

四种常见气象干旱指数在新疆的适宜性评估

陈 珍¹, 蔡朝朝^{1,2}, 马 楠¹, 戴 硕¹, 王震鲁¹

(1. 新疆农业大学计算机与信息工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆农业信息化工程技术研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘 要: 利用新疆地区 2001—2022 年间的 4 种常用气象干旱指数 (SPI 、 $SPEI$ 、 $PDSI$ 、 $SC-PDSI$), 通过其与土壤湿度、河川径流量和陆地水储量变化量的相关性分析, 以及对历史典型干旱时间的响应能力, 同时利用 Mann-Kendall 突变检验、趋势分析等方法, 对四种指数的时空差异进行分析, 评估各指数在新疆地区的适宜性。结果表明: (1) $PDSI$ 指数与土壤湿度、河川径流量呈现出最强的相关性, 与陆地水储量变化量的相关性仅次于 $SC-PDSI$; 在典型干旱事件反映上, $PDSI$ 指数表现最优。(2) 新疆整体正处于湿润状态; 在时间序列上, 四种干旱指数均反映出研究时段内新疆地区轻微变干的趋势 (趋势值均在 -0.01 左右), 干湿突变点出现的时间和数量也各不相同。(3) 整体来看, 在空间分布上, 新疆北部、中部和中南部的干旱程度高于新疆西部和东部部分地区; 相比 $PDSI$ 的描述情况, $SC-PDSI$ 指数较其他三种干旱指数表现出较大的趋势率变化幅度 (趋势率范围为 $-0.3054 \sim 0.3237$), 对干湿变化幅度描述过重, SPI 描述过轻, $SPEI$ 描述情况相近。总体而言, $PDSI$ 指数在新疆地区的适宜性最优。

关键词: 气象干旱指数; 适用性分析; 土壤湿度; 河川径流量; 陆地水储量; 新疆地区

中图分类号: S166 **文献标志码:** A

Suitability assessment of four common meteorological drought indices in Xinjiang

CHEN Zhen¹, CAI Chaochao^{1,2}, MA Nan¹, DAI Shuo¹, WANG Zhenlu¹

(1. College of Computer and Information Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China;

2. Xinjiang Agricultural Informatization Engineering Technology Research Center, Urumqi, Xinjiang 830052, China)

Abstract: Four commonly used meteorological drought indices (SPI , $SPEI$, $PDSI$, and $SC-PDSI$) were applied to Xinjiang from 2001 to 2022 to analyze their correlation with soil moisture, river runoff, and terrestrial water storage, as well as their responsiveness to historically significant drought periods. Additionally, the Mann-Kendall mutation test and trend analysis were employed to assess the spatial and temporal variations of the four indices and evaluate their suitability for drought monitoring in Xinjiang. The results showed that: (1) The $PDSI$ index showed the strongest correlation with soil moisture and river runoff, and the correlation with the change of terrestrial water storage was second only to $SC-PDSI$. In the reflection of typical drought events, the $PDSI$ index performed best. (2) Overall, Xinjiang was in a wet state. Over the time series, all four drought indices indicate a slight drying trend during the study period (with trend values around -0.01), and the timing and frequency of dry and wet mutation points varied. (3) On the whole, in terms of spatial distribution, the degree of drought in northern, central and south-central Xinjiang was higher than that in western and eastern parts of Xinjiang. Compared with the $PDSI$, the $SC-PDSI$ showed a wider range of trend rate changes (from -0.3054 to 0.3237) than the other three drought indices. Its representation of dry and wet conditions was overly exaggerated, whereas the SPI tended to understate these changes. The $SPEI$ showed a similar pattern to the $PDSI$. Overall, the $PDSI$ proved to be more suitable for assessing drought conditions in Xinjiang than the other three indices.

Keywords: meteorological drought index; applicability analysis; soil moisture; river runoff; terrestrial water storage; Xinjiang region

干旱指相对广阔的地区在长期无降水或降水异常偏少的气候条件下,出现水分供应严重不足的现象^[1-2],随着人类社会的持续发展以及全球气候变暖的影响加剧,干旱等极端气候事件频繁发生,在全球各地区带来一系列严重问题,对生态系统和社会经济造成深远影响^[3],尤其不利于植被和农作物生长^[4-5]。

新疆处于我国西北地区,是我国陆地面积最大的省级行政区,也是我国的农业大区,面积占国土总面积的1/6;其地处中纬度亚欧大陆腹地,降水稀少且蒸发强烈,可用水资源缺乏且分布不均,属典型的大陆性干旱气候区和生态脆弱区。干旱指数作为一种关键指标,能够精确反映干旱的发生程度。不同学者基于不同的干旱指数,在全球和区域范围内进行大量的干旱监测和分析工作,为干旱风险评估和应对策略的制定提供重要支撑^[6]。然而,目前还没有一种指数能够全面适用于不同区域干旱特征的表征以及对环境和社会影响的评估。即便是在同一研究区域内,使用不同的干旱指数得出的结果也常常存在显著差异,这反映出干旱指数选择和应用的复杂性^[6]。因此,在该区域开展干旱指数适宜性评估对研究区域植被变化和农作物生长具有重要意义。

目前,最常用的干旱指数有标准化降水蒸散指数(*SPEI*)、帕默尔干旱指数(*PDSI*)、标准化降水指数(*SPI*)以及自校准帕尔默干旱严重程度指数(*SC-PDSI*)。*SPI*在评估干旱状态时仅需要降水数据,计算过程简单、空间一致且时间尺度灵活^[7],然而该指数并未考虑土壤湿度和温度等对干旱的影响^[8]。相比之下,*PDSI*不仅考虑了降水量,还结合了温度和土壤湿度等数据,通过两层模型估算土壤水分供给和需求,具有明确的物理意义,能够较好地反映区域水分的盈亏情况^[9]。Wells等^[10]通过使用观测资料计算的参数替换*PDSI*的经验参数,进一步发展了该方法,从而推出了*SC-PDSI*,使其在空间上具有较好的可比性。*SPEI*结合了*PDSI*对温度变化的敏感性和*SPI*计算简单及多时间尺度特性^[11],如王洁等^[12]使用*SPI*、干旱频率、干旱强度和气候倾向率等指标,对宁夏地区的干旱特征进行了深入分析。宋琳琳等^[13]探讨了*PDSI*指数和*SC-PDSI*指数在西南地区干旱监测中的适宜性,并得出*SC-PDSI*在监测干旱发生区域和干旱等级方面,在一定

程度上优于*PDSI*,其结果与土壤湿度的观测更为吻合。干旱主要通过减少土壤含水率,对植被、农作物施加干旱胁迫,从而影响其生长。谢五三等^[14]对比了各干旱指数与土壤湿度之间的相关性。干旱不仅与土壤湿度相关,而且与河川径流量也相关,长时间干旱还可能导致储水量的变化。杨庆等^[15]选择了包括*PDSI*在内的7种干旱指数,通过与土壤相对湿度、河川径流量及陆地水储量变化量的相关性分析,优选出适宜我国的干旱指数。

