

近 120 年中国干旱年际特征变化及主要的影响因子

孙嘉敏^{1,2} 王爱慧¹

1 中国科学院大气物理研究所竺可桢-南森国际研究中心, 北京 100029

2 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049

摘要 基于 1901~2020 年间标准化降水指数 (SPI-12)、标准化降水蒸散指数 (SPEI-12) 和自校准的帕默尔干旱指数 (scPDSI) 的数据集, 本文研究了中国区域近 120 年干旱的长期变化特征, 并进一步分析了三种干旱指数在中国区域存在差异的原因。结果表明: 中国西南、黄土高原、东北南部及新疆南部有显著变干的趋势; 西北东部、东北北部和华北有显著变湿的趋势。就干旱事件而言, 东北和西北地区干旱持续时间长且强度大, 但总体呈现减小的趋势, 特别是在西北东部和东北北部; 相反, 东北南部干旱事件的持续时间和强度均有所增加。全国每年约有 282 万平方公里遭受干旱, 约 30.5 万平方公里遭受特旱。不同严重程度的干旱面积均呈增加趋势, 且在 20 世纪 90 年代中期快速增长。此外, 干旱面积存在显著的年际和年代际变化特征, 周期分别为 2~3 年和 18~22 年。进一步对比发现, SPEI-12 在湿润地区与 SPI-12 及 scPDSI 有较好的一致性, 而在干旱半干旱地区一致性相对较差。在湿润地区, 降水的盈缺主导该地区的干湿变化, 而在干旱半干旱地区, 除降水外, 气温异常和土壤特性对干旱的贡献也不容忽略。因此, 在全球变暖的背景下, 针对干旱半干旱地区的研究要慎重选择干旱指数。

关键词 百年尺度 干旱 干旱指数 干旱特征 影响因子

文章编号 **中图分类号** **文献标识码**

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2024.23114

收稿日期 2024-02-01; **收修订稿日期** 2023-12-31

作者简介 孙嘉敏, 女, 1998 年出生, 硕士研究生, 主要从事气候变化与干旱研究。E-mail: sunjiamin@mail.iap.ac.cn

通讯作者 王爱慧, E-mail: wangaihui@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金创新研究群体项目(批准号: 42221004)

Funded by Innovation Research Groups of the National Natural Science Foundation of China (Grant Number: 42221004)

Interannual Variability and Key Influencing Factors of Drought in China over the Past 120 Years

Sun Jiamin^{1,2}, Wang Aihui¹

1 Nansen-Zhu International Research Centre, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract Based on datasets of three drought indices (i.e., the Standardized Precipitation Index, SPI-12, Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI-12, and self-calibrated Palmer Drought Severity Index, scPDSI) during 1901~2020, this study investigates the long-term characteristics of drought in China over the past 120 years and then explores reasons for their inconsistency. Results indicate a significant drying trend in Southwest China, the Loess Plateau, southern Northeast China, and southern Xinjiang, while regions with significant wetting trends are in eastern Northwest China, northern Northeast China, and North China. As far as drought events are concerned, both Northeast China and Northwest China are characterized by prolonged duration and higher intensity. Still, the drought tends to decrease in general, especially in eastern Northwest China and northern Northeast China. On the contrary, the duration and intensity of drought events increased in southern Northeast China. There are approximately 2.82×10^6 km² of land area each year that has experienced drought, and among them, about 3.05×10^4 km² of land areas are threatened by extreme drought. Drought areas with different severity increased with time and showed rapid growth after the mid-1990s. In addition, drought area exhibits significant interannual and decadal variabilities, with periods of 2~3-year and 18~22-year. In humid regions, three drought indices show good consistency, while in semi-arid and arid regions, their consistency is relatively low. In humid areas, the wet-dry variation is dominated by precipitation. In semi-arid and arid areas, besides precipitation, temperature and soil characteristics also play important roles in drought variations. Therefore, more attention should be paid to the drought index selection over arid and semi-arid areas in the context of global warming.

Keywords Centennial scale, Drought, Drought index, Drought characteristics, Impact factors

1 引言

干旱是对人类社会影响最严重的气候灾害之一, 制约着经济社会的可持续发展和人类生命财产安全 (Wilhite, 2000; Wang et al., 2011)。中国是干旱灾害发生频率高且影响较为严重的国家之一, 干旱造成的经济损失占有所有自然灾害的 35%

以上（王劲松等, 2012）。例如, 2022 年 6 月到 9 月底, 长江中下游及川渝地区发生了极为罕见的重大干旱事件, 此次干旱事件对长江流域的水资源调度、能源供应、农业生产和生态系统等方面都造成了十分严重的影响（李忆平等, 2022）。据国家应急管理部统计, 本次高温干旱事件共导致 3800 万人受灾, 农作物受灾面积 407.6 万公顷, 直接经济损失 328 亿元。政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告(AR6)指出, 受自然强迫和人类活动的影响, 东亚地区的农业和生态干旱呈增加趋势(Douville et al., 2021)。随着变暖持续, 中国地区干旱发生的频率增多、强度增加, 将会严重威胁水资源安全、生态安全和粮食安全(Huang et al., 2016; 韩兰英等, 2019; Cook et al., 2020)。因此, 干旱研究是当今和未来水文气候变化的热点和前沿问题(Trenberth et al., 2014)。全面了解中国过去和当前时期干旱时空分布特征和演变规律, 是开展干旱预报、预警的基础, 可为应对干旱灾害政策的制定提供科学参考。

由于干旱的复杂性和广泛影响, 目前还没有统一的干旱定义(Heim, 2002)。一般来说, 干旱的类型分为四类, 包括气象、水文、农业和社会经济干旱(American Meteorological Society, 1997; Heim, 2002; Sheffield et al., 2004; Dai, 2011)。当前基于各种气象水文数据计算的干旱指数是量化干旱最常用的方法, 对于决策者和相关领域来说, 干旱指数比原始资料更加直观, 可利用性更强(王林和陈文, 2014)。最常用的干旱指数包括: 帕默尔干旱指数(Palmer Drought Severity Index, PDSI)、标准化降水指数(Standard Precipitation Index, SPI)和标准化降水蒸散指数(Standard Precipitation Evaporation Index, SPEI)等。PDSI 的提出是干旱研究史上的里程碑, 它根据地表前期降水量、土壤含水量、径流和潜在蒸散发量, 按照水分平衡方程, 计算出气候适宜降水量及其与实际降水量之间的差值, 最后通过权重变换以及进一步考虑持续时间因素得到 PDSI 的值, 综合考虑了降水、温度和土壤特性(Palmer, 1965)。但由于其经验参数最早是基于美国大平原地区观测数据得到的, 使其不适宜在美国以外的其他地区使用(Burke et al., 2006)。为了解决这个问题, 扩大该指数使用范围和增强其空间可比性, Wells et al. (2004)发展了自校准的帕默尔干旱指数(self-calibrated Palmer Drought Severity Index, scPDSI), 该指数同样考虑了降水、温度和土壤特性, 同时基于每个台站的历史观测资料, 动态计算出该台站所对应的权重系数和持续时间, 代替原 PDSI 计算

中的经验常数，以此自动校准每个研究位置的指数（Dai, 2011; Williams et al., 2015）。然而 PDSI 和 scPDSI 只具有固定的时间尺度，不便于识别不同时间尺度的干旱，因而对不同类型的干旱表征能力有限。为表征不同时间尺度上的干旱特征，McKee et al.（1993）发展了 SPI，用于代表前 n 个月累计降水量亏缺引起的干旱。SPI 指数计算简便，被广泛用于研究和业务中。但 SPI 仅考虑累计降水亏缺对干旱的影响而没有考虑温度的作用，在全球变暖的背景下，温度对干旱起到重要的作用（Pan et al., 2021）。此外，计算任何时段的 SPI 都必须要求该台站或格点有 30 年及其以上的逐月降水资料（Hayes et al., 1999）。在 SPI 的基础上，Vicente-Serrano et al.（2010）发展综合考虑温度和降水作用的 SPEI 指数来描述干旱。

受气象观测数据起始时间的限制，前人关于中国区域干旱的研究多集中在 20 世纪 50 年代以后，且更多关注月、季尺度的干旱，对长时间尺度年际干旱的研究相对薄弱。例如，Yu et al.（2014）指出 1951~2010 年间，多年持续的严重干旱在东北和西北部分地区更加频繁；Xu et al.（2015）比较三种干旱指数后指出 1961~2012 年黄土高原、四川盆地和云贵高原在季节尺度上呈现明显的干旱趋势；Chen and Sun（2015）的研究认为 1961~2012 年我国的干旱面积有明显的年代际变化特征，2000 年后干旱更加频繁和严重；Spinoni et al.（2019）发现 1951~2016 年间东北地区干旱频率和严重程度明显增加；Wang et al.（2022）指出 1960~2019 年，尤其是 1990 年后，我国干旱呈增加趋势。随着全球及区域气候变化的影响，干旱发生特征及演化规律可能会发生变化，因此，需要对中国区域更长时间的干旱变化特征进行深入研究。此外，将三种常用的干旱指数（SPI、SPEI 和 scPDSI）一起对比分析，可为后续研究和实际应用中选择合适的干旱指数提供参考。进一步，由于干旱影响因素多、成因和形成机制复杂，而不同干旱指数所考虑的气候要素不同，对比多个指数对干旱描述的差别也有助于理解不同气候因子对干旱的影响。

