

# 非平稳标准化降水蒸散指数构建及 中国未来干旱时空格局

温庆志<sup>1,2</sup>, 孙鹏<sup>1,2,3</sup>, 张强<sup>2,4</sup>, 姚蕊<sup>5</sup>

(1. 安徽师范大学地理与旅游学院, 芜湖 241002; 2. 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875; 3. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 4. 北京师范大学减灾与应急管理研究院, 北京 100875; 5. 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210023)

**摘要:** 旱灾是一种致灾因子与成灾机理均非常复杂的自然灾害,也是目前对其检测与风险防御最为困难的自然灾害种类之一。随着全球气候变化,干旱的变化逐渐趋于非平稳化,水文气象序列的非平稳性已有广泛研究,但在干旱检测指标中却鲜有考虑。基于标准化降水蒸散指数(SPEI)和非平稳性理论,构建非平稳性标准化降水蒸散指数(NSPEI)并进行适用性评价,利用NSPEI评估未来不同排放情景下中国气象干旱时空格局演变规律。结果表明:①非平稳性站点集中在东北平原、黄淮海平原、长三角地区、青藏高原及周边区域,NSPEI拟合最优的站点占中国气象站点的88%(2177个站点)。②SPEI对温度较为敏感,在评估未来干旱变化时会高估干旱强度和持续时间性,而NSPEI能够克服这一弱点,较SPEI可更好的检测中国气象干旱,且能很好的刻画中国未来干旱变化。③低、高排放情景下中国北方干旱加剧,南方呈湿润化趋势;中排放情景下中国北方湿润化趋势明显,而中国南方则呈干旱化。基于NSPEI干旱检测结果,中高排放情景下中国未来极端干湿历时与发生频率均呈增加趋势。

**关键词:** 非平稳标准化降水蒸散指数;干旱检测;时空格局;全球变暖  
DOI: 10.11821/dlxb202007010

## 1 引言

干旱灾害是世界上造成经济损失最为严重的自然灾害之一<sup>[1-2]</sup>,可导致全球经济每年高达60亿到80亿美元的损失,远超其他气象灾害<sup>[3]</sup>。中国是世界上受灾害影响最为严重的国家之一<sup>[4]</sup>,据统计,气象灾害损失占中国全部自然灾害损失的61%,而旱灾损失则占气象灾害损失的55%<sup>[5]</sup>,严重制约了社会经济可持续发展和国家粮食安全<sup>[3-5]</sup>。近几十年来,人口增长和农业、工业扩大了对水资源的需求,水资源短缺矛盾不断突出<sup>[6]</sup>。因而,未来干旱风险预估与防御已成为水资源管理、农业生产保障、生态环境保护等的关键之一。由于现有干旱检测指标多样,且各有优缺点,导致全球变暖影响下干旱变化趋势研

收稿日期: 2019-09-18; 修订日期: 2020-04-15

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0906); 国家重点研发计划(2019YFA0606900); 国家自然科学基金项目(41601023, 41771536); 安徽省自然科学基金项目(1808085QD117) [Foundation: The Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program, No.2019QZKK0906; China National Key R&D Program, No.2019YFA0606900; National Natural Science Foundation of China, No.41601023, No.41771536; Natural Science Foundation of Anhui Province, No.1808085QD117]

作者简介: 温庆志(1995-), 男, 广西贺州人, 硕士生, 主要从事流域水文循环与水资源演变研究方面工作。

E-mail: wenzhi@163.com

通讯作者: 孙鹏(1986-), 男, 山东青岛人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事于气象水文学和遥感水文学研究。

E-mail: sun68peng@163.com

究存在诸多争议。有研究表明气候变暖将导致干旱风险不断增加<sup>[7]</sup>, 干旱严重程度加剧、受旱面积扩大<sup>[8-9]</sup>; 而有些学者却认为有些干旱指标中的蒸散发模型对气候变暖过于敏感, 并指出过去60年全球干旱变化趋势不显著<sup>[10]</sup>。因此, 干旱检测指标是干旱风险评估的关键, 干旱指标的研究对于国家应对气候变化和提高防旱抗旱能力具有重要意义。