在气候变化背景下,选择适宜的干旱指数是确保该区域干旱监测和预报准确性的重要前提。本研究基于常见的四种干旱指数(*SPI*、*SPEI*、*PDSI*、*SC-PDSI*),基于土壤湿度、河川径流量和陆地水储量变化量三种指标进行相关性分析,且对历史典型干旱事件进行识别,并对比其年际变化、干湿突变以及干湿空间变化趋势的差异,优选出最适宜新疆地区的干旱指数,旨为新疆地区干旱监测提供帮助,做出早期和及时预警。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区如图1所示,新疆维吾尔自治区(73°40′~96°18′E,34°25′~48°10′N)地处中纬度亚欧大陆腹地,山脉与盆地相间排列,喻称“三山夹两盆”。该地区远离海洋,深居内陆,四周有高山阻隔,海洋气流不易到达,形成明显的温带大陆性气候,广泛发育的内陆河流形成全球干旱区独具特色的山地-绿洲-荒漠系统。该区气温温差较大,日照时间充足(年日照时数达2 500~3 500 h)。多年平均降水量约150 mm,但地域差异显著,北疆山区可达400~600 mm,南疆塔里木盆地不足100 mm;年平均蒸发量2 000~4 400 mm。

1.2 数据资料来源

CHM_Drought数据^[16]集包含了*SPI*、*SPEI*、*PDSI*、*SC-PDSI*、*EDDI*、*VPD*共6种干旱指数,该数据集旨在构建一个创新且全面的中国大陆地区长期气象干旱指数数据集,时间范围为1961—2022年,空间分辨率为0.1°。*EDDI*更多地侧重于蒸发需求方面,*VPD*主要反映大气中水汽压的亏缺程度,对于新疆这样一个水资源分布少且极不平衡的地区,应考虑多种因素反映干旱的实际情况。因此,本文选取2001—2022年新疆地区的*SPI*、*SPEI*、

PDSI 和 *SC-PDSI* 等四种干旱指数评估其在新疆的适宜性。干旱等级根据中华人民共和国国家标准发布的气象干旱等级^[17]划分(表 1)。

表 1 干旱等级划分
Table 1 Drought classification

类型 Type	<i>SPI</i>	<i>SPEI</i>	<i>PDSI</i>	<i>SC-PDSI</i>
无旱 Drought free	>-0.5	>-0.5	>-1.0	>-1.0
轻度干旱 Mild drought	(-1.0,-0.5]	(-1.0,-0.5]	(-2.0,-1.0]	(-2.0,-1.0]
中度干旱 Moderate drought	(-1.5,-1.0]	(-1.5,-1.0]	(-3.0,-2.0]	(-3.0,-2.0]
重度干旱 Severe drought	(-2.0,-1.5]	(-2.0,-1.5]	(-4.0,-3.0]	(-4.0,-3.0]
极度干旱 Extremely drought	<-2.0	<-2.0	<-4.0	<-4.0

土壤湿度和河川径流量数据来自 GEE 提供的 ERA5-Land Monthly Aggregated 数据集,其数据具有时间跨度长的优点^[18],与其他气候再分析资料相比在新疆地区具有更好的适用性^[19]。空间分辨率为 11.132 km(即 0.1°),时间分辨率为每月更新一次,原始数据为 TIF 格式。

陆地水储量变化量数据采用“中国区域基于降水重构陆地水储量变化数据集(2002—2019 年)”,该数据集来源于国家青藏高原科学数据中心,时间序列为 2002 年 4 月—2019 年 12 月,空间分辨率为 10 km,时间分辨率为月值。数据质量整体较好,全国大部分区域的误差在 5 cm 以内。本数据集补充 GRACE 与 GRACE-FO 卫星之间一年多的数据间断期,为中国区域长期的陆地水储量变化分析提供完整的时间序列^[20]。

1.3 研究方法

本研究通过对 2001—2022 年新疆地区的四种干旱指数(*SPI*、*SPEI*、*PDSI*、*SC-PDSI*)与土壤湿度、河川径流量和陆地水储量变化量分别计算 Pearson 相关系数,用以分析各种指数与三种指标之间的相关程度及差异。为进一步评估各干旱指数的适宜性,再对历史灾情的敏感度和响应能力进行监测,根据历史干旱事件资料提取出有记录的典型旱灾信息,作为判别干旱事件的标准;利用月尺度的四种干旱指数对干旱发生的具体时间进行监测,按照各指标阈值确定干旱等级,分析各种指数的差异。并采用 Mann-Kendall 突变分析^[21]、Theil-Sen Median 趋势分析^[22]和 Mann-Kendall 统计检验等方法^[23]对四种指数从年际变化、干湿突变以及干湿空间变化趋势方面进行差异性分析。综合上述研究结果,对四种常见气象干旱指数在新疆的适宜性进行评估。

2 结果与分析

2.1 干旱指数适宜性评估

2.1.1 土壤湿度与干旱指数 土壤湿度是影响陆地与大气之间水循环的关键物理参数,其异常变化能直观地反映一个地区的干湿状态,用以表征干旱特征和程度^[15]。当干旱发生时首先是土壤表层失水,随着干旱的持续才慢慢影响到深层土壤的变化。如张茂等^[24]利用表层土壤湿度数据作为指标评估遥感干旱指数的适用性。因此本研究选取 0~7 cm 的表层土壤数据。

图 2 为研究区域在 2001—2022 年期间 0~7 cm 深度的年均土壤湿度与四种干旱指数的相关系数的空间分布情况。由图 2 可知,大部分区域土壤湿度与四种干旱指数之间存在较高的一致性,显示出正相关关系;也有少数区域表现出与干旱指数的负相关性,负相关主要分布于喀什和田地区的南部以及伊犁哈萨克自治州、阿克苏地区、巴音郭楞蒙古自治州和克拉玛依市交界处的部分地区,*SC-PDSI* 指数还在和田地区中部、巴音郭楞蒙古自治州东部呈现负相关。这种负相关现象可能是由于人为活动(如灌溉)和地形、海拔对土壤水分储存与传输的影响。特别是在高原地区,降水多以冰雪形式存在,导致实际土壤湿度与干旱指数反映的情况不一致。

剔除四种干旱指数与土壤湿度之间的负相关系数,随后计算整个研究区域正相关系数的平均值。在整个研究区域,干旱指数与土壤相对湿度的相关性排序为 *PDSI*(0.565)>*SPEI*(0.512)>*SPI*(0.488)>*SC-PDSI*(0.443)。其中,*PDSI* 指数与 0~7 cm 深度年均土壤湿度的相关系数最高(0.565),而 *SC-PDSI* 指数的相关系数最低(0.443)。

2.1.2 河川径流量与干旱指数 干旱事件的发生显著影响着区域河川的径流量,进而引起水资源短缺和河道流量下降。因此,河川径流量的监测成为评估干旱指数适宜性的重要参考指标。本研究采用 ERA5 数据提供的径流量数据作为基准,对新疆地区四种干旱指数的适宜性进行评估。新疆地区的地形复杂性和地貌差异性导致降水在该区域的汇流过程可能需要较长时间,有时甚至需要数周至数月才能完成^[25]。鉴于此,采用年径流量与干旱指数的年值进行比较分析四种干旱指数与年径流量的相关性。图 3 为新疆地区 2001—2022 年的年径流量以及四种干旱指数的年际变化序列。由图 3 可知,年径流量与四种干旱指数在时间变化上具有相似的趋势。在整个研究区域,干旱指数与河川径流