本文基于英国东英格利亚大学气候研究中心（Climatic Research Unit, CRU）提供的全球 1901~2020 共 120 年的 SPI、SPEI 和 scPDSI 数据，利用多种统计方法，针对中国区域，开展了过去 120 年间年际尺度的干旱特征变化研究。通过本研究，重点回答以下两个关键的科学问题：（1）在过去 120 年间，中国区域的年

际尺度的干旱特征（次数、持续时间、强度、面积等）发生怎样的变化？（2）SPI、SPEI、scPDSI 三种干旱指数在中国所识别出的干旱特征差异及原因是什么？本研究结果可为深入认识和理解中国区域过去百年尺度上的干旱变化状况提供科学基础，并为干旱指数的选择提供一定的参考和依据。

2 资料和方法

2.1 数据

本文主要关注中国区域年际尺度的干湿状况。已有研究指出 SPEI 和 scPDSI 在 9~12 个月的时间尺度上相关性最高 (Vicente-Serrano et al., 2010)，所以对于 SPI 和 SPEI 选取时间尺度为 12 个月，每年 12 月的数据（记为 SPI-12 和 SPEI-12）来代表该年的干湿情况。

本文使用了 CRU-TS4.05 数据集 (Harris et al., 2020) 中的月降水、月温度数据，以往多个研究 (Zhang and Zhang, 2010; 王丹和王爱慧, 2017; Yao et al., 2019; Harris et al., 2020) 均已证实该数据集在中国具有较高的可信度。SPI-12 是利用 1901~2020 年 CRU-TS4.05 月降水量构造 12 个月时间尺度的累计降水量序列，采用 Gamma 概率分布函数计算累计降水量序列的概率分布，并对分布函数进行标准化处理后，最终计算得到 SPI-12 指数。SPEI-12 和 scPDSI 分别从 <https://spei.csic.es/index.html> 和 <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/drought> 下载得到，它们的计算也利用 CRU-TS4.05 数据集中的月降水和温度数据，其中，潜在蒸散量使用 FAO-56 Penman-Monteith 方法 (Penman, 1948; Monteith, 1965)，且 scPDSI 考虑了区域尺度上的土壤特性。SPI-12 和 SPEI-12 的数值范围为-5（干）~5（湿），scPDSI 的数值范围为-10（干）~10（湿）。

上述资料水平分辨率均为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ ，时段统一取 1901~2020 年，共 120 年。由于年均 scPDSI 是由每年 12 个月尺度数据直接求算数平均得到，在此过程中会平滑原本的数据信息，使其取值范围明显小于月尺度的 scPDSI，无法按照表 1 中 scPDSI 的干旱等级分类标准进行判断。为使年平均 scPDSI 量值范围与月数据一致，我们对每个格点年均 scPDSI 进行均一化，使得其范围在-1~1 之间，并与原数据比较，计算出缩放系数；接着用对应格点的缩放系数调整原月尺度的 scPDSI（均一化的逆过程），然后再计算年均 scPDSI，使得最终年尺度的 scPDSI 数据数值范围在-10~10 之间 (Williams et al., 2015)。

2.2 分析方法

2.2.1 干旱等级分类标准

表 1 给出 SPI、SPEI 和 scPDSI 的干旱等级划分标准，该标准是基于国标 GB/T 20481-2017（张存杰等, 2017），按照绝对值大小依次分级，其中，D1 表示轻旱及以上的干旱，D2 为中旱及以上的干旱，D3 为重旱及以上的干旱，D4 表示特旱。

表 1 SPI、SPEI 和 scPDSI 的干旱等级分类标准

Table 1 Drought classification criteria of SPI, SPEI, and scPDSI

等级	类型	标准化降水指数	标准化降水蒸散指数	自校准的帕默尔干旱指数
1	轻旱	$-1.0 < \text{SPI} \leq -0.5$	$-1.0 < \text{SPEI} \leq -0.5$	$-2.0 < \text{scPDSI} \leq -1.0$
2	中旱	$-1.5 < \text{SPI} \leq -1.0$	$-1.5 < \text{SPEI} \leq -1.0$	$-3.0 < \text{scPDSI} \leq -2.00$
3	重旱	$-2.0 < \text{SPI} \leq -1.5$	$-2.0 < \text{SPEI} \leq -1.5$	$-4.0 < \text{scPDSI} \leq -3.0$
4	特旱	$\text{SPI} \leq -2.0$	$\text{SPEI} \leq -2.0$	$\text{scPDSI} \leq -4.0$

2.2.2 干旱事件特征定义

一次干旱事件定义为连续一年及以上处于干旱状态（D1），干旱事件次数为研究时段内发生的干旱事件总数；干旱事件持续时间为每次干旱事件的发生年数；干旱事件强度定义为每次干旱事件中干旱指数的总和。在研究年际干旱事件中，干旱平均持续时间为事件持续的平均年数；干旱平均强度为干旱指数的平均值。

2.2.3 其他统计方法

小波分析（Wavelet Analysis）也称多分辨率分析（Multiresolution Analysis），最早由 J. Morlet（1982）提出，称为 Morlet 小波。在气候诊断中，小波分析方法不仅可以分离出气候序列的多时间尺度上的变化信息，还可以明确变化的时间位置（魏凤英, 2007），因此，被广泛用于研究气候要素时间序列的变化中。在本研究中，使用 Morlet 小波分析了三种干旱指数在不同干旱强度下，干旱面积的周期随时间演变的特征，并引入影响锥忽略小波边缘效应，给定显著性水平 $\alpha=0.1$ 。

我们还采用了皮尔逊相关系数（Pearson 相关系数）和均方根偏差（Root Mean Square Deviation, RMSD）的方法来表示不同干旱指数之间的差别。其中，Pearson

相关系数是描述两个随机变量线性相关的统计量，一般用 r 表示，取值范围为-1.0~1.0。当 $r>0$ 时，两变量呈正相关，越接近 1.0，正相关越显著；当 $r<0$ 时，两变量呈负相关，越接近-1.0，负相关越显著；当 $r=0$ 时，则表明两变量相互独立。本文利用 Pearson 相关系数来描述 SPI-12、SPEI-12 和 scPDSI 两两之间的相关性。RMSD 能对两组数据之间的差异进行定量描述，定义为：

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$$

，在本研究中 x_i 代表 SPEI-12， y_i 代表 SPI-12/scPDSI， n

表示 SPEI-12 和 SPI-12/scPDSI 不缺测的格点数。RMSD 的值越小表示两组数据之间的相似度越高。本文利用 RMSD 来量化三种干旱指数之间差别。

3 结果分析

3.1 1901-2020 年中国干湿年际变化趋势

图 1 给出三种干旱指数描述在过去 120 年中国区域的干湿变化趋势。三种干旱指数表示的干湿变化格局的空间分布具有较好的一致性，其中，西南、黄土高原、东北南部及新疆南部有显著变干的趋势，西北东部、东北北部和华北有显著变湿的趋势；在西北地区东部三者差异最大(图 1a-1c)。值得注意的是华北地区，已有大量研究表明华北在 1961 年后仍处于干旱化的趋势 (Yu et al., 2014; 马柱国等, 2018)，这是因为研究所关注的时段不同，我们也分析了 1961~2020 年三种指数的干湿变化趋势，华北地区确有显著变干的趋势。从图 1d 中可以看出，全国具有显著变干趋势的面积占比 (22.9%) 略小于具有显著变湿趋势的面积占比 (23.6%)。其中，SPI-12 识别出具有显著变干趋势的面积 (9.2%) 最少，具有显著变湿趋势的面积 (30.4%) 最多；SPEI-12 与 SPI-12 完全相反，显著变干趋势的面积达到 32.1%，显著变湿趋势的面积仅为 13.5%；scPDSI 识别出具有显著变干和变湿趋势的面积相差不大，分别为 27.4%和 26.9%。