由于干旱检测研究的复杂性, 导致干旱检测指标众多<sup>[11]</sup>, 以气象干旱检测为例, 气象干旱指标主要有标准化降水指数 (Standardized Precipitation Index, SPI)、帕尔默干旱指数 (Palmer Drought Severity Index, PDSI)、有效干旱指数 (Effective Drought Index, EDI) 等<sup>[12-14]</sup>。Vicente-Serrano 等<sup>[15]</sup>以降水和温度、太阳辐射、风速、湿度、海拔等气象数据为基础, 考虑多尺度特征及温度变化对干旱的影响等, 提出了标准化降水蒸散指标 (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI), 该指标弥补了SPI未考虑温度变化、太阳辐射、风速、湿度、海拔等气象要素及气候变暖情景下PDSI描述未来气候情景缺乏多尺度特征的不足, 因而得到了广泛应用<sup>[16]</sup>。

在数学中平稳性是一种特殊的随机过程, 平稳性时间序列的期望、方差不随着时间的变化而变化, 与平稳性相反则为非平稳性<sup>[17]</sup>。平稳性假设是分析时间序列分布拟合的基本假设 (均值、方差是固定的), 非平稳序列在进行平稳性的分布拟合时 (如本文计算SPEI使用的Log-logistic分布拟合函数), 若时序不去除非平稳造成的影响则对参数估计造成偏差, 而这种偏差是不可逆转的, 并对拟合造成偏差<sup>[18]</sup>。越来越多的证据表明, 水文气象要素的平稳性假设受到挑战, 特别是全球气候暖化的背景下, 未来降水、气温等要素平稳性假设受到挑战<sup>[19]</sup>, 如极端降水非平稳研究<sup>[20]</sup>、降水与径流的非平稳性探讨<sup>[21]</sup>、全球气温的非平稳变化、洪水过程非平稳性研究<sup>[22]</sup>等。平稳性干旱指数在干旱检测中有一定局限性, 会导致高估气候变化对未来干旱的影响。目前, 非平稳性干旱指数构建已有一定研究。Li等<sup>[23]</sup>利用GAMLSS框架将气候指数作为协变量建立了非平稳标准化降水指数 (NSPI); Wang等<sup>[24]</sup>构建了基于时间的标准降水蒸散指数 (SPIt); Bazrafshan等<sup>[25]</sup>构建了非平稳检测干旱指数 (NPDI); Rashid等<sup>[26]</sup>将气候因子纳入GAMLSS模型并开发了非平稳标准化降水指数 (NSPI); Russo等<sup>[27]</sup>建立了尺度参数随着时间线性变化的非平稳Gamma分布, 并计算出了描述欧洲降水变化的标准化非平稳降水指数 (SnsPI); Vicente等<sup>[28]</sup>将西风指数 (NAO) 纳入SPEI中对欧洲的非平稳性干旱进行研究。已有非平稳干旱指数构建多基于GAMLSS框架或纳入气候因子进行非平稳建模, 但由于建立GAMLSS模型过程较为复杂、计算过程不够简便难以推广, 且由于气候因子数据的局限, 导致当前的非平稳干旱指数难以应用在未来不同排放情境下的干旱风险评估。

基于此, 本文构建了一种同时适用于平稳和非平稳状态的干旱检测指数, 即非平稳标准化降水蒸散指数 (NSPEI), 基于历史灾情数据和典型历史干旱事件, 与已有常用干旱指标 (如SPEI、sc-PDSI、土壤湿度) 对比分析, 评估NSPEI对中国干旱检测的能力, 利用CMIP5不同排放情境下的未来模式数据, 预估中国未来气候变化下干旱时空演变格局, 为国家防灾减灾和应对未来气候变化提供科学依据。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据

**2.1.1 气象数据及有效含水量数据** 本文利用国家气候中心 (NCC) 提供的2474个气象站点 (图1) 的降水、蒸发、湿度、太阳辐射、气温、风速等日数据, 并将时间长度统一为1962年1月1日—2014年12月31日 (时间序列缺失部分用样条插值法插补), 划分

十大水系进行研究(图1)<sup>[29]</sup>。有效含水量(AWC)是指植物能够获得的土壤含水量,可反映不同土壤水分亏缺时植物所能承受干旱的能力。本文AWC数据来自中国科学院寒区旱区环境与工程研究所(<http://westdcwestgis.ac.cn/data/tag/key/HWSD>),土壤湿度数据来自美国国家海洋和大气管理局(<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/>)。

**2.1.2 气候模式数据** 本文使用42个CMIP5气候模式数据,本文使用42种CMIP5的RCP 26、RCP 45、RCP 85三种不同排放情景的模式数据。将空间分辨率使用统计降尺度统一为 $1^\circ \times 1^\circ$ 、时间长度统一为2006—2100年。