量的相关性排序为 $PDSI(0.506)>SPI(0.448)>SPEI(0.447)>SC-PDSI(0.384)$, 其中 $PDSI$ 与径流量的相关性最强(相关系数为 0.506), 而 $SC-PDSI$ 的相关性相对较弱(相关系数为 0.384)。

2.1.3 陆地水储量变化量与干旱指数 近年来, 众多学者已经开始利用 GRACE 卫星数据反演得到的陆地水储量变化信息监测区域干旱情况。较多研究表明, 陆地水储量的变化量是一个有效的指标, 可以用来评估干旱指数的适宜性^[15,26]。

在新疆地区将四种干旱指数与陆地水储量变化量之间基于像素的相关性分析方法对相关系数进行计算(图 4, 见 267 页), 时间跨度为 2003 年 1

月—2010 年 12 月。结果表明, $SC-PDSI$ 的相关系数明显高于其他三种干旱指数, 与陆地水储量变化量的相关性最强。 SPI 与陆地水储量变化量的空间相关系数呈现出从边缘向中心的递减趋势, 在新疆中、东部地区相关性较低, 只在边界地区则表现出较高的相关性。 $SPEI$ 的相关系数在空间分布上大部分呈现正相关, 在东部和南部局部地区则观察到负相关现象。 $PDSI$ 与陆地水储量变化量的空间相关性则显示出从东北向西南的增加趋势, 大部分地区呈现正相关。值得注意的是, 超过 50% 的 $SC-PDSI$ 区域与陆地水储量之间的相关性显著, 且相关系数从西部向东部逐渐降低。

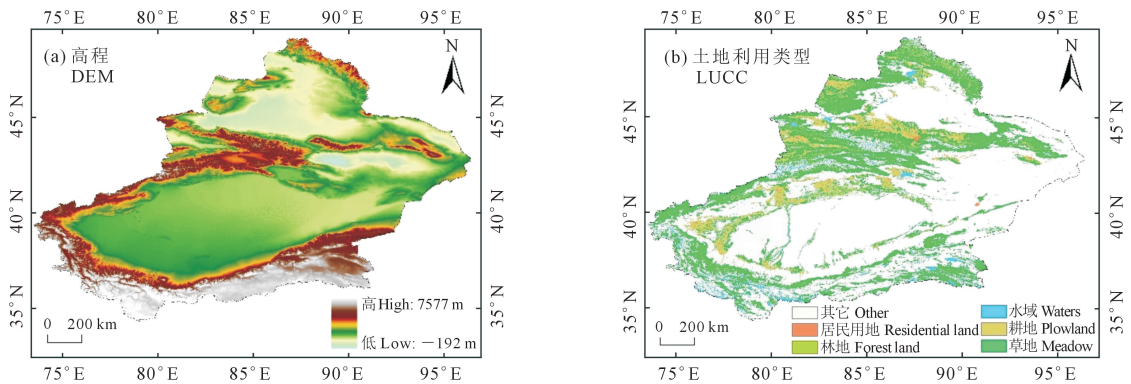


图 1 研究区概况
Fig.1 Overview of the study area

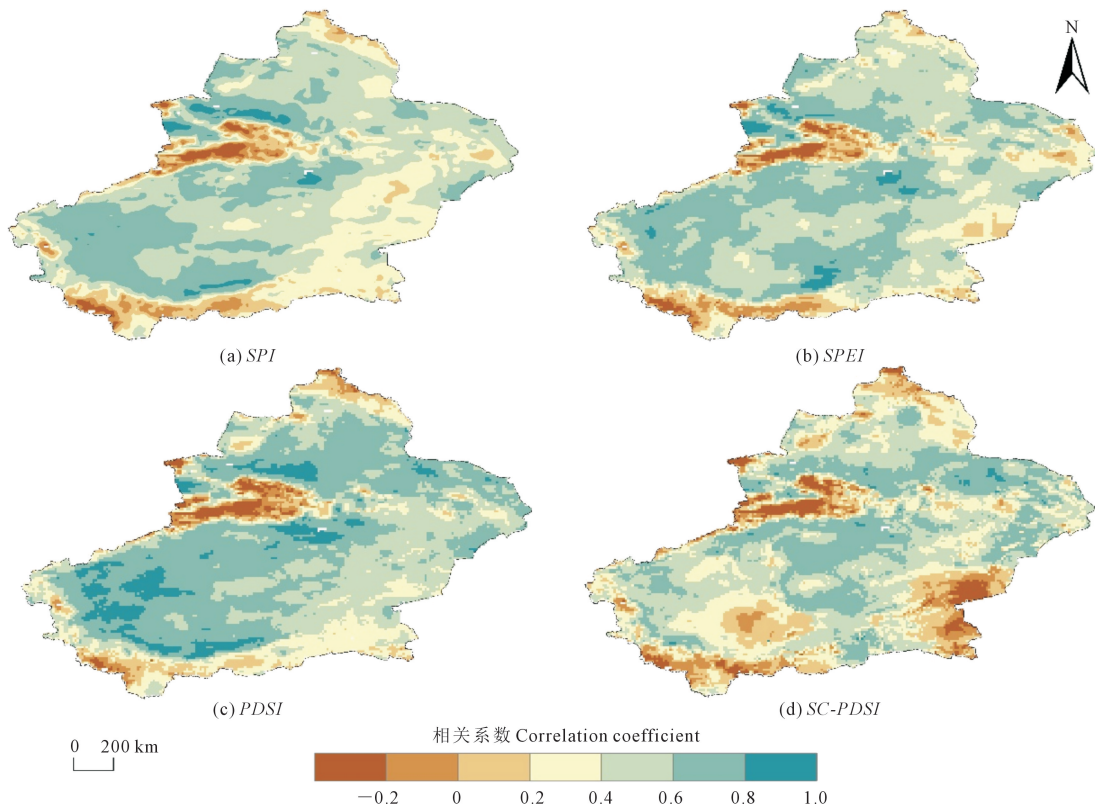


图 2 新疆年均土壤湿度与四种干旱指数相关系数的空间分布
Fig.2 Spatial distribution of correlation coefficients between average annual soil moisture and four drought indices in Xinjiang