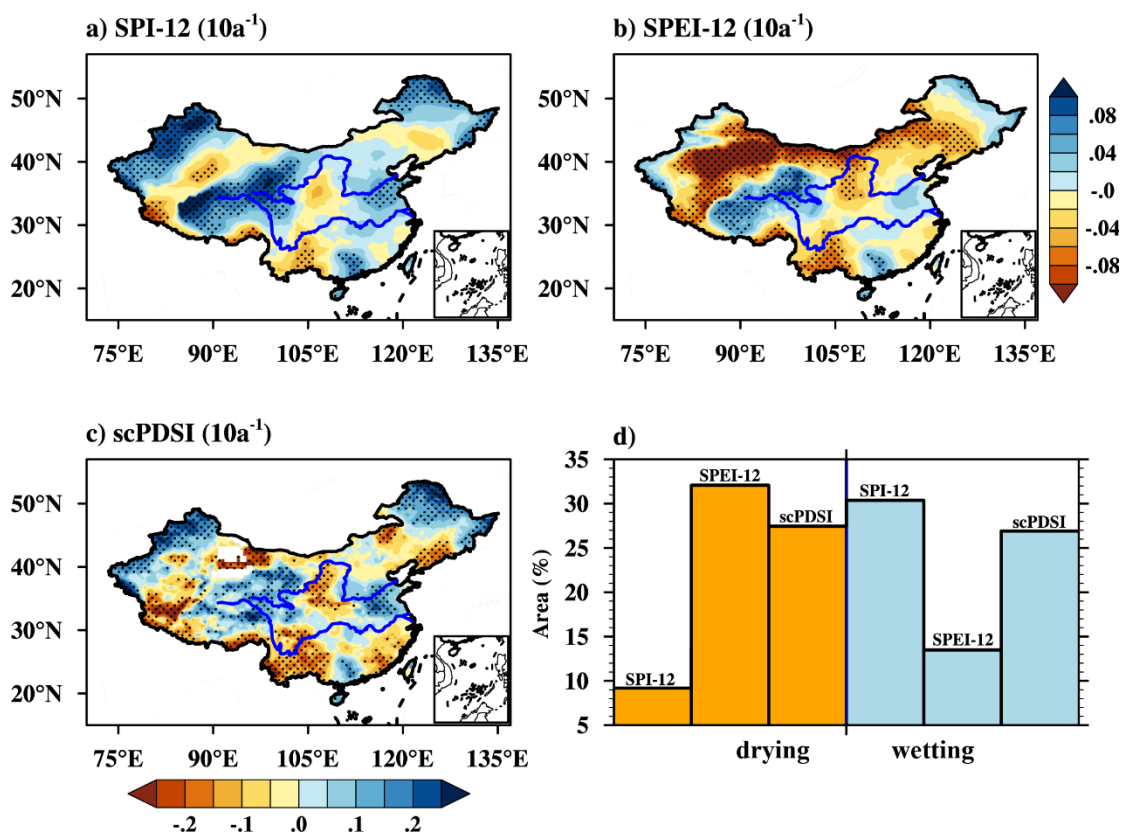


图 1 1901~2020 年中国区域年际尺度干旱指数线性趋势的空间分布，单位： $/10$ 年。(a) SPI-12，(b) SPEI-12，(c) scPDSI，其中，正值表示具有湿润的趋势，负值表示具有干旱的趋势，t-test 进行显著性检验，打点区域置信水平达到 90%。

(d) 三种干旱指数具有显著变湿（蓝色）和变干（黄色）趋势的面积占全国土地面积的百分比。

Fig. 1 Spatial distribution of linear trends in interannual scale drought index in China from 1901 to 2020, units: $/10a$. (a) SPI-12, (b) SPEI-12, (c) scPDSI. Positive/negative values indicate a wetter/drier trend. Dotted regions denote that the trend is significant at the 90% confidence level from a two-tailed Student's t-test. (d) Percentage of the national land area with significant wetter (blue) and drier (yellow) trends from the three drought indices.

为了分析三种干旱指数长期变化线性趋势空间分布差异的原因，绘制了 1901~2020 年中国年平均温度和降水长期变化的线性趋势，如图 2 所示。可以看出，除少数地区外，近 120 年中国区域温度均有显著增加趋势，其中东北西部及西北西部增加最为明显，超过 $0.14^{\circ}\text{C}/10$ 年（图 2a）。降水在中国绝大部分地区为增加的趋势，在黄淮和华南南部增加的最为显著，西南地区减少的最显著（图

2b)。由于 SPI-12 只考虑了降水而没有考虑温度升高引起的蒸发增加对干旱的贡献，因此其干湿变化的空间趋势与降水空间趋势大体一致，结果相对偏湿；SPEI-12 高估了气温异常对干旱的贡献，所以与其他两个指数相比其在东北西部和西北西部结果相对偏干；scPDSI 除温度和降水外还考虑了土壤特性，所以其识别出具有显著变干和变湿的面积占比介于 SPI-12 和 SPEI-12 之间。

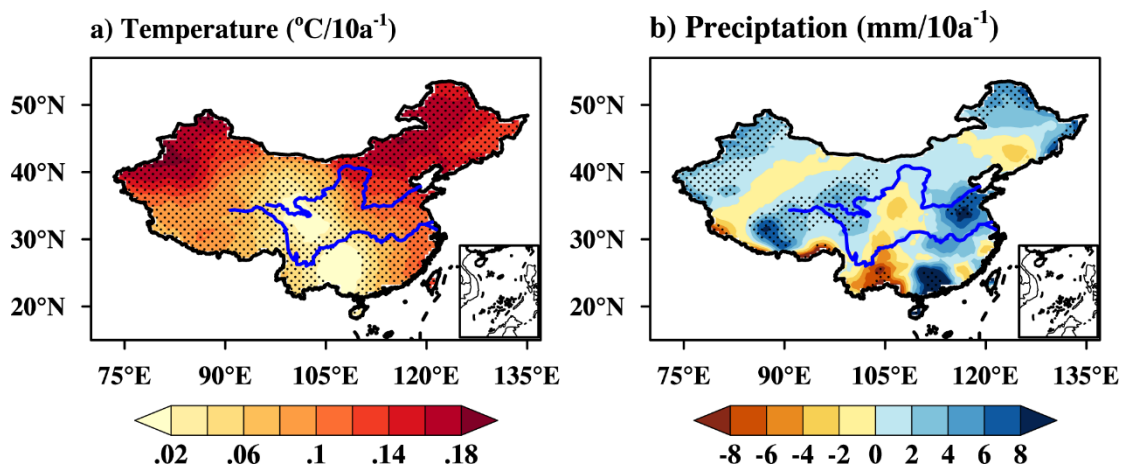


图 2 1901~2020 年中国年平均 (a) 温度 (°C/10 年) 和 (b) 降水 (mm/10 年) 的线性趋势的空间分布，打点区域置信水平达到 90%。

Fig. 2 Spatial distribution of linear trends of annual mean (a) temperature (units: °C /10a), (b) precipitation (units: mm/10a) in China from 1901 to 2020. Dotted regions denote that the trend is significant at the 90% confidence level from a two-tailed Student's t-test.

3.2 1901-2020 中国干旱事件特征参数的空间分布及趋势

图 3 给出 1901~2020 年间干旱事件的次数、平均持续时间和平均强度的空间分布。从干旱事件次数的空间分布看 (图 3a-3c)，东北、华南、新疆西部和云南西南部干旱事件较多，平均在 20 次以上，新疆南部干旱事件较少；SPEI-12 相较于其他两个指数在全国大部分地区能够识别出更多的干旱事件，scPDSI 识别出的干旱事件次数最少；三种干旱指数识别出的干旱事件次数在长江中下游地区和东北东部差异最大。干旱事件平均持续时间从东南向西北逐渐增加，东北、西北和西南地区干旱平均持续时间最长，平均在 2 年以上，东南地区干旱平均持续时间最短；scPDSI 识别出的干旱事件平均持续时间在全国大部分地区长于其余两个指数 (图 3d-3f)。干旱事件的平均强度也从东南向西北逐渐增加，西北地区干旱事件的平均强度最大 (图 3g-3i)。同样，我们也分析了极端干旱事件特征的

空间分布,西北和东北地区极端干旱事件发生次数多,平均持续时间长且强度大。结合干旱事件持续时间和强度线性趋势的空间分布(图4),西北、东北北部和黄淮地区干旱事件的持续时间和强度均显著减小;相反,东北南部干旱事件的持续时间和强度均有所增加。SPEI-12 在新疆东部地区与其余两个指数表现相反,表现为干旱事件的持续时间显著增长强度显著增大。

