域干旱灾害识别与表征中具备良好的适用性与可靠性。

目前新疆干旱特征的研究已取得一定进展。轩俊伟[14]指出，新疆在 1987 年前后由普遍干旱期转为相对湿润期，但近十年又出现变干趋势。然而，现有研究多聚焦于新疆全境或北疆地区，针对阿克苏地区利用 SPEI 指数开展长时间序列、多尺度干旱时空格局分析的研究仍较少，且已有工作多采用综合气象干旱指数(CI)或 SPI 进行单点或短序列分析。

基于此，本研究利用 1961~2025 年阿克苏地区 5 个气象站点的逐日气象资料，计算 SPEI-1、SPEI-3、SPEI-6、SPEI-12 四种时间尺度的 SPEI 指数，采用 Mann-Kendall 趋势检验、Sen 斜率估计和干旱频率统计等方法，系统分析该地区干旱的年际变化、年代际演变、季节分布及空间格局，以期为阿克苏地区水资源管理、农业抗旱和生态保护提供科学依据。

2. 资料和方法

2.1. 研究区域概况

阿克苏地区位于新疆天山南麓、塔里木盆地北缘，海拔 940~1300 m，地形北高南低。北部天山形成天然屏障，南部接壤塔克拉玛干沙漠，这种地理格局对当地气候的形成具有决定性影响。年平均气温 9.9℃~11.5℃，昼夜温差显著[15]。

2.2. 数据来源

阿克苏地区共设 9 个国家级气象观测站，但部分站点建站较晚，难以完整覆盖 1961~2025 年的研究时段；同时考虑到本研究需要的逐日气象要素(平均气温、最高气温、最低气温、相对湿度、日照时数、平均气压、10 m 平均风速、日降水量)的完整性，最终筛选出 5 个时序连续、要素齐全的站点：阿克苏站(51628)、乌什站(51629)、拜城站(51633)、新和站(51636)、沙雅站(51639)。1961~2025 年 5 个站点的逐日气象观测数据来自天擎数据平台；数字高程模型(DEM)数据取自地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>)，空间分辨率 90 m。各站点基本信息见表 1。

Table 1. Basic information of 5 meteorological stations in Aksu region
表 1. 阿克苏地区 5 个气象站点基本信息

站点编号	站点名称	经度(°E)	纬度(°N)	海拔(m)	资料年限
51628	阿克苏	80.23	41.17	1104	1961~2025
51629	乌什	79.22	41.22	1395	1970~2025
51633	拜城	81.90	41.78	1229	1962~2025
51636	新和	82.62	41.53	1014	1963~2025
51639	沙雅	82.78	41.22	980	1961~2025

2.3. 研究方法

2.3.1. SPEI 指数

SPEI 指数由 Vicente-Serrano [6]于 2010 年提出，在 SPI 的基础上引入潜在蒸散量(PET)项，通过降水

量(P)与 PET 的差值($D = P - PET$)表征水分盈亏,再采用 log-logistic 概率分布对 D 序列进行拟合,转换为标准化变量。SPEI 兼具 SPI 的多时间尺度特性和帕尔默干旱指数(PDSI)对温度变化的敏感性,能够综合反映降水和气温对干旱的影响,适用于气候变暖背景下的干旱监测。本研究采用 Thornthwaite 方法计算 PET,分别计算 1、3、6、12 个月尺度的 SPEI,依次表征短期气象干旱、季节性干旱、中长期干旱和年际干旱。干旱等级划分标准见表 2。

Table 2. Classification criteria for SPEI drought grades
表 2. SPEI 干旱等级划分标准

SPEI 值	干旱等级	类型
$SPEI > -0.5$	无旱	正常
$-1.0 < SPEI \leq -0.5$	轻旱	轻微干旱
$-1.5 < SPEI \leq -1.0$	中旱	中度干旱
$-2.0 < SPEI \leq -1.5$	重旱	严重干旱
$SPEI \leq -2.0$	特旱	极端干旱

2.3.2. Mann-Kendall 趋势检验

Mann-Kendall (MK)检验是世界气象组织(WMO)推荐的非参数趋势检验方法,适用于长期气候序列的趋势检测。统计量 Z 用于判断趋势的显著性: $|Z| > 1.96$ 表示通过 95%置信度检验, $|Z| > 2.58$ 表示通过 99% 置信度检验。Z 为正表示上升(湿润化)趋势,为负表示下降(干旱化)趋势。

2.3.3. Sen 斜率估计

Sen 斜率通过计算时间序列中两两数据点斜率的中位数来确定趋势变化率,不受异常值影响,比线性回归更能稳健地反映变化趋势。本研究用 Sen 斜率表征各站点 SPEI 的年际变化速率,单位为/年。