## 2.2 研究方法

### 2.2.1 标准化降水蒸散指数(SPEI)与非平稳性标准化降水蒸散指数(NSPEI)的构建

(1) 标准化降水蒸散指数(SPEI)。Vicente-Serrano等<sup>[15]</sup>在2010年提出SPEI, Beguería等<sup>[30]</sup>重新考虑SPEI的参数拟合以及蒸散模型的影响。SPEI结合降水( $P$ )和潜在蒸散( $PET$ )来进行干旱模拟, $PET$ 采用Penman-Monteith蒸发公式计算。Vicente-Serrano<sup>[15]</sup>证明使用Log-logistic分布对降水与蒸发的差值 $D$ 进行标准化(均值=0,标准差=1)计算SPEI会得到更好的结果:

$$D = P - PET \quad (1)$$

对 $D$ 进行拟合log-logistic的概率函数分布拟合:

$$F(D) = \left[ 1 + \left( \frac{\alpha}{D - \gamma} \right)^\beta \right]^{-1} \quad (2)$$

式中: $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 分别是尺度、形状、位置参数。

用基于经验频率的概率加权距法(PWMs)<sup>[31]</sup>来估计参数:

$$w_s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\binom{N-i}{s} D_i}{\binom{N-i}{s}} \quad (3)$$

式中: $w_s$ 是 $s$ 阶的PWMs; $N$ 是数据点的个数。

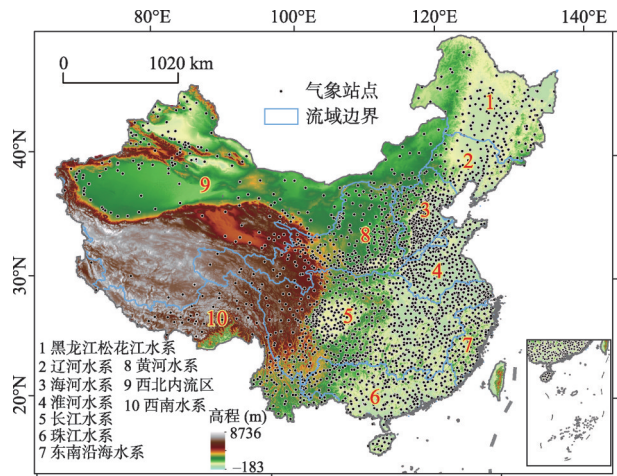
利用PWMs估算出参数,得出SPEI的计算公式为:

$$SPEI = W - \frac{C_0 + C_1 + C_2 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3} \quad (4)$$

$$W = -2 \ln P$$

式中:当 $P \leq 0.5$ , $P$ 为累积概率, $P = 1 - F(x)$ ;当 $P > 0.5$ ,则 $P = 1 - P$ ;其他参数为 $C_0 = 2.515517$ 、 $C_1 = 0.802853$ 、 $C_2 = 0.010328$ 、 $d_1 = 1.432788$ 、 $d_3 = 0.001308$ 。

(2) 非平稳标准化降水蒸散指数(NSPEI)构建。由上述SPEI的计算描述可知,对降水与蒸散发差值 $D$ 的Log-logistic分布拟合是假定参数恒定,即尺度、形状、位置参数



注:该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)1697号的标准地图制作,底图无修改。

图1 中国气象站点分布图

Fig. 1 Location of meteorological stations in China

恒定。在平稳性假设是分析时间序列分布拟合的基本假设（均值、方差是固定的），非平稳序列在进行平稳性的分布拟合时，若不去除非平稳造成的影响则对参数估计造成偏差，而这种偏差是不可逆转的，并对拟合造成误差<sup>[18]</sup>。因此本文基于这个出发点，将Log-logistic拟合分布函数构建为时变的Log-logistic拟合分布函数。由图2a可知，时序D的均值、标准差是以时间为自变量的函数；图2b可知，3个不同时间段（1958年1月—1966年12月、1968年1月—1976年12月、1981年1月—1989年12月）的D概率密度分布是不同的，位置参数（均值）随时间而变化。