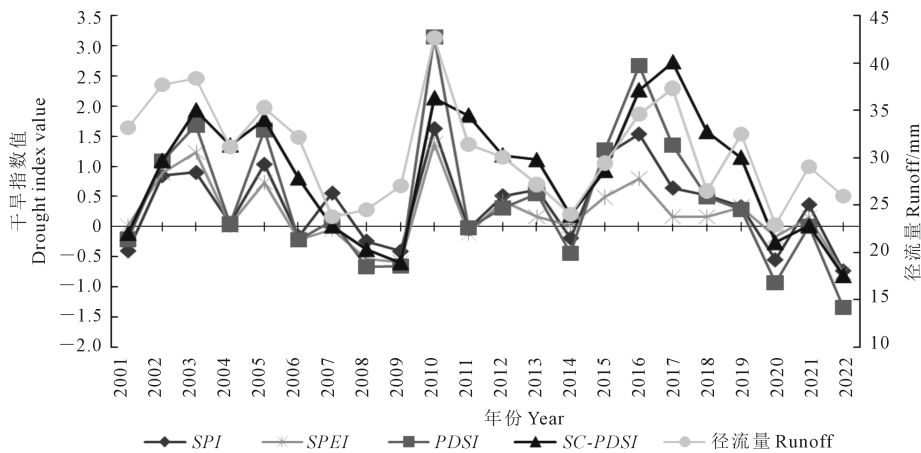


图 3 四种干旱指数与径流量时间序列

Fig.3 Time series of four drought indices and runoff

剔除四种干旱指数与陆地水储量变化量之间的负相关系数,并计算新疆地区剩余的正相关系数的平均值。四种干旱指数与陆地水储量变化量的相关系数的大小排序为 $SC-PDSI(0.556) > PDSI(0.424) > SPEI(0.357) > SPI(0.317)$,其中, $SC-PDSI$ 与陆地水储量变化量的相关系数最高(0.556),具有最强的相关性,而 SPI 的相关系数最低(0.317)。

2.1.4 典型干旱事件适宜性评估 中国水旱灾害公报指出,2006 年新疆部分地区发生了近 50 年来最为严重的夏伏旱;新疆气候中心在综合气温、降水和受旱灾情况后评价,2008 年是新疆有气象记录以来的第二个严重干旱年,旱情仅次于 1974 年。因此,以 2006 年和 2008 年作为典型干旱年份,通过对比四种干旱指数检测干旱情况,分析其在新疆的适宜性。

如图 5 所示,2006 年发生了冬春旱和多年罕见的夏伏旱。3 月 SPI 表现为轻度干旱, $SPEI$ 、 $PDSI$ 、 $SC-PDSI$ 未识别出此次干旱。8 月新疆月平均降雨量较常年同期偏少 5~8 成, SPI 和 $PDSI$ 表现为中度干旱、 $SPEI$ 识别为轻度干旱、 $SC-PDSI$ 表现为无旱。 SPI 表现良好可能是因为本身对降水敏感,该时期降雨量较少。2008 年 6—7 月,西北部出现持续高温少雨天气,降水量较多年同期偏少 3~8 成,气温偏高 1~4°,新疆出现严重夏旱。6 月 $SPEI$ 和 $PDSI$ 表现为中度干旱、 SPI 表现为轻度干旱、 $SC-PDSI$ 未识别出此次干旱。7 月中旬新疆全区耕地受旱面积 1.27 万 hm^2 ,1 933.3 万 hm^2 草场严重受旱,50 万人以及 80 万头大牲畜出现临时饮水困难。仅 $PDSI$ 表现为轻度干旱,其余均识别为无旱。综上表现, $PDSI$ 在 2006 年和 2008 年灾害情况在新疆地区的适用性最优。

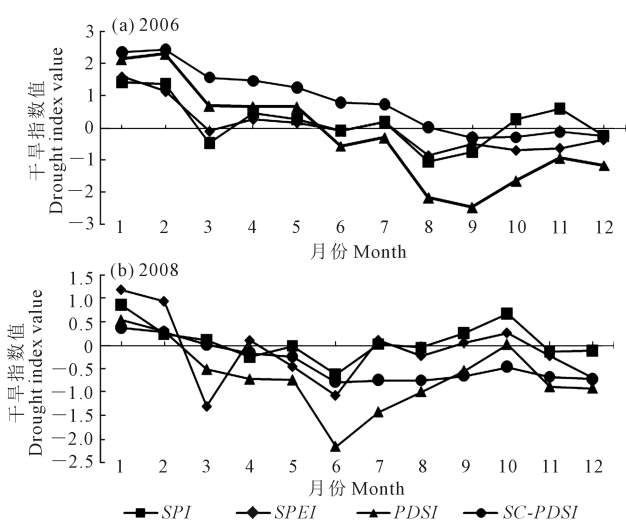


图 5 2006 年和 2008 年干旱事件的月变化

Fig.5 Monthly variation of drought events in 2006 and 2008

2.2 四种干旱指数时间变化差异

2001—2022 年四种指数在新疆地区的年际变化如图 6 所示。 $SPEI$ 和 SPI 指数使用每年 12 个月尺度值来表征年均值, $PDSI$ 和 $SC-PDSI$ 指数使用每年的月均值作为年均值。其数值若为正值则表示湿润状态,若为负值则表示干旱状态,数值的绝对值越大,表明湿润或干旱的程度越显著。整体来看,四种指数均值为正,表明新疆地区正处于湿润状态,但其趋势率均表现为负值,在捕捉变干趋势方面显示出一致性,说明新疆地区有微弱变干的趋势,趋势值在 -0.01 左右,且下降趋势相对小且平缓,这与程军等^[27]的研究结果一致。

在时间序列上,四种干旱指数在新疆地区大部分年份的干旱和湿润状况上表现出相似的峰谷值。然而在 2001、2006、2007、2011 年和 2014 年,这些指数所指示的干湿状态呈现出相反的趋势,以 2014 年

为例,*SPI* 和 *PDSI* 指数值分别为 -1.192 和 -1.438 , 均小于 0 , 表明新疆地区在该年遭受干旱的影响; 与此同时, *SPEI* 和 *SC-PDSI* 指数值分别为 0.022 和 0.198 , 均大于 0 , 反映出 2014 年新疆地区处于相对湿润的状态。*SC-PDSI* 在整个研究时间段内基本呈现正值, 表明新疆地区在这一时期总体上保持湿润状态。这一发现与其他指数所指示的干旱化趋势形成鲜明对比。可能是因为 *SC-PDSI* 计算引入有效土壤持水量(田间持水量), 对降水的异常值更加敏感, 这在降水量较少的地区可能导致干旱评估的偏差^[28]。

采用 Mann-Kendall 突变检验法识别四种干旱指数时间序列中的突变点, 如图 7 所示, *UF* 和 *UB* 曲线是两种基于时间序列的统计量, 若其值大于 0 , 表明序列呈上升趋势, 反之呈下降趋势; 当其超过

显著水平线时表明上升或下降趋势显著。四种干旱指数都经历两次升降且顺序一致, 仅仅是表现在不同的年份, 且 *SPI*、*PDSI*、*SC-PDSI* 三种曲线波形基本一致, *UF* 为 0 的年份(变干或变湿转折点)见表 2。以 *SPI* 指数为例, 其 *UF* 值在 2008 年之前大于 0 , 数据呈不显著上升趋势, 表明新疆在这段时间内逐渐变湿, 2008 年之后 6 年 *UF* 值转为负值, 逐渐变干, 2014 — 2020 年再次出现湿润化趋势, 后又转为干旱化趋势。*SPI* 指数的 *UF* 和 *UB* 曲线在 2009 年相交, 这两个交点位于水平临界区间内, 通过 0.05 的显著性检验, 视为突变点, 表明在 2009 年发生干湿突变。*SPEI* 在 2008 — 2009 年间出现显著的下降, 干旱明显加剧。*SPEI*、*PDSI* 和 *SC-PDSI* 在研究期间没有显著的突变点。