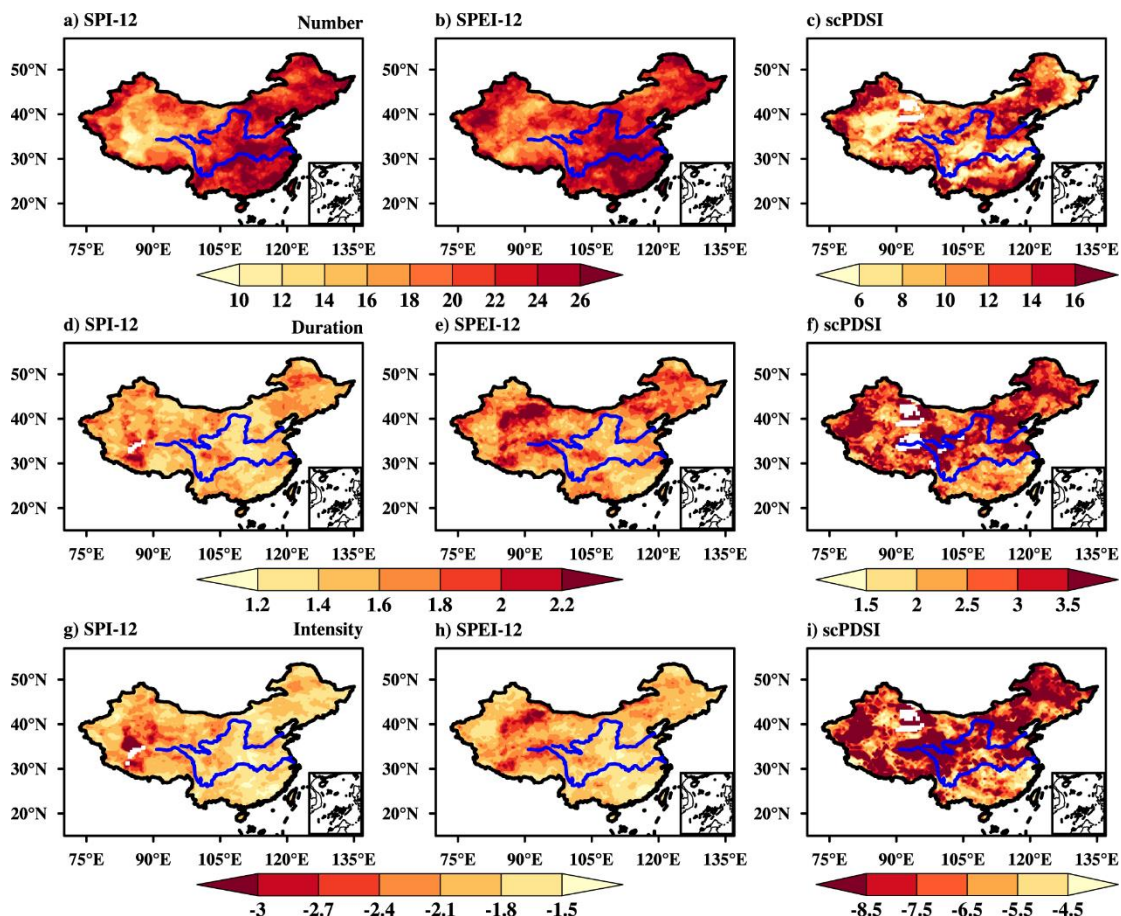


图3 1901~2020年中国区域干旱事件次数(a-c)、平均持续时间(d-f)和平均强度(g-i)的空间分布。其中,(a)、(d)、(g)是SPI-12的结果,(b)、(e)、(h)是SPEI-12的结果,(c)、(f)、(i)是scPDSI的结果。

Fig. 3 Spatial distribution of number (a-c), average duration (d-f), and average intensity (g-i) of regional drought events in China from 1901 to 2020. (a, d, g), (b, e, h), and (c, f, i) are based on SPI-12, SPEI-12, and scPDSI.

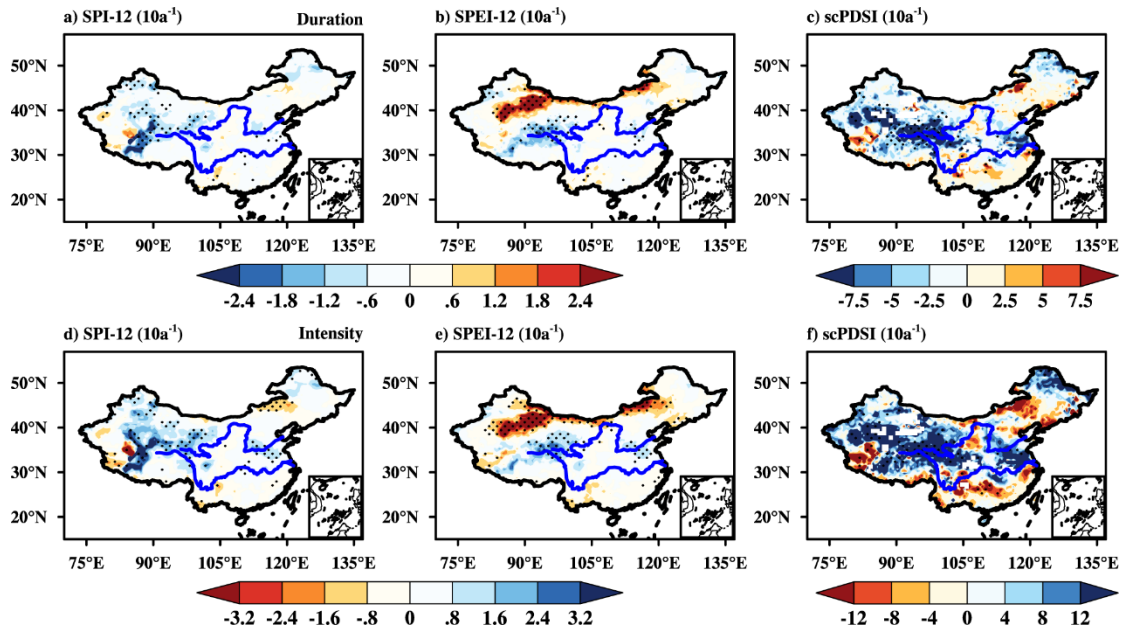


图 4 1901~2020 年中国区域干旱事件持续时间 (a-c) 和强度 (d-f) 线性趋势的空间分布, 打点区域置信水平达到 90%。(a)、(d) 是 SPI-12 的结果, (b)、(e) 是 SPEI-12 的结果, (c)、(f) 是 scPDSI 的结果。

Fig. 4 Spatial distribution of linear trends in the duration (a-c) and intensity (d-f) of regional drought events in China from 1901 to 2020. (a, d), (b, e), and (c, f) are based on SPI-12, SPEI-12, and scPDSI. Dotted regions denote that the trend is significant at the 90% confidence level from a two-tailed Student's t-test.

综合来看, 1901~2020 年东南地区虽然干旱发生次数多, 但持续时间短且强度小; 东北地区干旱发生次数多、持续时间长, 平均强度大, 南部干旱事件持续时间和强度均有显著增加的趋势, 而北部变化趋势与南部相反; 西北地区虽然干旱发生次数少但平均持续时间长且强度大, 但持续时间和强度均有所减小, 这与 Dai (2013)、韩兰英等 (2019) 和 Wang and Kong (2021) 的结论基本一致。

3.3 1901-2020 中国干旱面积的变化

根据表 1 的干旱等级分类标准, 分别计算了不同等级干旱发生面积占中国区域无缺测格点总面积的百分比, 即干旱面积比 (图 5)。这三种指数识别的干旱面积比具有较一致的变化, 不同强度的干旱面积均呈增加趋势, 且在 20 世纪 90 年代中期快速增长, 其中, 20 世纪 40 年代中期到 50 年代末、20 世纪 80 年代中期和 90 年代初干旱发生区域相对较小; 不同强度的干旱面积占比均有周期性变化 (图 5a-5c), 这与 Zou et al. (2005, 2010) 的结论基本一致。由图 5d 可见, 干

旱面积具有显著的年代际变化特征，研究时段内 SPI-12 的干旱面积占比最小，其中 20 世纪初期到 80 年代中期 scPDSI 干旱面积占比最大，其后 SPEI-12 干旱面积占比最大。结合年平均温度和降水的时间序列（图 5e、5f），20 世纪 40 年代中期到 50 年代底温度为负距平、降水为正距平导致了该时段内干旱区域相对较小，而 1990 年附近温度和降水经历由负转正的过程，两者综合作用导致 20 世纪 80 年代中期和 90 年代初干旱区域相对较小；1990 年后的快速升温导致 SPEI-12 干旱面积占比最大。