3. 近 60 年来阿克苏地区干旱时空演变特征

3.1. 阿克苏地区季节干旱特征

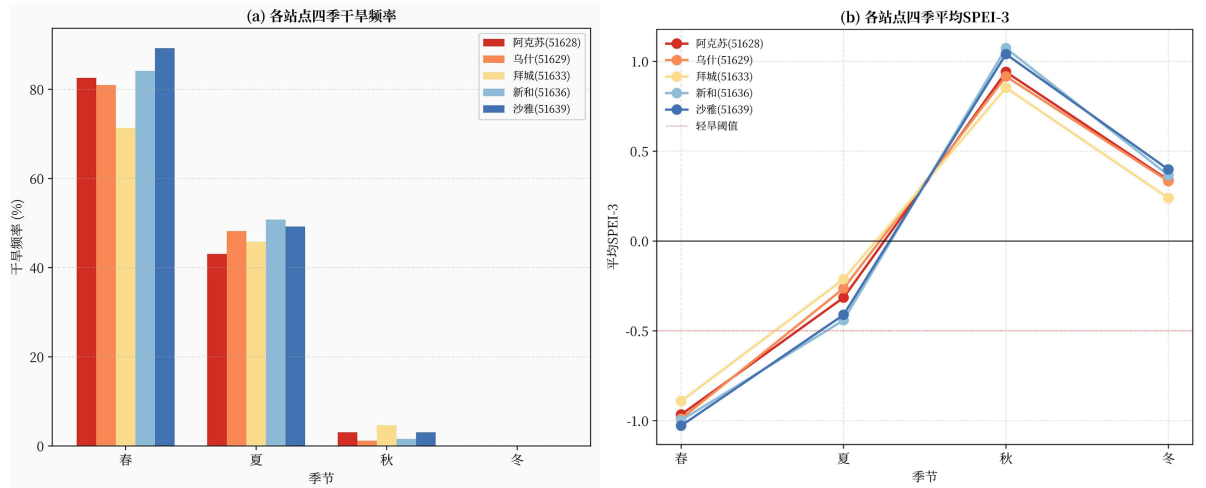


Figure 1. Seasonal drought frequency and average SPEI-3 distribution at 5 stations in Aksu region
图 1. 阿克苏地区 5 个站点季节干旱频率及平均 SPEI-3 分布

基于 SPEI-3 的季节干旱分析可揭示干旱的季节分布规律。本研究将 3~5 月定义为春季、6~8 月为夏

季、9~11 月为秋季、12 月至次年 2 月为冬季，统计 5 个站点各季节的干旱频率及平均 SPEI-3 (图 1)。结果显示，阿克苏地区干旱季节分布呈“春旱最重、夏旱次之、秋冬较少”的特征。

春季是干旱最严重的季节，5 个站点春季干旱频率均超过 70%，其中沙雅站最高(89.23%)，新和站 84.13%，阿克苏站 82.56%，乌什站 80.95%，拜城站相对较低(71.35%)。5 站春季平均 SPEI-3 均为负值，介于-0.89(拜城)至-1.03(沙雅)之间，普遍存在中度以上水分亏缺。这与阿克苏地区春季气温回升快、蒸发强烈、降水稀少且农业用水需求大密切相关。春季正值冬小麦返青拔节和春播作物播种期，严重春旱对农业生产影响较大。

夏季干旱频率次之，5 站介于 43.08% (阿克苏)至 50.79% (新和)之间，平均 SPEI-3 均为负值，介于-0.21(拜城)至-0.44(新和)之间。夏季虽降水相对较多，但气温高、蒸发强，加之灌溉用水量，仍易发生干旱。秋季和冬季干旱频率较低，5 站秋季干旱频率均低于 5%，冬季均为 0%，平均 SPEI-3 均为正值，水分状况相对良好。

3.2. 阿克苏地区干旱年际变化趋势

对各站点 SPEI-12 序列进行 MK 趋势检验(表 3)。阿克苏站 MK-Z 为-5.27 ($P < 0.001$)，呈极显著下降趋势，干旱化最为明显；乌什站 MK-Z 为-2.41 ($P < 0.05$)，亦呈显著下降趋势；沙雅站 MK-Z 为 2.32 ($P < 0.05$)，呈显著上升趋势，即湿润化趋势；拜城站和新和站的检验结果未达显著水平，变化相对平稳。

Sen 斜率估计显示，阿克苏站 SPEI 变化速率为-0.0368/年，下降最快；乌什站为-0.0266/年，干旱化次之；沙雅站为 0.0162/年，呈中等湿润化趋势；拜城站和新和站分别为 0.0051 和 0.0103/年，略有湿润化但不显著。西部站点(阿克苏、乌什)MK-Z 为负且绝对值较大，干旱化显著；东部沙雅站 MK-Z 为正，湿润化显著；中部拜城、新和两站 MK-Z 接近 0，趋势不明显。这种“西干东湿”的格局可能与天山地形阻挡、西风环流变化及局地人类活动等因素有关。

Table 3. Trend test results of SPEI-12 at each station (1961~2025)

表 3. 各站点 SPEI-12 趋势检验结果(1961~2025 年)

站点编号	站点名称	资料年限	多年平均 SPEI	MK-Z 值	Sen 斜率(/年)	趋势显著性
51628	阿克苏	1961~2025	-0.018	-5.27	-0.0368	***
51629	乌什	1970~2025	-0.015	-2.41	-0.0266	*
51633	拜城	1962~2025	-0.008	0.62	0.0051	—
51636	新和	1963~2025	-0.003	1.17	0.0103	—
51639	沙雅	1961~2025	-0.005	2.32	0.0162	*
—	区域平均	1961~2025	-0.012	—	—	—