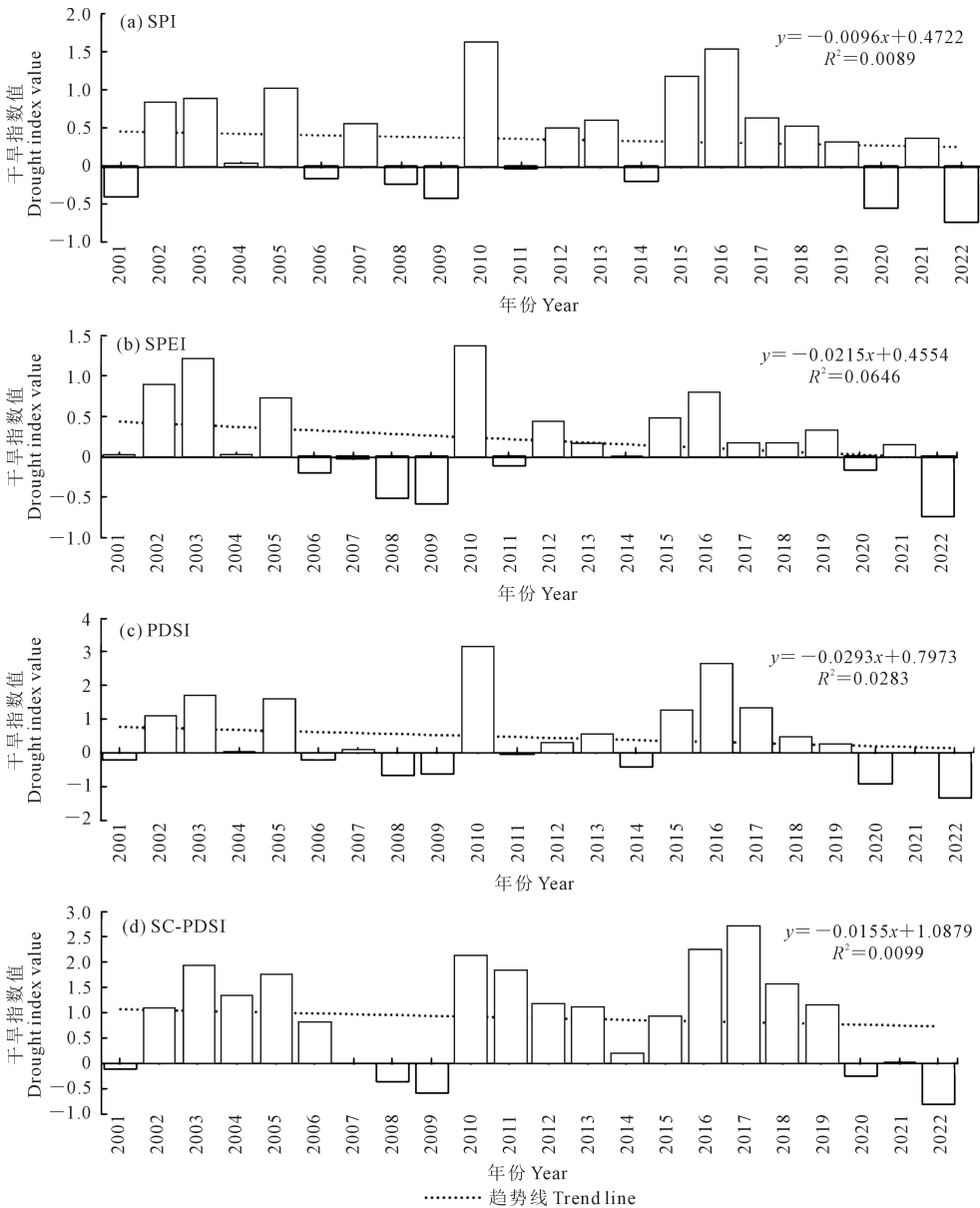


图 6 新疆四种干旱指数 2001—2022 年际变化

Fig.6 Inter-year changes of four drought indices in Xinjiang from 2001 to 2022

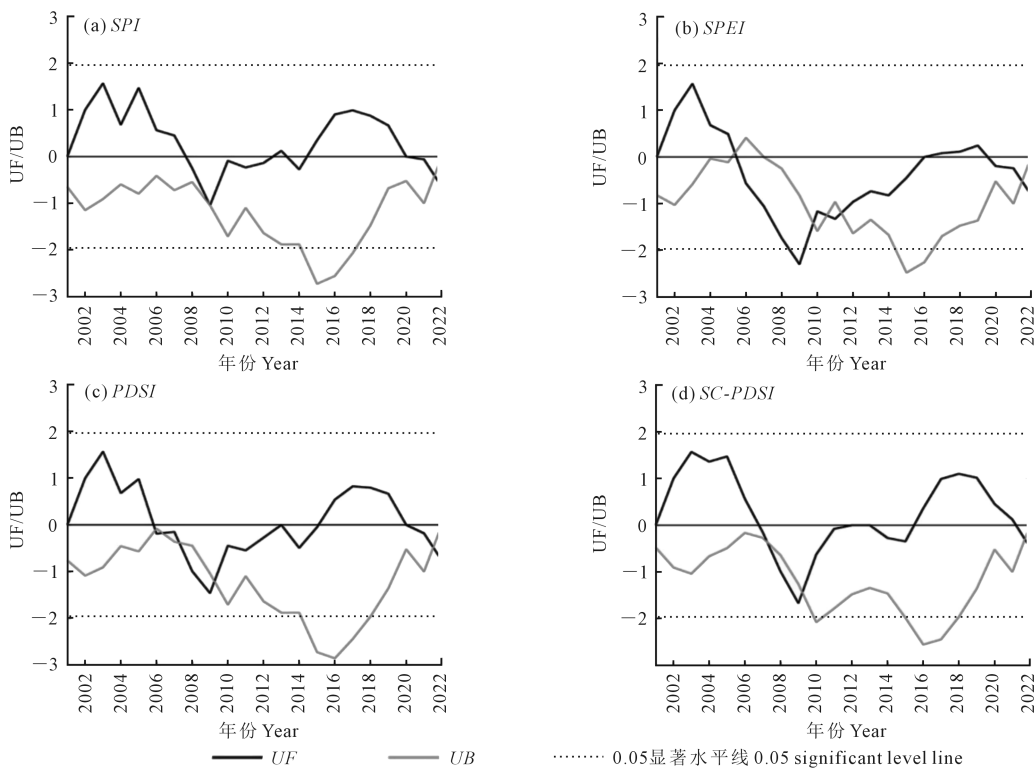


图 7 新疆 2001—2022 年四种干旱指数的干湿突变

Fig.7 Dry and wet mutations of four drought indices in Xinjiang from 2001 to 2022

表 2 UF 为零的年份

Table 2 The year in which UF is zero

干旱指数 Drought index	年份 1 Year 1	年份 2 Year 2	年份 3 Year 3
SPI	2008	2014	2020
SPEI	2005	2016	2020
PDSI	2006	2015	2020
SC-PDSI	2007	2016	2021