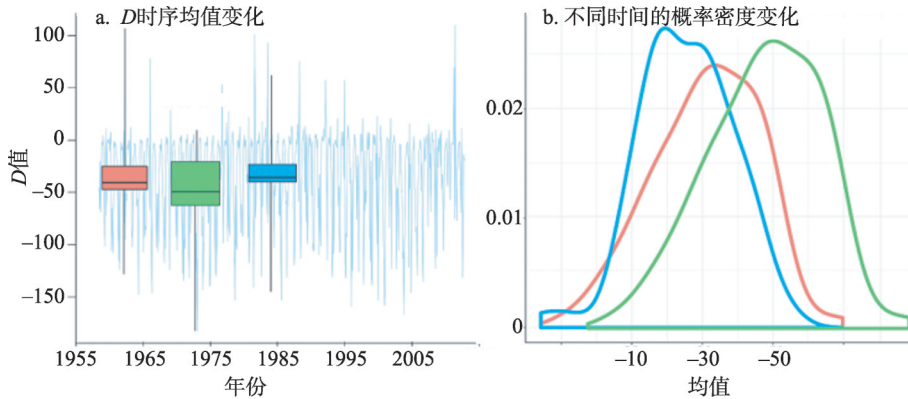


图2 时序D均值变化  
Fig. 2 Change in the D mean

结合上述内容，考虑时序D在分布拟合时位置参数随着时间变化而变化，因此本文提出位置参数为时变的Log-logistic分布函数构建非平稳的SPEI指数。由于非平稳过程，位置参数（均值）的变化会呈线性或非线性变化，因此在构建NSPEI之前，关键之一是选择最优位置参数（均值）拟合模型，构建时变的Log-logistic概率分布框架：

首先，用平滑样条函数（Smoothing Splines）<sup>[32]</sup>确定D的线性或非线性趋势拟合（图3）。

其次，利用平滑样条拟合的趋势值来代替Log-logistic分布的位置参数，Log-logistic的形状、尺度参数不变，仅仅是考虑了时间变化对时序D的影响，因此D时序的极值、数据分布等信息不会损失。平滑样条函数的优点在于能够结合数据本身的特点，且不需要选择线性或者非线性的模型来拟合D时序，也不需判断D时间序列的平稳性。

NSPEI的计算过程为： $D_t$ 是随着时间变化的降水与蒸散发的差值。

$$D_t = P_t - PET_t \tag{5}$$

利用平滑样条函数对 $D_t$ 进行拟合：

$$SS_{D_t}(h) = \sum_{t=1}^n [D_t - f(D_t)]^2 + h \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} [f''(D_t)]^2 dt \tag{6}$$

式中： $f$ 为时间序列 $D_t$ 的线性拟合函数； $h$ 是一个平滑参数，类似于局部多项式估计的振

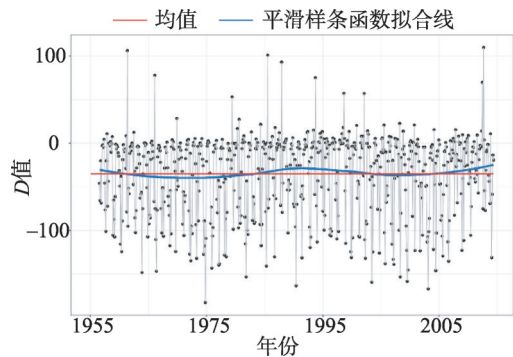


图3 时序D的平滑样条拟合  
Fig. 3 Smoothing splines fitting of D

幅;  $t$ 为时间,  $t=1, 2, \dots, n$ ;  $PET$ 是Penman-Monteith蒸散发公式计算的潜在蒸发量, 使用的气象指标分别为降水 $P$ 、最高气温 $T_{\max}$ 、最低气温 $T_{\min}$ 、湿度 $H$ 、风速 $W$ 、太阳辐射 $S$ 、海拔、纬度等。根据公式(5)和(6), 求解得到一个时变的位置参数如下:

$$\gamma_{D_t} = \text{loess}(D_t) \quad (7)$$

然后利用Kolmogorov-Smirnov (K-S) 检验来评估残差是否符合Log-logistic分布, 若K-S检验通过, 说明残差服从Log-logistic分布, 则可以说明可以对时间序列进行均值变化建模。