注：***表示通过 99.9%置信度检验，**表示通过 99%置信度检验，*表示通过 95%置信度检验，—表示未通过显著性检验。

从图 2 可以看出，5 个站点 SPEI-12 的年际波动较为剧烈。阿克苏站和乌什站在 2000 年代以前多处于正值区间，2000 年代后迅速下降至负值，2010 年代后 SPEI-12 持续低于-1.0，处于中度至重度干旱状态。拜城站和新和站波动较为平稳，长期均值接近 0，无明显趋势。沙雅站在 1970 年代经历一段干旱期后逐渐回升，1990 年代后多处于正值区间，湿润化趋势明显。

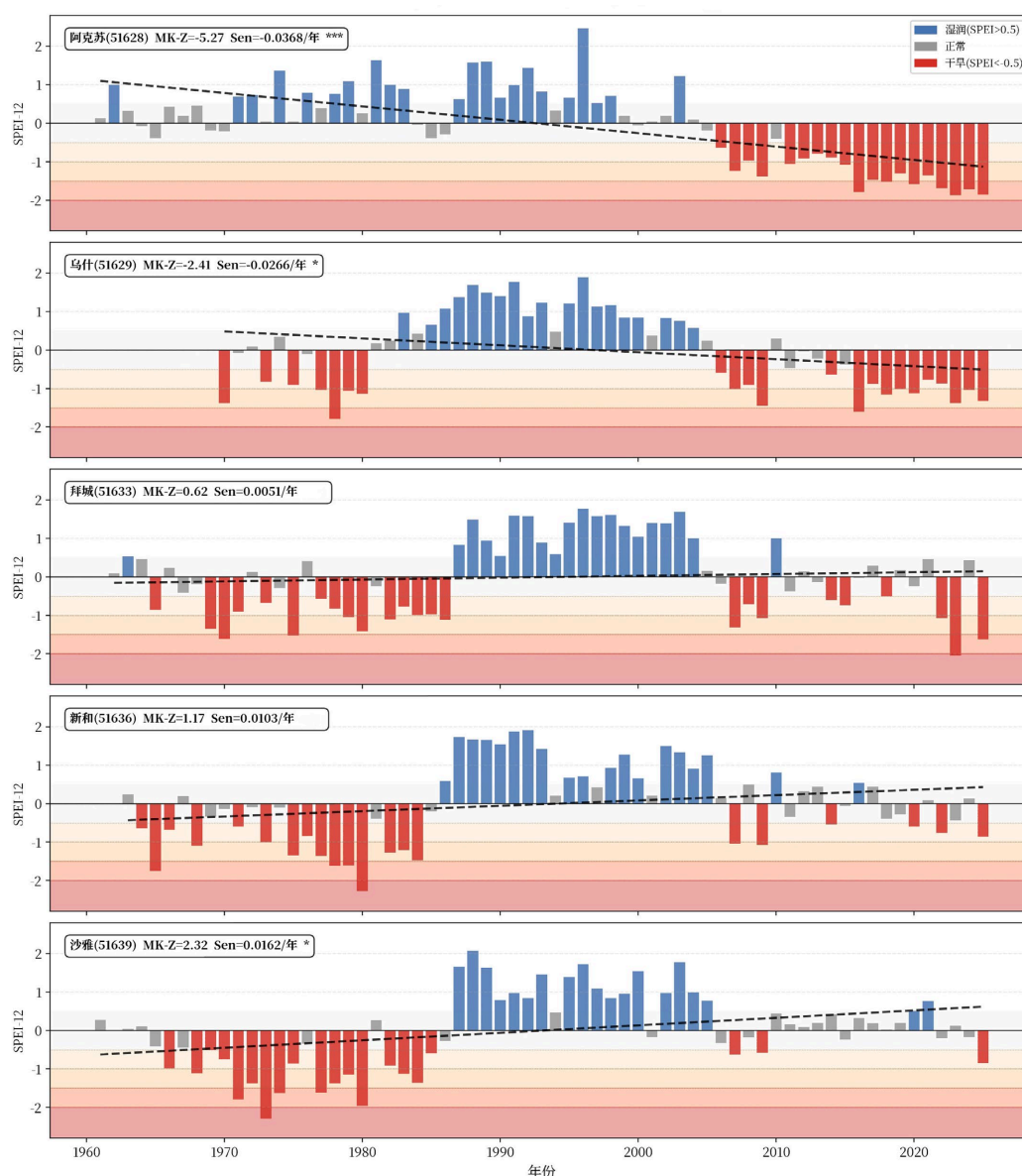


Figure 2. Interannual variation of SPEI-12 at 5 stations in Aksu region from 1961 to 2025

图 2. 1961~2025 年阿克苏地区 5 个站点 SPEI-12 年际变化

3.3. 阿克苏地区年代际干旱演变特征

以 10 年为一个年代际单元,统计各站点不同年代的干旱频率及平均 SPEI-12 (图 3)。结果显示,阿克苏地区干旱的年代际变化可分为 3 个阶段:1960 年代至 1980 年代的相对干旱期、1990 年代的显著湿润期、2000 年代以来的干旱加剧期。