2.3 四种干旱指数空间干湿变化差异

2001—2022 年间四种干旱指数在新疆的年际空间变化趋势如图 8 所示。图中正趋势率以蓝色表示,指示区域正经历着变湿;负趋势率则以红色表示,反映区域正朝着变干方向发展。每种干旱指数的趋势率绝对值越大,表明该区域的干湿变化幅度越显著。

由图 8 可知,整体来看,新疆北部、中部和中南部的干旱程度在空间上高于新疆西部和东部部分地区。*PDSI* 在天山及伊犁河谷、北疆中南部、南疆东部的变干趋势较显著。*SPI* 指数在天山及伊犁河谷地区、北疆中南部以及南疆东部的大部分地区,变干趋势较明显;*SC-PDSI* 和 *SPI* 空间变化趋势相似,变干的面积更为广泛,趋势变化幅度更大。*SPEI* 指数揭示南疆西部以及南疆东部交界处周围的变干趋势显著。此外,四种干旱指数的空间趋势

率变化范围也各不相同,例如 *SC-PDSI* 的趋势率范围为-0.3054~0.3237,显示出较大的趋势率变化幅度;而 *SPI* 的趋势率范围为-0.0737~0.0733,显示出较小的趋势率变化幅度。说明 *SC-PDSI* 对干湿变化幅度描述过重,而 *SPI* 描述过轻,与 *SPEI* 描述情况相近。

结合 MK 方法对四种干旱指数的趋势变化进行显著性检验。总体来看(图 9),四种指数主要趋势均为上升趋势,占比依次为 65.31% (*SPI*)、71.37% (*SPEI*)、83.25% (*PDSI*)、61.59% (*SC-PDSI*),说明新疆地区整体正在变湿。其中,*PDSI* 和 *SC-PDSI* 不存在无变化趋势,*SPI* 和 *SPEI* 无变化趋势占比极低,分别为 0.11% 和 0.09%。从不同指数来看,*PDSI* 的不显著上升趋势占比最高(74.13%),*SPI*、*SPEI* 和 *SC-PDSI* 的不显著上升趋势都占主体,分别为 57.49%、46.21% 和 40.77%。

3 讨论

在全球变暖的大背景下,新疆作为一个典型的大陆性干旱气候区和生态脆弱区,对全球气候变暖更为敏感。Yao 等^[29]指出新疆地区自 1961 年以来经历了显著的变暖变湿趋势,且 21 世纪以来气候发生明显改变,表现为气温出现跃变式升高且维持高

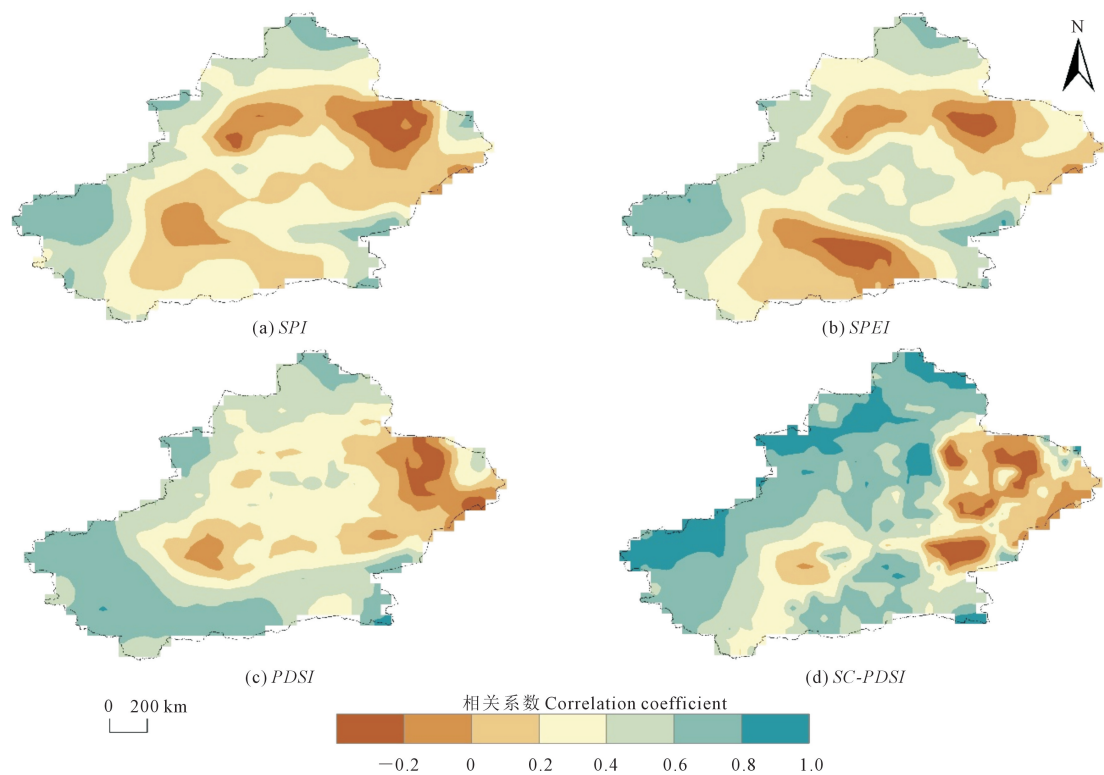


图 4 陆地水储量与四种干旱指数的空间相关系数分布

Fig.4 Distribution of spatial correlation coefficients between land water reserves and four drought indices