最后, 计算基于时变 $D_t$ 的Log-logistic分布:

$$f(D_t | \alpha, \beta, \gamma_{D_t}) = \frac{\alpha}{\beta} \left( \frac{D_t - \gamma_{D_t}}{\alpha} \right)^{\beta-1} \left[ 1 + \left( \frac{D_t - \gamma_{D_t}}{\alpha} \right)^{\beta} \right]^{-2} \quad (8)$$

$$F(x) = \int_0^x f(D_t | \alpha, \beta, \gamma_{D_t}) dt \left[ 1 + \left( \frac{\alpha}{D_t - \gamma_{D_t}} \right)^{\beta} \right]^{-1} \quad (9)$$

式中:  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 分别是尺度、形状、位置参数。

用基于经验频率的概率加权距法(PWMs)<sup>[31]</sup>来估计参数:

$$w_s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\binom{N-i}{s} D_{i,t}}{\binom{N-i}{s}} \quad (10)$$

式中:  $W_s$ 为 $s$ 阶的PWM;  $N$ 为数据点个数;  $F_i$ 为频率估计。NSPEI正值表示湿润, 负值表示干旱。因平滑样条函数可根据数据特征进行拟合, NSPEI在平稳的条件下平滑样条函数拟合的趋势值(即为均值, 位置参数不变)与SPEI对干旱的检测结果相同。本文所提出的NSPEI与传统SPEI采用相同的标准化方法, 即相同的干旱分类<sup>[14]</sup>(表1)。

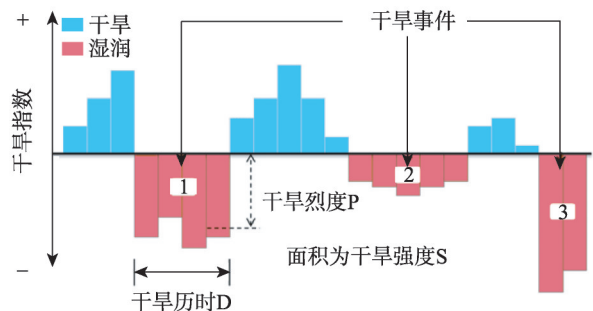
**2.2.2 自校准帕尔默干旱强度指数(sc-PDSI)** Wells等在2004年提出sc-PDSI<sup>[33]</sup>, 主要是将PDSI经验导出的气候特征( $K$ )和持续时间因子(0.897和1/3)替换为基于位置的历史气候数据自动计算值。主要计算分7个步骤: 计算水分偏差、计算水分异常、计算持续时间因子、利用水分异常和持续因子计算PDSI、找出PDSI98%和2%的分位数、结合分位数计算新的水分异常、计算sc-PDSI。

**2.2.3 干旱特征** 干旱特征采用Yevjevich<sup>[34]</sup>提出的游程理论来进行计算。结合表1可知NSPEI与SPEI小于0即为干旱。因此按照图4来计算干旱特征, 干旱强度 $S$ 的计算公式为:

表1 NSPEI和SPEI干旱分类

Tab. 1 Classification of NSPEI and SPEI

NSPEI值	干旱类型	NSPEI值	干旱类型
> 2.00	极端湿润	-0.99~0	轻度干旱
1.99~1.50	潮湿	-1.49~1	中度干旱
1.49~1.00	湿润	-1.99~1.5	重度干旱
0.99~0	正常	< -2.00	极端干旱



注: 1、2、3表示干旱事件。

图4 干旱特征示意图

Fig. 4 Extraction of drought features (severity, peak and duration) using runs theory

$$S_{SPEI} = -\sum_1^{D_{SPEI}} SPEI_i$$

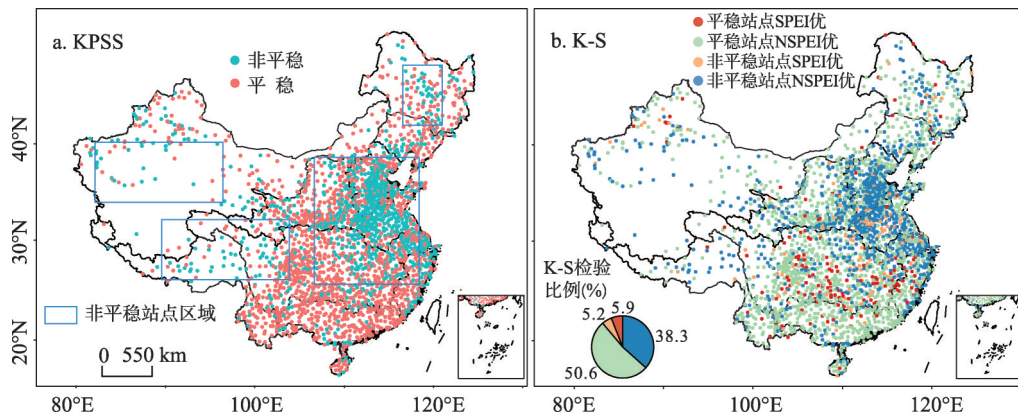
$$S_{NSPEI} = -\sum_1^{D_{NSPEI}} NSPEI_i$$
(11)