1990 年代是全区最为湿润的时期,5 个站点干旱频率均接近 0%,平均 SPEI-12 分别为 0.94(阿克苏)、1.22(乌什)、1.27(拜城)、1.11(新和)、1.08(沙雅),均处于明显湿润状态,与新疆整体在 1987 年前后由干转湿的节点相吻合。进入 2000 年代后,干旱程度显著加剧。阿克苏站干旱频率由 1990 年代的 0%升至 2000 年代的 35.00%、2010 年代的 93.33%和 2020 年代的 100.00%,平均 SPEI-12 由 0.94 降至-1.64;乌什站干旱频率也由 0%升至 2020 年代的 100.00%,平均 SPEI-12 由 1.22 降至-1.07。

东部站点(拜城、新和、沙雅)2000年代后的干旱加剧趋势相对较弱。沙雅站在2010年代和2020年代的干旱频率仅分别为1.67%和8.33%，仍处于相对湿润状态；新和站由2010年代的10.83%升至2020年代的36.11%，有一定干旱化趋势；拜城站由2010年代的30.83%升至2020年代的44.44%，其中特旱频率达8.33%，极端干旱事件有所增加。整体上，年代际演变呈“西站显著干旱化、东站相对稳定”的空间分异。

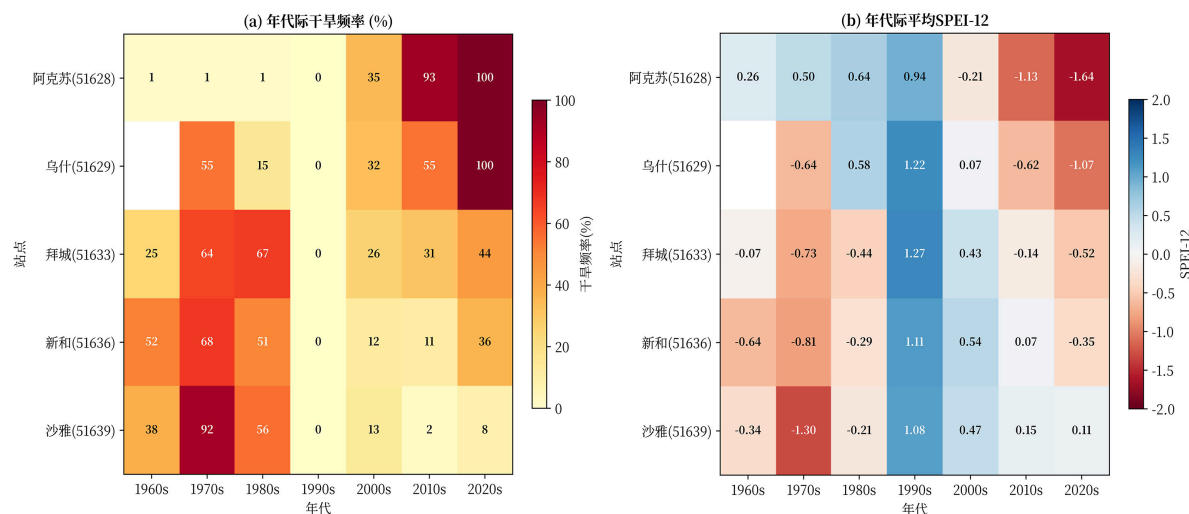


Figure 3. Interdecadal drought frequency and average SPEI variation of SPEI-12 at 5 stations in Aksu region

图 3. 阿克苏地区 5 个站点 SPEI-12 年代际干旱频率及平均 SPEI 变化

3.4. 阿克苏地区干旱频率空间分布特征

不同时间尺度的 SPEI 反映不同类型的干旱：SPEI-1 对应短期气象干旱，SPEI-3 对应季节性干旱，SPEI-6 对应中长期农业干旱，SPEI-12 对应长期水文干旱。对各站点不同尺度 SPEI 的干旱频率空间分布见图 4 和图 5。

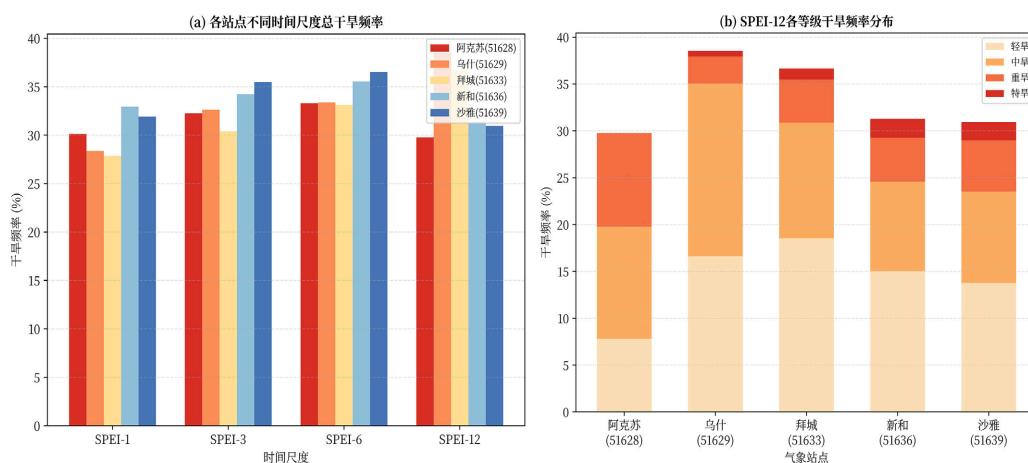


Figure 4. Drought frequency distribution of SPEI at different time scales at 5 stations in Aksu region