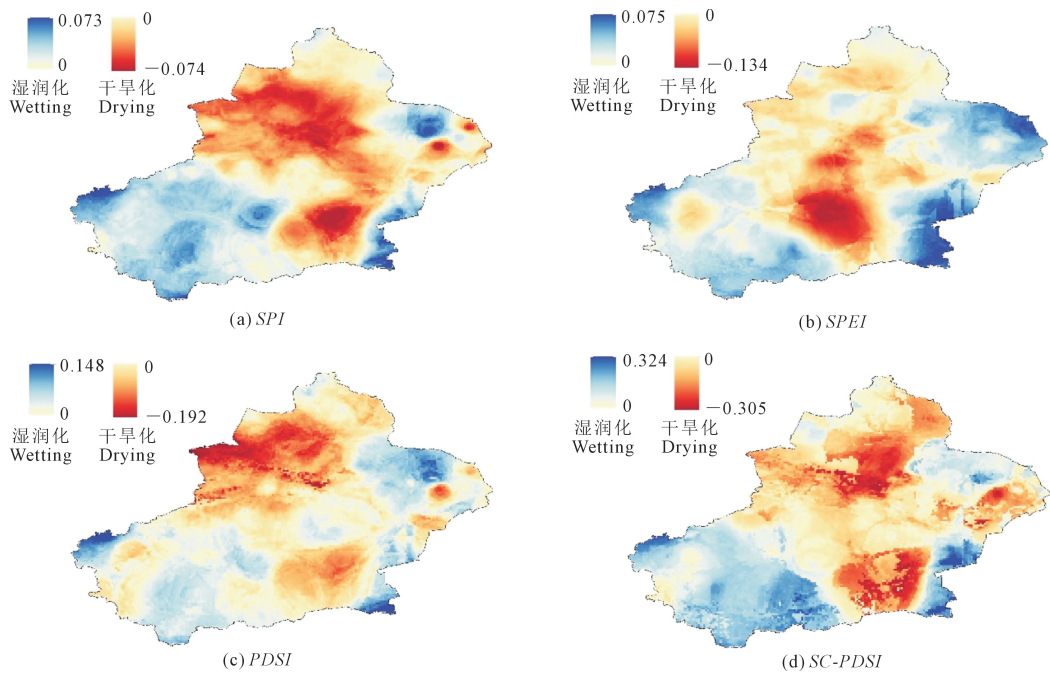


图 8 新疆四种干旱指数 2001—2022 年际空间变化趋势

Fig.8 Interspatial trends of four drought indices in Xinjiang from 2001 to 2022

温波动,降水量增加趋势减缓,新疆气候“暖湿化”和“暖干化”并存。本研究也表明,新疆正处于湿润状态,但部分地区也有变干的趋势。虞佳陆等^[30]也指出自 2000 年以来,新疆的干旱状况逐渐得到缓解,呈现出向湿润化发展的趋势,但春旱的情况却

呈现出加剧的趋势,并且其影响范围显著扩大。这也与本研究结果相符。

本研究对比分析了常见的四种气象干旱指数在新疆地区的适宜性,表明 *PDSI* 指数相对于其他三种指数更适合新疆地区。*SPI* 仅对降水敏感,*SPEI*

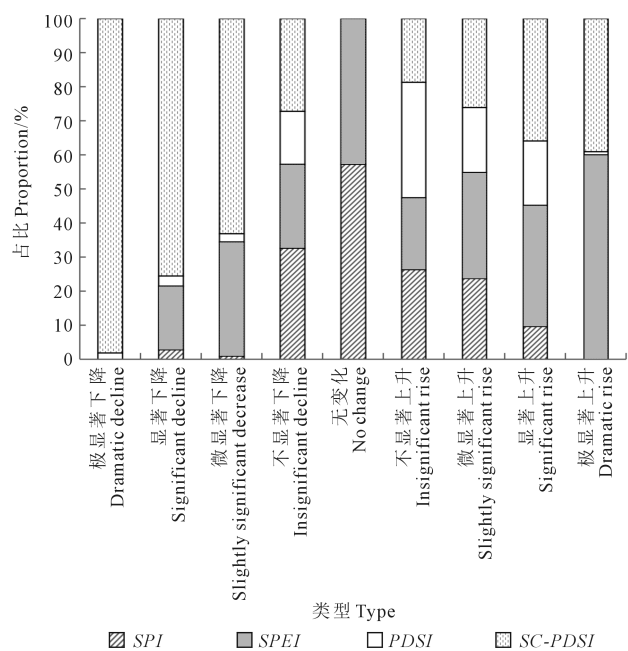


图9 MK显著性检验趋势
Fig.9 Trend of MK significance test

的定义与 *SPI* 类似,但考虑了气温变化对干旱的影响,且在干旱半干旱区,蒸散量值较小,气温异常引起的蒸散变化对 *SPEI* 的贡献相对较大。*SC-PDSI* 在三种指标表征能力上只与陆地水储量相关性最高,已有研究表明,*SC-PDSI* 能够更准确地反映深层土壤水分的变化,而深层土壤水分是地下水储量的重要来源之一。杨庆等^[15]也推荐使用 *PDSI* 指数在干旱区对干旱进行监测。

相较于传统的将多种干旱指数监测结果与已确立的区域干旱发生资料进行比较,传统方法由于许多文献和政府发布的干旱实况主要以文字描述为主,缺乏空间数据。本文采用的方法可以进行空间可视化和定量分析,空间分辨率较高。然而,本文仅以年尺度分析了四种常见的气象干旱指数在 新疆的适宜性,这些指数虽然在一定程度上反映了当地的干旱特征,但其具有一定的局限性和不确定性,所描述和表征的干旱情况和实际还有差距,且近年来出现了越来越多的气象干旱指数计算方法,需要多方法结合更加充足的数据支撑综合分析干旱指数在 新疆的适宜性评估。另外,灌溉因素对土壤湿度有一定的影响,新疆地区多为灌溉农用地,当干旱发生时,人工灌溉量将会急速增加,避免农田干旱导致作物缺水,以维持作物生长,确保产量。因此,需进一步将灌溉对土壤湿度的影响分离,可以考虑通过卫星遥感技术和机器学习算法的应用,将表层土壤湿度与灌溉活动分离开来,今后将围绕

其进一步展开相关研究,以更好地为新疆地区植被生长、水资源管理和农牧业发展提供重要的信息支持。

4 结 论

- 1) 四种常见气象干旱指数在 新疆地区与土壤湿度相关性大小表现为 $PDSI>SPEI>SPI>SC-PDSI$,与河川径流量相关性大小表现为 $PDSI>SPI>SPEI>SC-PDSI$,与陆地水储量变化量相关性表现为 $SC-PDSI>PDSI>SPEI>SPI$ 。评估结果表明,*PDSI* 指数与土壤湿度、河川径流量呈现出最强的相关性,与陆地水储量的变化相关性仅次于 *SC-PDSI*。在识别实际干旱事件方面,*PDSI* 指数相对于其他干旱指数能较准确地识别出干旱。总体上,*PDSI* 对于 新疆地区的干旱检测效果最优。
- 2) 整体来看 2001—2022 年 新疆地区正处于湿润状态。在时间序列上,*SPI*、*PDSI*、*SPEI* 和 *SC-PDSI* 的趋势率均表现为负值,在捕捉 新疆变干趋势方面显示出一致性,趋势值均在 -0.01 左右,下降趋势相对小且平缓,但这些指数的负向变化趋势表明 新疆地区正在以微小的趋势变干。
- 3) 在空间分布上, 新疆北部、中部和中南部的干旱程度在空间上高于 新疆西部和东部部分地区。*SC-PDSI* 的趋势率范围为 -0.3054~0.3237,显示出较其他三种干旱指数较大的趋势率变化幅度。显著性检验结果表明,四种指数主要趋势均为上升趋势,占比依次为 65.31% (*SPI*)、71.37% (*SPEI*)、83.25% (*PDSI*)、61.59% (*SC-PDSI*),表明 新疆地区整体正在变湿,但也存在部分地区显著变干的现象。

参 考 文 献:

[1] 李忆平,李耀辉. 气象干旱指数在中国的适应性研究进展[J]. 干旱气象, 2017, 35(5): 709-723.
LI Y P, LI Y H. Advances in adaptability of meteorological drought indices in China [J]. Journal of Arid Meteorology, 2017, 35(5): 709-723.

[2] 王体健,高太长,张宏昇,等. 新中国成立 70 年来的中国大气科学研究:大气物理与大气环境篇[J]. 中国科学(地球科学), 2019, 49(12): 1833-1874.
WANG T J, GAO T C, ZHANG H S, et al. Atmospheric science research in China in the past 70 years:atmospheric physics and atmospheric environment[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2019, 49(12): 1833-1874.