式中： $S$ 为干旱强度； $D$ 为干旱历时。

### 3 研究结果

#### 3.1 非平稳标准化降水蒸散指数(NSPEI)的适用性分析

**3.1.1 NSPEI与SPEI及sc-PDSI的对比分析** 本文在5%显著性水平下采用KPSS检验<sup>[35]</sup>判断P-PET序列 $D$ 的非平稳性(图5a),发现非平稳性站点占中国站点的31%(767个站点),主要集在中东北平原、黄淮海平原、长三角地区、青藏高原及横断山区、南疆等区域。利用K-S检验<sup>[36]</sup>判断NSPEI与 $D$ 、SPEI与 $D$ 的拟合分布效果(图5b)。由图5b可看出,NSPEI与 $D$ 拟合最优的站点占中国站点的88%(2177个站点)。在非平稳站点和平稳站点中NSPEI优于SPEI的站点分别为88%(2177个站点)和86%(2127个站点)(图5),而SPEI拟合最优的站点较少,主要集中在长江流域北纬25°地区。因此,无论是平稳性站点还是非平稳站点,NSPEI干旱指数(时变Log-Logistic)对于P-PET的拟合要优于SPEI(Log-Logistic)干旱指数。

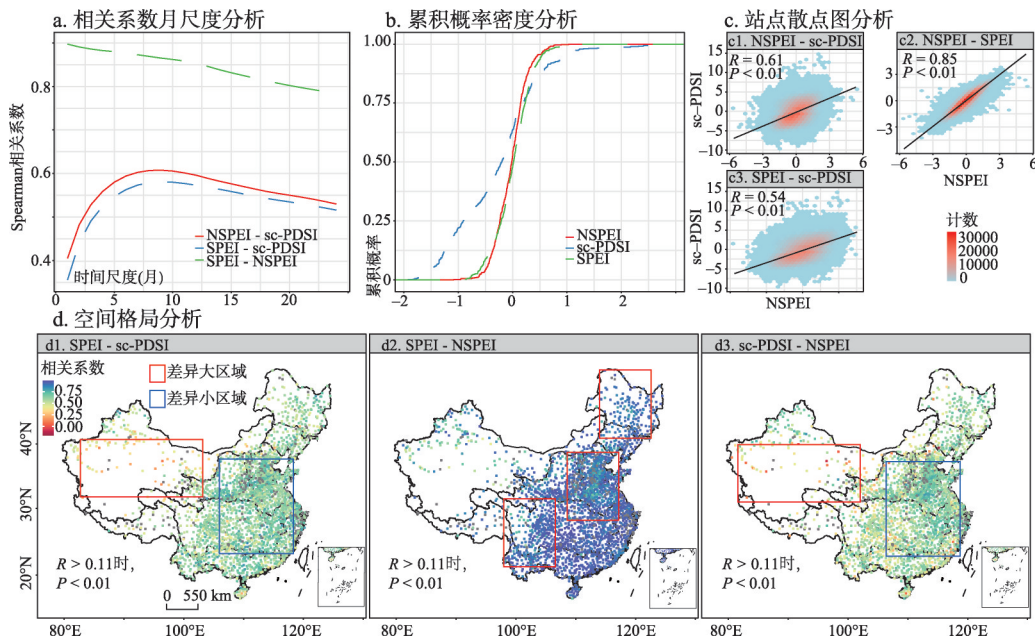


注:该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)1697号的标准地图制作,底图无修改。

图5 中国气象站点KPSS平稳性检验和K-S拟合优度检验空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of meteorological stations in China based on stationary test and goodness-of-fit tests