图 4. 阿克苏地区 5 个站点不同时间尺度 SPEI 干旱频率分布

总体来看，不同时间尺度 SPEI 对应的干旱频率存在显著时空差异。从站点统计来看，SPEI-6、SPEI-12 表征的中长期干旱发生频率整体高于 SPEI-1 短期气象干旱，区域持续性水分亏缺特征突出；其中乌什

站 SPEI-12 干旱频率达 38.52%，长期水文干旱风险最为严峻，拜城站以轻旱为主，阿克苏、新和、沙雅各尺度干旱频率维持在中等偏高区间，各站点干旱等级结构差异明显。空间上，SPEI-1、SPEI-3、SPEI-6 短期及季节、农业干旱均呈现东高西低的分布特征，东部沙雅、新和季节性干旱风险更高；而 SPEI-12 长期水文干旱空间格局发生反转，西部乌什、温宿、拜城形成干旱高值中心，整体呈“西干东湿”的分异规律。上述结果表明，阿克苏地区干旱风险存在显著尺度依赖性与空间异质性，短期春旱防控重点在东部区域，持续性长期水文干旱防范则需聚焦西部天山南麓站点，区域抗旱水资源管理需依据多时间尺度干旱空间分异特征实施差异化调控。

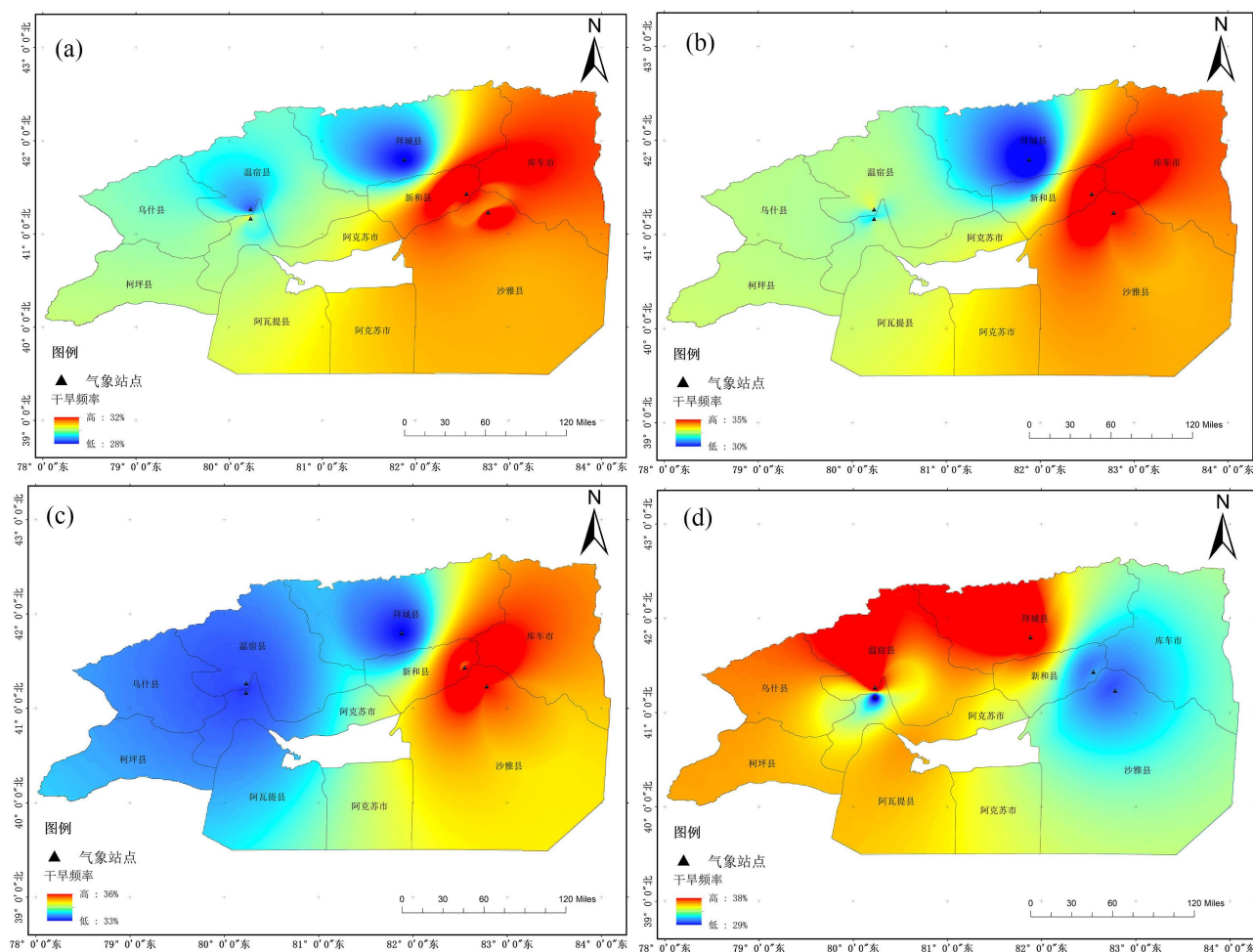


Figure 5. Spatial distribution of drought frequency based on multi-timescale SPEI at five meteorological stations in Aksu region: (a) SPEI-1; (b) SPEI-3; (c) SPEI-6; (d) SPEI-12