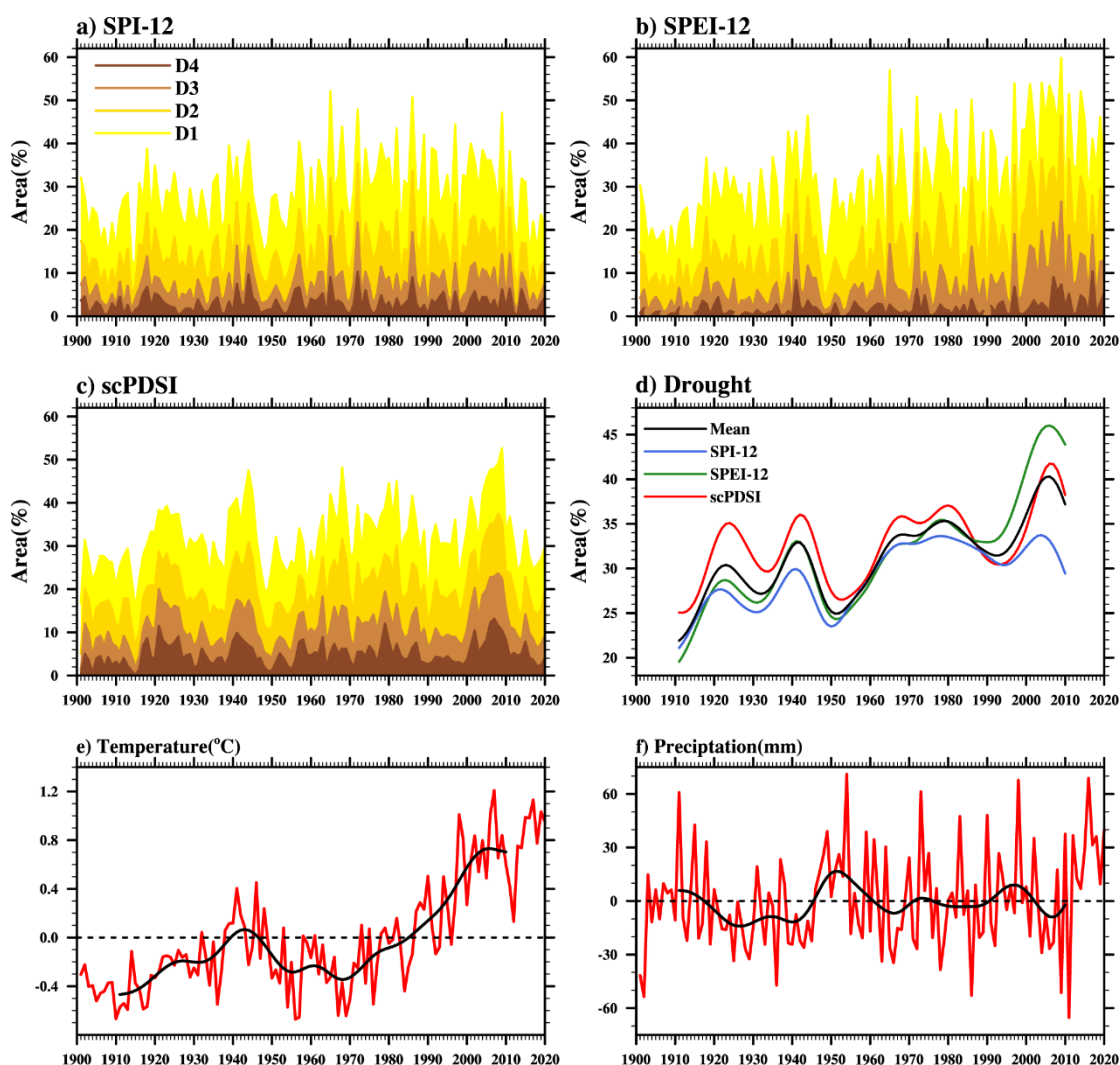


图 5 按照表 1 的干旱标准，1901~2020 年中国区域不同等级干旱面积占全国土地面积百分比的时间序列，(a) SPI-12，(b) SPEI-12，(c) scPDSI。(d) 中国干旱发生面积百分比经过 21 年低通滤波后的时间序列，蓝线表示 SPI-12，绿线表示 SPEI-12，红线表示 scPDSI，黑线表示以上三种干旱指数的平均值。(e) 温度 (°C) 和 (f) 降水 (mm) 为 1901~2020 年中国区域年平均温度和降水距平的时间序列。

间序列，其中红线为年均值，黑线表示年代际变化，是年均值经过 21 年低通滤波后的结果。

Fig. 5 According to the drought criteria in Table 1, the time series of the percentage of drought areas of different categories over China from 1901 to 2020, (a) SPI-12, (b) SPEI-12, and (c) scPDSI. (d) The time series of the 21-year low-pass filtering of the percentage of drought area (%) in China. (e) Annual mean temperature ($^{\circ}\text{C}$) and (f) precipitation (mm) averaged over the Chinese Mainland from 1901 to 2020. The red line is the annual mean, and the black line represents the results of the 21-year low-pass filtering, indicating the interdecadal change.

基于表 2，全国每年约有 282 万平方公里（占国土面积的 30.5%，约 1.69 个新疆大小）遭受干旱，约 30.5 万平方公里（占国土面积的 3.3%）遭受特旱。干旱面积平均每十年增加约 9.5 万平方公里，特旱面积每十年增加约 0.8 万平方公里。随着干旱严重程度的增加，干旱面积变化趋势和年际变率逐渐减小。虽然三种干旱指数所检测到的不同程度干旱面积在长期趋势和年际变率上呈现出一致的特征，但是在量值上却差异明显。与其它两个指数相比，scPDSI 识别出的不同程度的干旱面积占比最大，特旱（D4）面积增长趋势和年际变率也最大。SPEI-12 识别出的特旱面积占比最小，除特旱外，其面积增长趋势和年际变率最大。对于 SPI-12，不同严重程度的干旱面积增长趋势最小，除特旱外，干旱面积占比也最少。

表 2 1901~2020 年中国区域不同等级干旱面积的百分比（%）、变化趋势（%/10 年）和年际变率（%），*表示变化趋势的置信水平达到 95%。

Table 2 Percentage (%), linear trend (%/10a), and interannual variability (%) of drought areas of different categories in China from 1901 to 2020, * indicates that the trend is significant at the 95% confidence level.

	面积百分比 (%)			趋势 (%/10 年)			年际变率 (%)		
	SPI-12	SPEI-12	scPDSI	SPI-12	SPEI-12	scPDSI	SPI-12	SPEI-12	scPDSI
D1	28.2	31.3	32.0	0.65*	1.83*	0.62*	8.57	9.40	7.08
D2	15.2	17.1	20.4	0.38*	1.35*	0.51*	6.09	7.23	5.87
D3	7.0	7.0	11.2	0.20	0.61*	0.29*	3.92	4.48	4.40

三种干旱指数在不同严重程度下的干旱面积均存在周期性变化,为了进一步分析干旱面积主要演变周期信号,分别对三种干旱指数干旱面积占比时间序列进行 Morlet 小波分析(图 6)。总体来看,1901~2020 年,三种干旱指数干旱面积变化的主要周期基本一致,存在显著的年际和年代际变化特征,周期分别为 2~3 年和 18~22 年。其中, SPI-12 和 scPDSI 在 120 年期间具有明显的准 20 年变化周期,而 SPEI-12 最显著的周期是准 40 年尺度。SPI-12 和 scPDSI 识别的干旱面积在 1930~1950 年期间发生了准周期为 20 年的转折;三种指数干旱面积 2~3 年的年际变化周期在 1960~1970、1980~1990 和 2005~2010 年间较为明显;SPEI-12 干旱面积在 1955~1970 年期间发生了准 40 年周期的多年代际尺度特征的转折;scPDSI 干旱面积在 1945~1952 年和 1985~2000 年期间 5~7 年的周期变化转折较为显著。其中 scPDSI 的结果与 Wang et al. (2016) 的结果基本一致。同样,我们也分析了 D2~D4 情况的分析,因为 D4 比较罕见,时间序列中 0 值较多,所以没有显示出明显的周期, D2 和 D3 情况下的结果与 D1 相似。

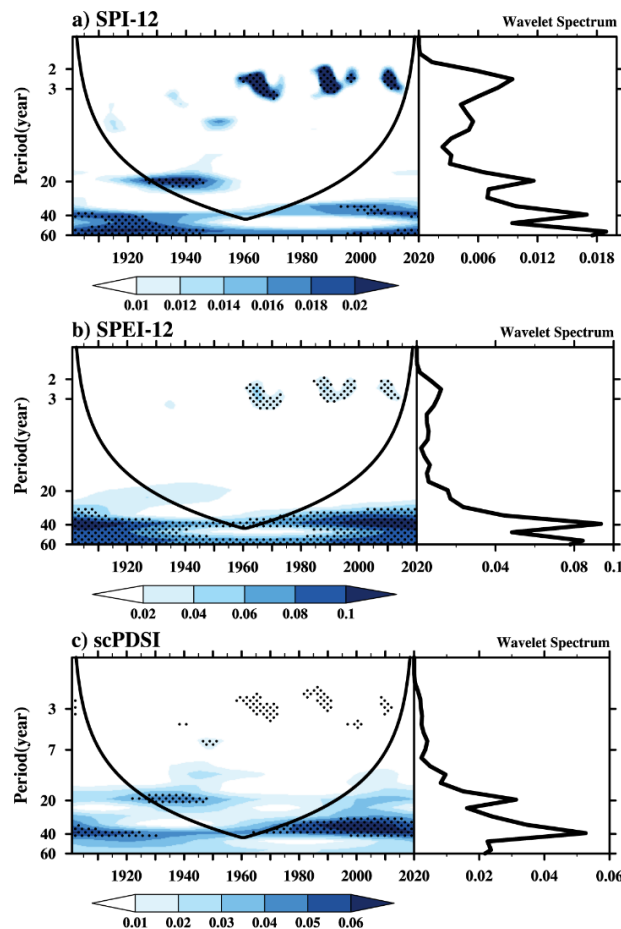


图 6 1901~2020 年中国区域三种干旱指数计算得到的干旱面积百分比时间序列的 Morlet 小波图：(a) SPI-12, (b) SPEI-12, (c) scPDSI。左侧主图为小波功率谱，打点区域表示置信水平达到 90%，曲线上部为信度区间，外部区域具有边界效应；右侧附图为对应的功率谱。

Fig. 6 Morlet wavelet analysis of annual drought area percentage in China during 1901-2020 based on three drought indices. (a) SPI-12, (b) SPEI-12, (c) scPDSI. The left main diagram shows the wavelet power spectrum, and dotted regions are significant at the 90% confidence level. The upper part of the blank curve is the confidence interval, and the outer region indicates the boundary effect. The right attached figure shows the power spectrum.