1~24个月尺度的NSPEI、SPEI与sc-PDSI相关性曲线(图6a)可知,NSPEI、SPEI与sc-PDSI相关系数均先增加再缓慢下降,峰值为9个月尺度。NSPEI-9与sc-PDSI相关系数为0.62、SPEI-9与sc-PDSI相关系数为0.60,9个月尺度的NSPEI、SPEI与sc-PDSI相关性最强。NSPEI与SPEI的相关性从1~24个月尺度呈现下降趋势,相关系数从0.96下降到0.81;1个月尺度的SPEI通常代表气象干旱,3~6个月尺度的则被认为农业干旱指数,6~12个月尺度用于指示水文干旱和检测地表水资源长期演变情况<sup>[30,41]</sup>,全球气候变化背景下农业干旱、水文干旱以及地表水资源受到非平稳性的挑战<sup>[9]</sup>,因此随着时间尺度的增大,SPEI对干旱的指示产生偏差,两种干旱指数的相关性随着时间尺度的增加在逐渐下降。从3种干旱指数累积概率密度曲线(图6b)可看出,NSPEI与SPEI的累积概率分布相似,而NSPEI的概率分布更接近平稳性Log-logistic分布,SPEI更加离散,sc-PDSI主要为土壤干旱,数据分布离散且位置参数是-0.2,进一步说明NSPEI优于SPEI。



注: 该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)1697号的标准地图制作, 底图无修改。

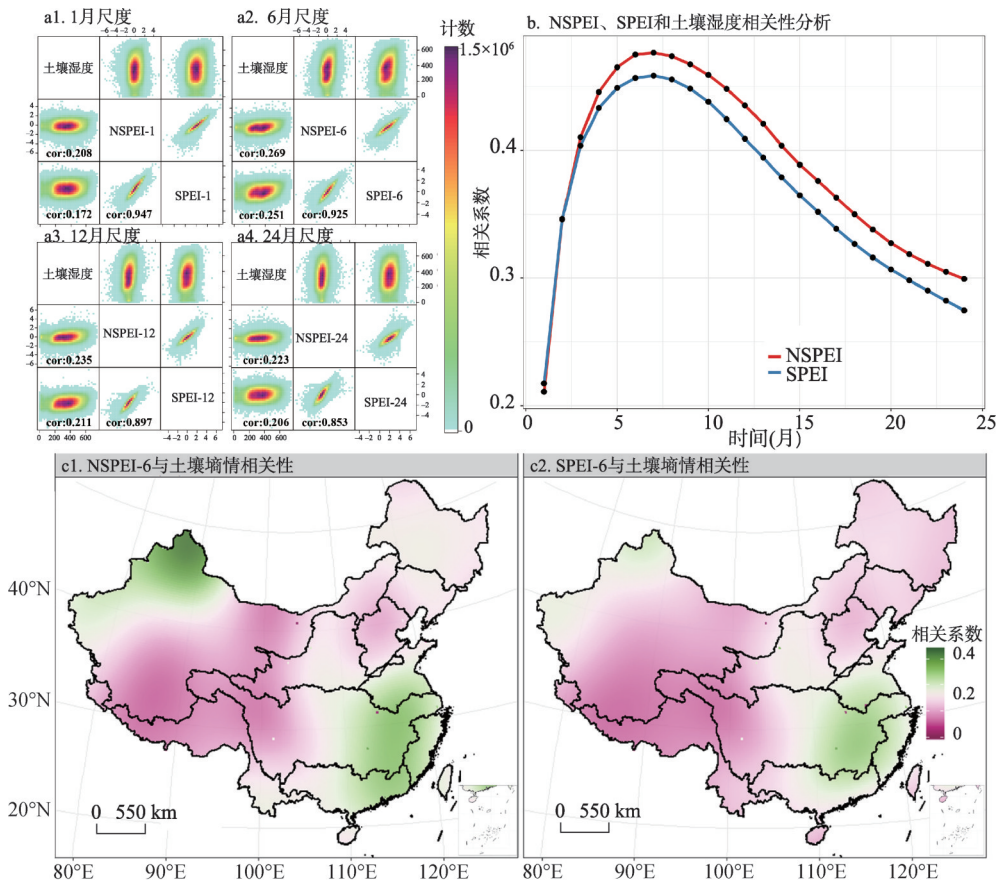
图6 不同时间尺度上NSPEI、SPEI、sc-PDSI相关性分析

Fig. 6 Correlation of NSPEI, SPEI and sc-PDSI in China on different time scales

本文选取了NSPEI、SPEI与sc-PDSI相关系数最高的9个月尺度进行相关性分析(图6c), NSPEI与sc-PDSI的相关系数为0.61、NSPEI与SPEI的相关系数为0.85、SPEI与SC-PDSI的相关系数为0.54; NSPEI与sc-PDSI的相关性高于SPEI与sc-PDSI, 这表明NSPEI对于干旱的检测结果较SPEI更接近sc-PDSI的检测结果, NSPEI对于干旱的检测结果更接近于土壤干旱。