图 5. 阿克苏地区 5 个气象站多时间尺度 SPEI 干旱频率空间分布：(a) SPEI-1；(b) SPEI-3；(c) SPEI-6；(d) SPEI-12

为揭示干旱频率的长期变化特征，基于 5 个站点年均 SPEI-12 的算术平均得到区域平均序列，分析 1961~2025 年阿克苏地区干旱的年际和年代际演变(图 6)。

从图 6 可以看出，区域平均 SPEI-12 在 1961~2025 年间呈明显的阶段性变化。1960 年代至 1980 年代波动较大，但整体处于正值区间，干旱较轻；1990 年代最为湿润，区域平均 SPEI-12 持续高于 1.0，1996 年达到历史最高值 1.71；进入 2000 年代后迅速下降，2010 年代后持续低于 -1.0，处于中度至重度干旱状态。就单年而言，1980 年区域平均 SPEI-12 降至研究期最低值 -1.31。从年代际看，区域平均 SPEI-12 由

1990 年代的 1.07 降至 2020 年代的-0.93，降幅达 2.00，干旱化趋势显著。

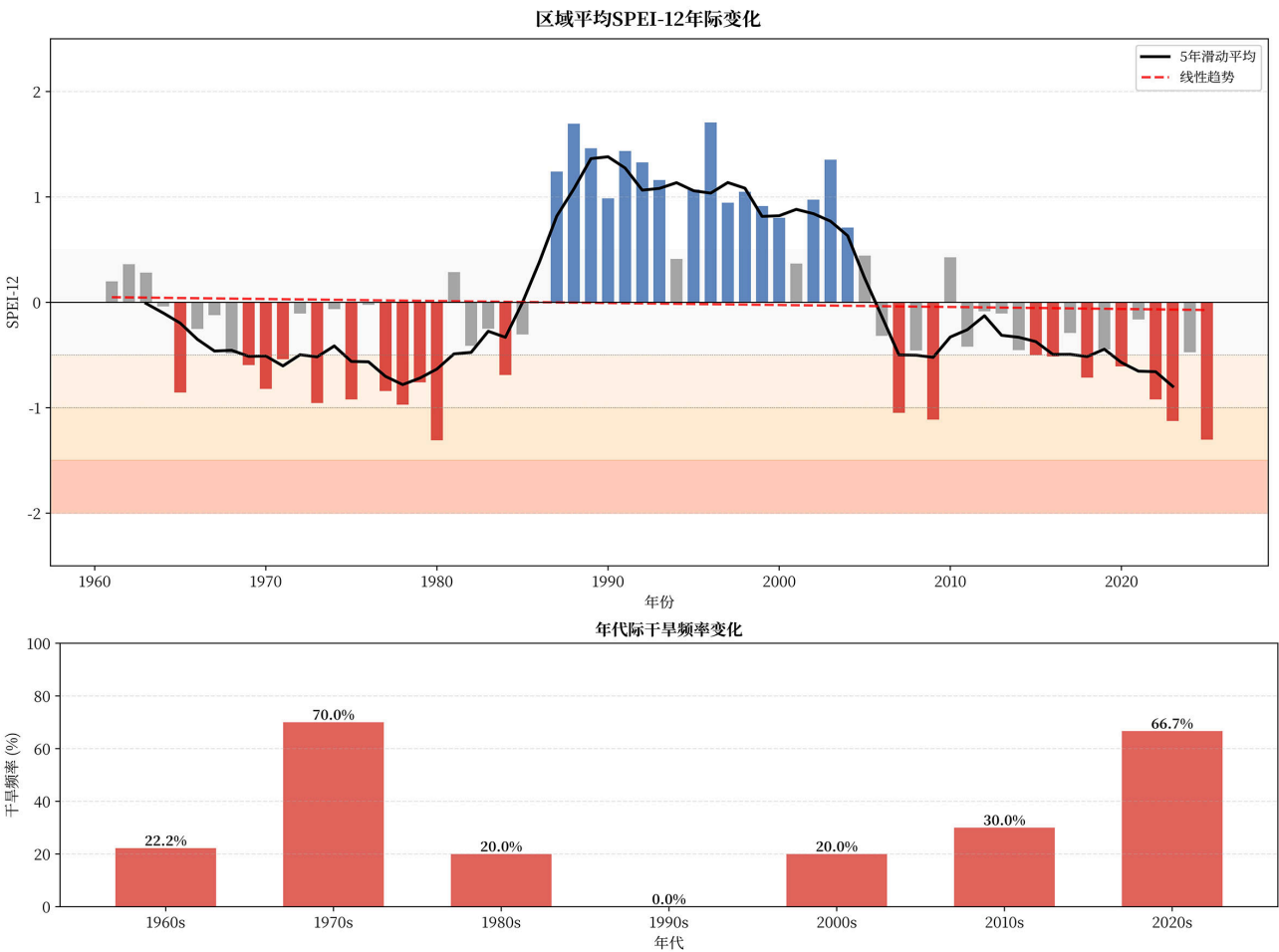


Figure 6. Interannual variation and interdecadal characteristics of regional average SPEI-12 in Aksu region from 1961 to 2025
图 6. 1961~2025 年阿克苏地区区域平均 SPEI-12 年际变化及年代际特征