3.4 中国区域三种干旱指数差异的原因初探

为了探寻三种干旱指数在中国区域存在差异的原因，图 7 给出三种干旱指数两两计算得到的 Pearson 相关系数的空间分布。从图 7 可以看出，三种干旱指数具有较好的一致性，在全国大部分地区相关系数达到 0.65 以上，其中 SPI-12 和 SPEI-12 在全国范围内的平均相关系数为 0.92，相关性最好。SPEI-12 和 SPI-12 及 scPDSI 相关系数的空间分布均表现为东部和西南地区相关性较好、西北地区相关性较差，这与李忆平和李耀辉（2017）的结论基本一致。关于西北地区三种指数之间相关性较差的可能原因是构建 CRU-TS4.05 中所用该地区实测数据较少，温度与降水具有较大的不确定性，且下垫面较为复杂，计算的潜在蒸散量也存在较大差异（闻新宇等, 2006; 王丹和王爱慧, 2017），其中，SPEI-12 和 SPI-12 在西北地区的相关性较差表明温度对西北地区干旱变化有重要的影响。另外，SPI-12 与 scPDSI 在西北地区相关性好于其他两对，可能是因为 scPDSI 既考虑了温度又考虑了土壤特性变化，而二者的综合作用与降水变化较一致。

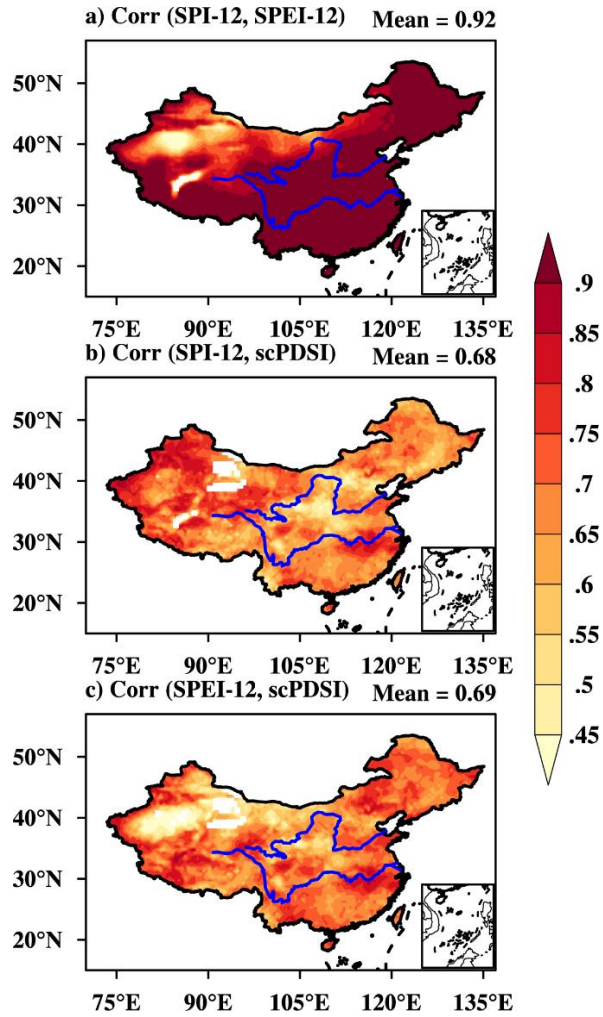


图 7 1901~2020 年中国区域 SPI-12、SPEI-12 和 scPDSI 两两相关的 Pearson 相关系数的空间分布（填色区域代表去除自相关后，相关系数置信水平达到 99%），右上角的值是中国区域相关系数的平均值：（a）SPEI-12 与 SPI-12，（b）SPI-12 与 scPDSI，（c）SPEI-12 与 scPDSI。

Fig. 7 Spatial distribution of Pearson correlation coefficients between (a) SPEI-12 and SPI-12, (b) SPI-12 and scPDSI, and (c) SPEI-12 and scPDSI in China from 1901 to 2020. The shaded regions are significant at the 99% confidence level after excluding the autocorrelation. The values in the top-right corners are areal-averaged correlation coefficients for the entire China.

为了定量描述干旱指数之间的差异，进一步分析三种干旱指数在不同区域存在差异的原因，给出干旱情况下（D1），三种干旱指数两两之间的均方根偏差分别与年均温度长期变化的线性趋势和多年平均降水的关系，如图 8 所示。因为 SPEI-12 在计算方法上与 SPI-12 类似（但考虑了潜在蒸发变化的影响），计算原

理上与 scPDSI 一样都是基于水平衡方程得到，因此，SPEI-12 可以与 SPI-12 和 scPDSI 比较。由于 scPDSI 绝对值较大，为了便于比较，在求 RMSD 前对三种干旱指数分别做了均一化处理，使得各自数值范围在-1~1 之间。为使结果更加直观，我们以 1961~1990 年 30 年的气候平均年降水量为基准（王延禄, 1990; Hulme, 1996; Wang et al., 2020）并结合 RMSD 的结果对干湿气候区进行划分。将年降水量少于 250mm 的地区划分为干旱区；年降水量在 250~500mm 的区域划分为半干旱区；年降水量大于 500mm 的区域划分为半湿润区和湿润区（本研究中将半湿润区和湿润区合并，以下统称湿润区）。从图 8a 和 8b 中可以看出，SPEI-12 与 SPI-12 的 RMSD 随年温度趋势的增加而增大，这是因为 SPI-12 没有考虑温度，所以随温度升高 SPEI-12 与 SPI-12 差异明显；而 SPEI-12 与 scPDSI 均考虑了温度的影响，因此随年温度趋势增加变化不大，始终稳定在 0.18 左右。由图 8c 可见，SPEI-12 与 SPI-12 的 RMSD 与多年平均年降水呈明显的指数关系，在年降水量低于 500mm 的地区，RMSD 随降水的增加显著减小；在年降水量高于 500mm 的地区，RMSD 稳定在 0.075 左右。上述结果可能原因为：在湿润地区，潜在蒸散波动的贡献相对较小，累计降水的异常在计算 SPEI-12 中起主导作用，与 SPI-12 计算较一致，所以 SPEI-12 与 SPI-12 差异较小；在干旱半干旱区，相对降水异常，温度主导的潜在蒸散量值变化在水平衡方程中所占比例偏大，当降水较少时，降水与潜在蒸散之间差异较大，因此，SPEI-12 和 SPI-12 的差别也较大。Wang et al. (2020) 通过分析 SPEI 对潜在蒸散和降水的敏感性后指出，在年降水量少于 400mm 的干旱区，相对于降水异常，潜在蒸散波动对干湿变化的影响更大；在年降水量大于 400mm 的湿润地区，降水异常对干湿变化的影响更大。我们的结果与之基本一致。根据图 8d，在年降水量小于 250mm 的干旱地区，SPEI-12 和 scPDSI 的差异随降水的减少急速增大，在降水量大于 250mm 的地区，两者差异随年降水的增加缓慢减小后稳定在 0.175 左右。虽然 SPEI-12 和 scPDSI 都考虑了降水和温度变化对干旱的影响，但在年降水量小于 250mm 的地区，两者存在一定差异，这可能是因为在干旱区，与 scPDSI 相比，SPEI-12 对潜在蒸散的变化更为敏感（Cook et al., 2014; Hoffmann, 2020），也可能因为在该区域土壤湿度对 scPDSI 的贡献相对较大（Dai, 2004; Hoffmann, 2020）。以上结果与杨庆等（2017）的结论基本一致。另外，我们还对四种（D1-D4）不同等级的干旱做了

相同的分析，结果与上述类似。综合考量，我们可以得到结论，在湿润地区 SPEI-12 与 SPI-12 及 scPDSI 有较好的一致性，降水的盈缺主导该地区的干湿变化，在干旱半干旱地区 SPEI-12 与 SPI-12 及 scPDSI 的一致性较差，除降水外，气温异常和土壤特性对干旱的贡献也不容忽略，因此在全球变暖的背景下，干旱半干旱地区要针对所关注的问题应慎重选择干旱指数。