[3] ADAMS H D, GUARDIOLA-CLARAMONTE M, BARRON-GAFFORD G A, et al. Temperature sensitivity of drought-induced tree mortality portends increased regional die-off under global-change-type drought[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, 106(17): 7063-7066.

[4] YU H Q, ZHANG Q, XU C Y, et al. Modified palmer drought severity index: model improvement and application[J]. Environment Interna-

- tional, 2019, 130: 104951.
- [5] 吕振涛, 李生字, 彭中敏, 等. 蒙古国植被对干旱响应的敏感性研究[J]. 地理研究, 2021, 40(11): 3016-3028.
- LV Z T, LI S Y, PENG Z M, et al. Sensitivity of vegetation responses to drought in Mongolia[J]. Geographical Research, 2021, 40(11): 3016-3028.
- [6] 宋艳玲. 全球干旱指数研究进展[J]. 应用气象学报, 2022, 33(5): 513-526.
- SONG Y L. Global research progress of drought indices[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2022, 33(5): 513-526.
- [7] HAO Z C, AGHAKOUCHAK A. Multivariate standardized drought index: a parametric multi-index model [J]. Advances in Water Resources, 2013, 57: 12-18.
- [8] NARASIMHAN B, SRINIVASAN R. Development and evaluation of soil moisture deficit index (SMDI) and evapotranspiration deficit index (ETDI) for agricultural drought monitoring[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 133(1): 69-88.
- [9] HEIM J, RICHARD R. A review of twentieth-century drought indices used in the United States[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2002, 83(8): 1149-1166.
- [10] WELLS N, GODDARD S, HAYES M J. A self-calibrating palmer drought severity index [J]. Journal of Climate, 2004, 17(12): 2335-2351.
- [11] VICENTE-SERRANO S M, BEGUERÍA S, LÓPEZ-MORENO J I. A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Climate, 2010, 23(7): 1714-1718.
- [12] 王洁, 李王成, 李晨, 等. 基于SPI指数的宁夏干旱特征[J]. 南水北调与水利科技, 2021, 19(3): 528-538.
- WANG J, LI W C, LI C, et al. Drought characteristics in Ningxia based on standardized precipitation index [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(3): 528-538.
- [13] 宋琳琳, 张强, 任余龙, 等. PDSI 及 sc_PDSI 干旱指数在中国西南地区适用性分析[J]. 中国沙漠, 2021, 41(2): 242-251.
- SONG L L, ZHANG Q, REN Y L, et al. The applicable analysis of PDSI and self-calibrating PDSI drought indices in southwest China [J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(2): 242-251.
- [14] 谢五三, 王胜, 唐为安, 等. 干旱指数在淮河流域的适用性对比[J]. 应用气象学报, 2014, 25(2): 176-184.
- XIE W S, WANG S, TANG W A, et al. Comparative analysis on the applicability of drought indexes in the Huaihe river basin[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2014, 25(2): 176-184.
- [15] 杨庆, 李明星, 郑子彦, 等. 7 种气象干旱指数的中国区域适应性[J]. 中国科学(地球科学), 2017, 47(3): 337-353.
- YANG Q, LI M X, ZHENG Z Y, et al. Regional applicability of seven meteorological drought indices in China[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2017, 47(3): 337-353.
- [16] ZHANG Q, MIAO C, SU J, et al. A new high-resolution multi-drought indices dataset for mainland China[J]. Earth System Science Data Discussions, 2024, 17(3): 1-29.
- [17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 气象干旱等级[S]. 2017.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Classification of meteorological drought[S]. 2017.
- [18] 李佳, 唐志光, 邓刚, 等. 2001-2020 年青藏高原草地物候变化遥感监测[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4): 265-274.
- LI J, TANG Z G, DENG G, et al. Remote sensing monitoring of grassland phenological changes in the Qinghai-tibetan plateau during 2001-2020[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(4): 265-274.
- [19] LI Y P, CHEN Y N, SUN F, et al. Recent vegetation browning and its drivers on Tianshan mountain, central Asia[J]. Ecological Indicators, 2021, 129: 107912.
- [20] ZONG Y L, FENG W, HUMPHREY V, et al. Human-induced and climate-driven contributions to water storage variations in the Haihe river basin, China[J]. Remote Sensing, 2019, 11(24): 3050.
- [21] 邓莉萍, 白雪娇, 李露露, 等. 辽东山区次生林优势木本植物种间联结与相关分析[J]. 生态学杂志, 2015, 34(6): 1473-1479.
- DENG L P, BAI X J, LI L L, et al. Interspecific association and correlation among dominant woody plants of secondary forest in montane region of eastern Liaoning Province, China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(6): 1473-1479.
- [22] 陶帅, 邝婷婷, 彭文甫, 等. 2000-2015 年长江上游 NDVI 时空变化及驱动力——以宜宾市为例[J]. 生态学报, 2020, 40(14): 5029-5043.
- TAO S, KUANG T T, PENG W F, et al. Analyzing the spatio-temporal variation and drivers of NDVI in upper reaches of the Yangtze River from 2000 to 2015: a case study of Yibin City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(14): 5029-5043.
- [23] 周旗, 张海宁, 任源鑫. 1961-2016 年渭河流域极端降水事件研究[J]. 地理科学, 2020, 40(5): 833-841.
- ZHOU Q, ZHANG H N, REN Y X. Study on extreme precipitation events in the Weihe river basin from 1961 to 2016[J]. Geographical Science, 2020, 40(5): 833-841.
- [24] 张茂, 张霞, 胡光成, 等. 遥感干旱指数在洛川苹果干旱监测中的适用性分析[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(1): 187-197.
- ZHANG M, ZHANG X, HU G C, et al. Applicability analysis of remote sensing based drought indices in drought monitoring of apple in Luochuan[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(1): 187-197.
- [25] DAI A G. Drought under global warming: a review[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 2011, 2(1): 45-65.
- [26] 尹家波, 郭生练, 杨妍, 等. 基于陆地水储量异常预估中国干旱及其社会经济暴露度[J]. 中国科学(地球科学), 2022, 52(10): 2061-2076.
- YIN J B, GUO S L, YANG Y, et al. Prediction of drought and its socio-economic exposure in China based on anomaly of land water reserves[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2022, 52(10): 2061-2076.
- [27] 程军, 李云祯, 邹渝. 新疆干旱时空动态及其对气候变化的响应[J]. 自然资源遥感, 2022, 34(4): 216-224.
- CHENG J, LI Y Z, ZOU Y. Spatial and temporal dynamics of drought in Xinjiang and its response to climate change[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(4): 216-224.
- [28] ZHAO H Y, GAO G, AN W, et al. Timescale differences between SC-PDSI and SPEI for drought monitoring in China[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2017, 102: 48-58.
- [29] YAO J Q, CHEN Y N, GUAN X F, et al. Recent climate and hydrological changes in a mountain-basin system in Xinjiang, China[J]. Earth-Science Reviews, 2022, 226: 103957.
- [30] 虞佳陆, 张景, 张敏, 等. 基于标准化前期降水蒸散指数的新疆干旱时空演变特征[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(4): 275-288.
- YU J L, ZHANG J, ZHANG M, et al. SAPEI-based spatial and temporal variation characteristics of drought in Xinjiang[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023, 41(4): 275-288.