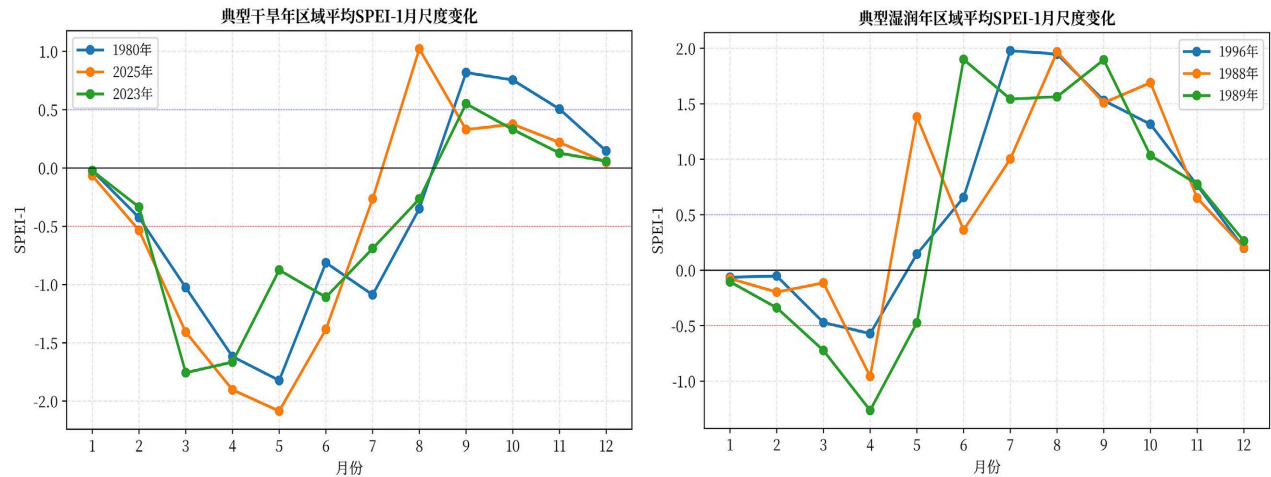


Figure 7. Monthly evolution characteristics of SPEI-1 in typical dry and wet years in Aksu region
图 7. 阿克苏地区典型干旱年与湿润年 SPEI-1 月尺度演变特征

为进一步分析典型年份的干旱演变,选取区域平均 SPEI-12 最低的 3 年(1980, 2023, 2025)和最高的 3 年(1996, 1988, 1989),分析其 SPEI-1 月尺度演变(图 7)。典型干旱年的 SPEI-1 在全年大部分月份均处于负值区间,干旱从年初持续到年末,呈“全年性干旱”特征;典型湿润年则相反, SPEI-1 在全年大部分月份处于正值区间。这表明阿克苏地区干旱一旦发生,往往持续较长时间,对农业生产和生态环境造成累积性影响。

3.5. 阿克苏地区干旱空间分布特征

基于克里金空间插值方法,绘制了阿克苏地区不同年代 SPEI-12 均值的空间分布图(图 7)。结果显示, SPEI 均值呈明显的西低东高梯度分布,西部阿克苏、乌什一带 SPEI 值偏低,东部沙雅、新和一带 SPEI 值偏高。1990 年代全区 SPEI 均值均为正值,呈“东高西略低”的湿润格局;2000 年代后,西部 SPEI 值显著下降,干旱化趋势自西向东扩展;2010~2020 年代,西部阿克苏、乌什一带 SPEI 均值降至-1.0 以下,达到中旱至重旱等级,而东部沙雅一带仍维持正值,“西干东湿”格局进一步强化。

4. 结论与讨论

本研究基于 1961~2025 年阿克苏地区 5 个气象站点的逐月气象资料,采用 SPEI 指数、MK 趋势检验、Sen 斜率估计和干旱频率统计等方法,分析了该地区干旱的时空分布特征,主要结论如下:

(1) 阿克苏干旱空间分异显著,呈西干东湿格局。阿克苏、乌什站干旱化显著($P < 0.05$),沙雅站呈显著湿润化,拜城、新和站变化不显著。该格局受控于西风环流与局地地形,西部西风减弱造成水汽输送减少而趋于干旱,东部地形辐合带来局地降水增加。

(2) 区域干湿存在阶段性演变:区域干湿过程可划分为 20 世纪 60~80 年代相对干旱期、1990 年代显著湿润期(5 站平均 SPEI-12 达 1.07)、2000 年代以来干旱加剧期。阿克苏站干旱频率由 1990 年代 0%上升至 2020 年代 100%,平均 SPEI-12 由 0.94 降至-1.64,干旱化信号尤为突出。