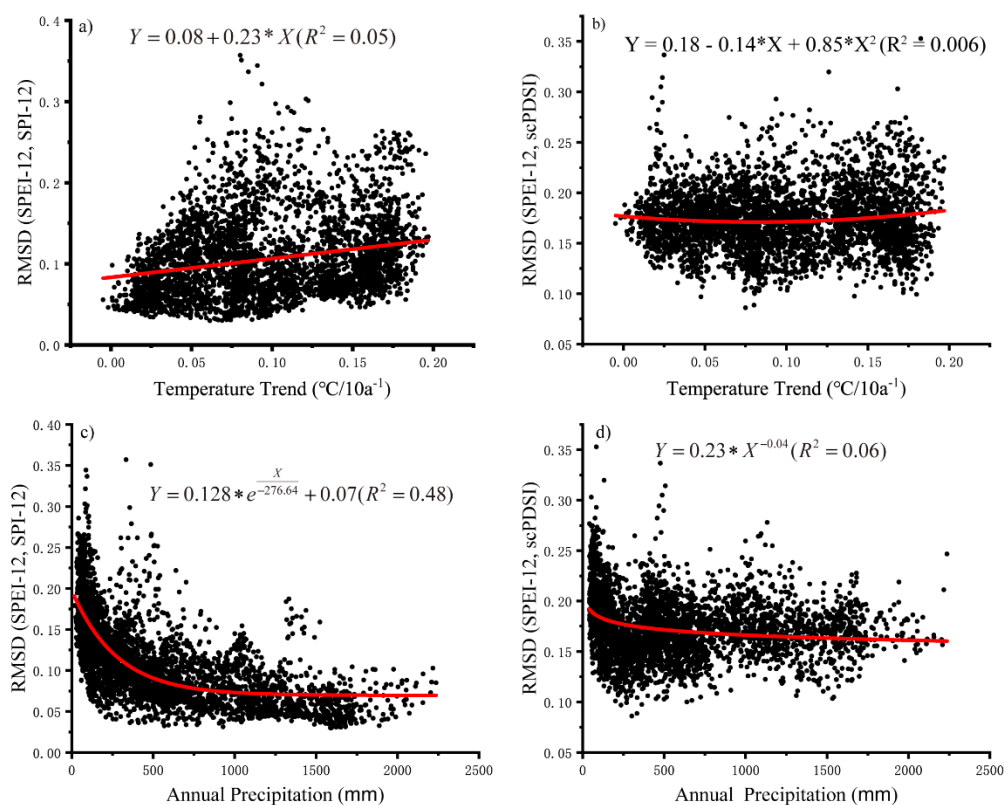


图 8 1901~2020 年中国区域在干旱情况下,干旱指数间的均方根偏差 (RMSD) 与年平均温度的线性趋势 (单位: °C/10 年) 和多年平均降水 (单位: mm) 之间的关系。散点表示每个格点的结果, 红色实线为散点的拟合结果。(a) 为 SPEI-12 和 SPI-12 的 RMSD 与温度线性趋势的关系。(b) 为 SPEI-12 和 scPDSI 的 RMSD 与温度线性趋势的关系。(c) 为 SPEI-12 和 SPI-12 的 RMSD 与多年平均降水的关系; (d) SPEI-12 和 scPDSI 的 RMSD 与多年平均降水的关系。

Fig. 8 The relationship between the RMSD of three drought indices under drought conditions and linear trend of annual temperature (units: °C/10a) and mean annual precipitation (units: mm) in China from 1901 to 2020. Scatters represent each grid point and the red solid line is the fitting equations. (a) RMSD of SPEI-12 and SPI-12 versus

temperature trend, (b) RMSD of SPEI-12 and scPDSI versus temperature trend, (c) RMSD of SPEI-12 and SPI-12 versus annual precipitation, and (d) the RMSD of SPEI-12 and scPDSI versus annual precipitation.

4 总结

本文基于 1901~2020 年 SPI-12、SPEI-12、scPDSI 三种干旱指数数据集，对比分析了近 120 年中国区域干旱的长期变化特征，并探寻三种干旱指数在中国区域存在差异的原因，得到以下主要结论：

总体上看，三种干旱指数所反映出的中国区域 1901~2020 年干旱的变化特征较为一致，具体如下：中国西南、黄土高原、东北南部及新疆南部有显著变干的趋势；西北东部、东北北部和华北有显著变湿的趋势。就干旱事件而言，东北地区干旱发生次数多，平均持续时间长且强度大，其中，东北南部干旱事件的持续时间和强度均有所增加；西北地区虽然干旱发生次数少，但平均持续时间长且强度大，而且干旱事件的持续时间和强度均显著减小；东南地区虽然干旱发生的次数多，但持续时间短且强度小。干旱影响方面，全国每年约有 282 万平方公里（占国土面积的 30.5%，约 1.69 个新疆大小）遭受干旱，约 30.5 万平方公里（占国土面积的 3.3%）遭受特旱；并且不同严重程度的干旱面积均呈增加趋势，且在 20 世纪 90 年代中期快速增长；此外，干旱面积存在显著的年际和年代际变化特征，周期分别为 2~3 年和 18~22 年。

对比三个干旱指数的结果发现，SPI-12 识别出的具有显著变干趋势的面积最少且干旱面积增长趋势最小；SPEI-12 能识别出更多的干旱事件，并且具有显著变干趋势的面积最多，在 20 世纪 80 年代中期以后，SPEI-12 识别出的干旱面积占比最大；scPDSI 识别出的干旱事件次数最少但平均持续时间最长，不同程度的干旱面积占比最多，特旱面积增长趋势和年际变率最大。在湿润地区，SPEI-12 与 SPI-12 及 scPDSI 有较好的一致性，而在干旱半干旱地区一致性较差。这是由于在湿润地区，降水的盈缺主导该地区的干湿变化；而在干旱半干旱地区，除降水外，气温异常和土壤特性对干旱的贡献也不容忽略，因此在全球变暖的背景下，干旱半干旱地区要针对所关注的问题慎重选择干旱指数。

参考文献 (References)

- American Meteorological Society. 1997. Meteorological drought-policy statement [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78:847-849.
- Burke E J, Brown S J, Christidis N. 2006. Modeling the recent evolution of global drought and projections for the twenty-first century with the Hadley Centre climate model [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 7(5): 1113-1125. doi:10.1175/JHM544.1
- Chen H, Sun J. 2015. Changes in drought characteristics over China using the standardized precipitation evapotranspiration index [J]. *Journal of Climate*, 28(13): 5430-5447. doi:10.1175/JCLI-D-14-00707.1
- Cook B I, Mankin J S, Marvel K, et al. 2020. Twenty-first century drought projections in the CMIP6 forcing scenarios [J]. *Earth's Future*, 8(6): e2019EF001461. doi:10.1029/2019EF001461
- Cook B I, Smerdon J E, Seager R, et al. 2014. Global warming and 21st century drying [J]. *Climate Dynamics*, 43: 2607-2627. doi:10.1007/s00382-014-2075-y
- Dai A, Trenberth K E, Qian T. 2004. A global dataset of Palmer Drought Severity Index for 1870–2002: Relationship with soil moisture and effects of surface warming [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 5(6): 1117-1130. doi:10.1175/JHM-386.1
- Dai A. 2011. Drought under global warming: a review [J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(1): 45-65. doi:10.1002/wcc.81
- Dai A. 2013. Increasing drought under global warming in observations and models [J]. *Nature Climate Change*, 3(1): 52-58. doi:10.1038/nclimate1633
- Douville H K, Raghavan J, Renwick R P, et al. 2021. Water Cycle Changes [M]. *Climate change 2021: the physical science basis*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press:1055-1210. doi:10.1017/9781009157896.010
- 韩兰英, 张强, 贾建英, 等. 2019. 气候变暖背景下中国干旱强度、频次和持续时间及其南北差异性 [J]. *中国沙漠*, 39(05):1-10. Han Lanying, Zhang Qiang, Jia Jianying, et al. 2019. Drought severity, frequency, duration and regional differences in China [J]. *Journal of Desert Research (in Chinese)*, 39(5): 1-10. doi:10.7522/j.issn.1000-694X.2018.00112
- Harris I, Osborn T J, Jones P, et al. 2020. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset [J]. *Scientific data*, 7(1): 109. doi:10.1038/s41597-020-0453-3

- Hayes M J, Svoboda M D, Wilhite D A, et al. 1999. Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80(3): 429-438. doi:10.1175/1520-0477(1999)080<0429:MTDUTS>2.0.CO;2
- Heim Jr, Richard R. 2002. A review of twentieth-century drought indices used in the United States [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(8): 1149-1166. doi:10.1175/1520-0477-83.8.1149
- Hoffmann D, Gallant A J E, Arblaster J M. 2020. Uncertainties in drought from index and data selection [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(18): e2019JD031946. doi:10.1029/2019JD031946
- Huang J, Yu H, Guan X, et al. 2016. Accelerated dryland expansion under climate change [J]. *Nature Climate Change*, 6(2): 166-171. doi:10.1038/nclimate2837
- Hulme M. 1996. Recent climatic change in the world's drylands [J]. *Geophysical Research Letters*, 23(1): 61-64. doi:10.1029/95GL03586
- 李忆平, 李耀辉. 2017. 气象干旱指数在中国的适应性研究进展 [J]. *干旱气象*, 35(5): 709-723. Li Yiping, Li Yaohui. 2017. Advances in adaptability of meteorological drought indices in China [J]. *Journal of Arid Meteorology (in Chinese)*, 35(5):709-723. doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-05-0709
- 李忆平, 张金玉, 岳平, 等. 2022. 2022 年夏季长江流域重大干旱特征及其成因研究 [J]. *干旱气象*, 40(5): 733-747. Li Yiping, Zhang Jinyu, Yue Ping, et al. 2022. Study on characteristics of severe drought event over Yangtze River Basin in summer of 2022 and its causes [J]. *Journal of Arid Meteorology (in Chinese)*, 40(5):733-747. doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2022)-05-0733
- 马柱国, 符淙斌, 杨庆, 等. 2018. 关于我国北方干旱化及其转折性变化 [J]. *大气科学*, 42(04): 951-961. Ma Zhuguo, Fu Congbin, Yang Qing, et al. 2018. Drying trend in northern China and its shift during 1951-2016 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 42(04): 951-961. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1802.18110.
- McKee T B, Doesken N J, Kleist J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales [C]//*Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, 17(22): 179-183.
- Monteith J L. 1965. *Evaporation and environment* [C]//*Symposia of the society for experimental biology*. Cambridge University Press (CUP) Cambridge, 19: 205-234.

- Morlet J, Arens G, Fourgeau E, et al. 1982. Wave propagation and sampling theory—Part I: Complex signal and scattering in multilayered media [J]. *Geophysics*, 47(2): 203-221. doi:10.1190/1.1441328
- Palmer W C. 1965. Meteorological drought. Research Paper No. 45, Washington: US Department of Commerce Weather Bureau, 58
- Pan N, Wang S, Liu Y, et al. 2021. Rapid increase of potential evapotranspiration weakens the effect of precipitation on aridity in global drylands [J]. *Journal of Arid Environments*, 186: 104414. doi:10.1016/j.jaridenv.2020.104414
- Penman H L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass [J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 193(1032): 120-145. doi:10.1098/rspa.1948.0037
- Sheffield J, Goteti G, Wen F, et al. 2004. A simulated soil moisture based drought analysis for the United States [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109, D24108. doi:10.1029/2004JD005182
- Spinoni J, Barbosa P, De Jager A, et al. 2019. A new global database of meteorological drought events from 1951 to 2016 [J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 22: 100593. doi:10.1016/j.ejrh.2019.100593
- Trenberth K E, Dai A, Van Der Schrier G, et al. 2014. Global warming and changes in drought [J]. *Nature Climate Change*, 4(1): 17-22. doi:10.1038/nclimate2067
- Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. 2010. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index [J]. *Journal of Climate*, 23(7): 1696-1718. doi:10.1175/2009JCLI2909.1
- Wang A, Kong X. 2021. Regional climate model simulation of soil moisture and its application in drought reconstruction across China from 1911 to 2010 [J]. *International Journal of Climatology*, 41: E1028-E1044. doi:10.1002/joc.6748
- Wang A, Lettenmaier D P, Sheffield J. 2011. Soil moisture drought in China, 1950–2006 [J]. *Journal of Climate*, 24(13): 3257-3271. doi:10.1175/2011JCLI3733.1
- 王丹, 王爱慧. 2017. 1901~2013年 GPCC 和 CRU 降水资料在中国大陆的适用性评估 [J]. *气候与环境研究*, 22 (4): 446–462. Wang Dan, Wang Aihui. 2017. Applicability assessment of

- GPCC and CRU precipitation products in China during 1901 to 2013 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 22(4): 446-462, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16122.
- Wang F, Lai H, Li Y, et al. 2022. Dynamic variation of meteorological drought and its relationships with agricultural drought across China [J]. *Agricultural Water Management*, 261: 107301. doi:10.1029/2004JD005182
- 王劲松, 李耀辉, 王润元, 等. 2012. 我国气象干旱研究进展评述 [J]. *干旱气象*, 30(04): 497-508. Wang Jinsong, Li Yaohui, Wang Runyuan, et al. 2012. Review of advances in meteorological drought research in China [J]. *Journal of Arid Meteorology (in Chinese)*, 30(04): 497-508. doi:1006-7639(2012)-04-0497-12
- 王林, 陈文. 2014. 标准化降水蒸散指数在中国干旱监测的适用性分析 [J]. *高原气象*, 33(02): 423-431. Wang Lin, Chen Wen. 2014. Applicability analysis of standardized precipitation evapotranspiration index in drought monitoring in China [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 33(02): 423-431. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00048
- Wang S, Zhang Q, Yue P, et al. 2020. Effects of evapotranspiration and precipitation on dryness/wetness changes in China [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 142: 1027-1038. doi:10.1007/s00704-020-03336-8
- 王延禄. 1990. 我国建立、引用和验证气象干旱指标综述 [J]. *干旱区地理*, 13(3): 80-86. Wang Yanlu. 1990. The summae concerning arid meteorological targets to establish, quote and test in China [J]. *Arid Land Geograph (in Chinese)*, 13(3): 80-86. doi:10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.1990.03.017
- Wang Z, Li J, Lai C, et al. 2016. Does drought in China show a significant decreasing trend from 1961 to 2009? [J]. *Science of the Total Environment*, 579: 314-324. doi:dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.098
- 魏凤英. 2007. 现代气候统计诊断与预测技术 (第 2 版) [M]. 北京: 气象出版社, 99-100. Wei Fengying. 2007. *Modern climate statistical diagnosis and prediction techniques (2nd Edition)* [M]. Beijing: Meteorological Press, 99-100.
- Wells N, Goddard S, Hayes M J. 2004. A self-calibrating Palmer drought severity index [J]. *Journal of Climate*, 17(12): 2335-2351. doi:10.1175/1520-0442(2004)017<2335:ASPDSE>2.0.CO;2
- 闻新宇, 王绍武, 朱锦红, 等. 2006. 英国 CRU 高分辨率格点资料揭示的 20 世纪中国气候变

- 化 [J]. 大气科学, 30(05):894-904. Wen Xinyu, Wang Shaowu, Zhu Jinhong, et al. 2006. An overview of China climate change over the 20th century using UK UEA/CRU high resolution grid data[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30(5): 894-904. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.05.18
- Wilhite D A. 2000. Drought as a natural hazard: concepts and definitions, in Drought: A Global Assessment [M]. London: Drought Mitigation Center Faculty Publications, 3-18
- Williams A P, Seager R, Abatzoglou J T, et al. 2015. Contribution of anthropogenic warming to California drought during 2012–2014 [J]. Geophysical Research Letters, 42(16): 6819-6828. doi:10.1002/2015GL064924
- Xu K, Yang D, Yang H, et al. 2015. Spatio-temporal variation of drought in China during 1961–2012: A climatic perspective [J]. Journal of Hydrology, 526: 253-264. doi:10.1016/j.jhydrol.2014.09.047
- 杨庆, 李明星, 郑子彦, 等. 2017. 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, 47(03):337-353. Yang Qing, Li Mingxing, Zheng Ziyang, et al. 2017. Regional adaptability of seven meteorological drought indices in China [J]. Science China Earth Sciences (in Chinese), 47(03): 337-353. doi:10.1007/s11430-016-5133-5
- Yao J, Chen Y, Yu X, et al. 2020. Evaluation of multiple gridded precipitation datasets for the arid region of northwestern China [J]. Atmospheric Research, 2236: 104818. doi:10.1016/j.atmosres.2019.104818
- Yu M, Li Q, Hayes M J, et al. 2014. Are droughts becoming more frequent or severe in China based on the standardized precipitation evapotranspiration index: 1951–2010? [J]. International Journal of Climatology, 34(3): 545-558. doi:10.1002/joc.3701
- 张存杰, 刘海波, 宋艳玲, 等. 2017. GB/T 20481-2017 气象干旱等级 [S]. 北京: 中国标准出版社. Zhang Cunjie, Liu Haibo, Song Yanling, et al. 2017. GB/T 20481-2017 Meteorological Drought Classification [S]. Beijing: Standards Press of China.
- Zhang C, Zhang H. 2010. Potential impacts of East Asian winter monsoon on climate variability and predictability in the Australian summer monsoon region [J]. Theoretical and Applied Climatology, 101: 161-177. doi:10.1007/s00704-009-0246-2

Zou X, Zhai P, Zhang Q. 2005. Variations in droughts over China: 1951–2003 [J]. *Geophysical Research Letters*, 32(4). doi:10.1029/2004GL02185

邹旭恺, 任国玉, 张强. 2010. 基于综合气象干旱指数的中国干旱变化趋势研究 [J]. *气候与环境研究*, 15(04):371-378. Zou Xukai, Ren Guoyu, Zhang Qiang. 2010. Droughts variations in China based on a compound index of meteorological drought [J]. *Climate and Environmental Research (in Chinese)*, 15(4):371-378. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2010.04.04.