(3) 季节干旱特征差异突出,春旱为区域最主要的季节性干旱类型。区域干旱总体表现为春旱最重、夏旱次之、秋冬干旱偏少。春季 5 站平均干旱频率 81.6%,平均 SPEI-3 为-0.97,处于中度干旱等级;夏季平均干旱频率 47.4%,平均 SPEI-3 为-0.33;秋冬季干旱发生强度与频率均相对偏低,春旱对冬小麦返青、春播作物播种生产威胁显著。春季气温快速回升、蒸发急剧增大,而降水补给不足,是春旱高发的主要气候原因。在绿洲农业区,春旱直接影响春耕生产,对区域粮食安全构成现实风险。该结果提示区域干旱防控应重点关注春季,优化水库春灌调度,完善春季墒情与干旱监测预警体系,降低农业干旱损失。

(4) 中长期干旱发生风险高于短期干旱,持续性水分亏缺问题突出。SPEI-6、SPEI-12 表征的中长期干旱频率普遍高于 SPEI-1 表征的短期干旱事件;5 站 SPEI-12 平均干旱频率 33.4%,乌什站最高(38.52%),沙雅站最低(30.95%),中长期干旱整体处于较高风险水平。相较于突发性短期干旱,持续性中长期水分亏缺更易累积形成复合型干旱,对流域水资源供给、绿洲生态系统产生持续压力。

基于本研究揭示的干旱时空规律,可以为阿克苏地区水安全保障、农业适应性管理、生态可持续发展提供参考:一是重点防范春季干旱风险。春旱高发对冬小麦返青、春播生产威胁突出,建议完善春季墒情-干旱监测预警体系,优化水库春灌调度方案,匹配作物关键生育期用水需求,降低春旱对绿洲农业的损失。二是关注区域差异化干旱风险。针对西部阿克苏、乌什等干旱化加剧区域,严格落实“四水四定”,推进灌区节水改造,控制农业耗水规模;对于东部湿润化站点,同样需要警惕极端干旱事件,不能弱化抗旱基础设施建设。三是重视中长期水分亏缺风险。研究显示中长期尺度干旱频率更高,建议将中长期干旱风险纳入水资源规划、生态保护方案,提升区域整体抗旱韧性。

基金项目

新疆气象局科学研究青年项目(QN202614)。

参考文献

- [1] 张强, 李栋梁, 姚玉璧, 等. 干旱形成机制与预测理论方法及其灾害风险特征研究进展与展望[J]. 气象学报, 2024, 82(1): 1-21.
- [2] 龙德江, 刘新华. 基于水文干旱指标的阿克苏河流域干旱特征分析[J]. 水资源开发与管理, 2018(9): 74-79.
- [3] 汪瑞. 阿克苏河灌区植被及湖泊生态需水量估算与特征分析研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中师范大学, 2020.
- [4] AghaKouchak, A., Mirchi, A., Madani, K., Di Baldassarre, G., Nazemi, A., Alborzi, A., *et al.* (2021) Anthropogenic Drought: Definition, Challenges, and Opportunities. *Reviews of Geophysics*, **59**, e2019RG000683. <https://doi.org/10.1029/2019rg000683>
- [5] 张强, 张良, 崔显成, 等. 干旱监测与评价技术的发展及其科学挑战[J]. 地球科学进展, 2011, 26(7): 763-778.
- [6] Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S. and López-Moreno, J.I. (2010) A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, **23**, 1696-1718. <https://doi.org/10.1175/2009jcli2909.1>
- [7] Beguería, S., Vicente-Serrano, S.M., Reig, F. and Latorre, B. (2014) Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) Revisited: Parameter Fitting, Evapotranspiration Models, Tools, Datasets and Drought Monitoring. *International Journal of Climatology*, **34**, 3001-3023. <https://doi.org/10.1002/joc.3887>
- [8] 王劲松, 李耀辉, 王润元, 等. 我国气象干旱研究进展评述[J]. 干旱气象, 2012, 30(4): 497-508.
- [9] 邹旭恺, 张强. 近半个世纪我国干旱变化的初步研究[J]. 应用气象学报, 2008, 19(6): 679-687.
- [10] 黄晚华, 杨晓光, 李茂松, 等. 基于标准化降水指数的中国南方季节性干旱近 58 a 演变特征[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 50-59.
- [11] Cao, S.P., Zhang, L.F., He, Y., *et al.* (2022) Effects and Contributions of Meteorological Drought on Agricultural Drought under Different Climatic Zones and Vegetation Types in Northwest China. *Science of the Total Environment*, **821**, Article 153270.
- [12] Xu, H.J., Wang, X.P., Zhao, C.Y., *et al.* (2021) Seasonal and Aridity Influences on the Relationships between Drought Indices and Hydrological Variables over China. *Weather and Climate Extremes*, **34**, Article 100393. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100393>
- [13] 任培贵, 张勃, 张调风, 等. 基于 SPEI 的中国西北地区气象干旱变化趋势分析[J]. 水土保持通报, 2014, 34(1): 182-187+192.
- [14] 轩俊伟, 郑江华, 刘志辉. 基于 SPEI 的新疆干旱时空变化特征[J]. 干旱区研究, 2016, 33(2): 338-344.
- [15] 阿克苏地区地方志编纂委员会. 阿克苏地区志[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 2009.