为便于分析参考图3d中sc-PDSI与SPEI站点相关性的均值0.6进行空间统计分析。SPEI与sc-PDSI相关系数大于0.6的站点占全国总站点的27%, 而NSPEI与sc-PDSI的相关系数大于0.6的占47%。从空间格局来看(图6d), NSPEI与sc-PDSI相关性大的区域主要集中在中国东部季风区, 相关性小的区域主要在西北干旱半干旱区(图6d1), 表明SPEI、SPEI较sc-PDSI更适合于中国湿润地区的干旱检测<sup>[37]</sup>; SPEI与sc-PDSI的相关性空间格局有相同规律, 但总体上相关性要小于NSPEI与sc-PDSI。NSPEI与SPEI的空间相关性小的区域与图5a的非平稳站点分布区域相符合, 这也证明平稳状态下NSPEI与SPEI对于干旱的检测基本相同的, 但是在非平稳状态下, SPEI对于干旱的检测相对NSPEI的结果存在偏差。

为进一步分析NSPEI、SPEI与土壤湿度的关系, 分别对NSPEI、SPEI与土壤湿度进行不同时间尺度、空间上的相关性分析(图7)。图7a为NSPEI、SPEI与土壤湿度所有站点的1、6、12、24个月尺度的相关性散点图, NSPEI、SPEI与土壤湿度的相关性均通过了 $P < 0.01$ 的显著性检验, 且NSPEI与土壤湿度的相关性要高于SPEI与土壤湿度的相关性; 6个月尺度的NSPEI与土壤湿度的相关性最高为0.269, SPEI为0.251。全国2474个站点的1~24个月尺度的NSPEI、SPEI与土壤湿度的相关系数平均值(图7b)表明, 从3个月尺度NSPEI与土壤湿度的相关性高于SPEI与土壤湿度的相关性, 在6个月尺度后两种干旱指数的相关系数之差恒定维持在0.02之间; NSPEI、SPEI与土壤湿度相关性最高



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)1697号的标准地图制作,底图无修改。

图7 不同时间尺度上NSPEI、SPEI、土壤湿度相关性分析

Fig. 7 Correlation of NSPEI, SPEI and soil moisture in China at different time scales

值在6、7月尺度,分别为0.46和0.48。通过NSPEI-6、SPEI-6与土壤湿度的空间相关性(图7c)可以看出NSPEI与土壤湿度的相关性在华中、东南、东北和新疆西北的相关性高于SPEI与土壤湿度的相关性。因此,NSPEI较SPEI更加接近于土壤干旱的检测。通过NSPEI、SPEI与sc-PDSI、土壤湿度的相关关系分析,得出利用时变Log-logistic分布拟合的非平稳标准化降水蒸发指数(NSPEI)在干旱检测方面较SPEI更接近于土壤干旱,更能反映出干旱信息。

**3.1.2 基于历史灾情的验证分析** 1964—2014年不同时间尺度上NSPEI、SPEI轻度干旱、中度干旱和重度干旱面积与旱灾受旱面积相关关系(图8)可看出,旱灾面积与NSPEI、SPEI轻度干旱面积相关系数平均值分别为0.36 ( $P < 0.01$ )、0.16 ( $P < 0.05$ ),NSPEI与旱灾面积的相关性高于SPEI与旱灾面积的相关性;NSPEI与受灾面积的相关性均通过了 $P < 0.01$ 的相关性检验,且7个月尺度NSPEI与旱灾面积的相关性最高为0.39 ( $P < 0.01$ );sc-PDSI轻旱面积与旱灾受灾面积的相关系数为0.21 ( $P < 0.01$ );轻旱受旱面积与统计受灾面积的相关性为NSPEI > sc-PDSI > SPEI。NSPEI中度干旱面积与受灾面积呈现正相关关系且所有月尺度均通过了 $P < 0.05$ 的显著性检验,相关系数平均为0.25 ( $P < 0.05$ );SPEI中度干旱面积与受灾面积呈正相关,8个月尺度SPEI与旱灾面积相关性通过 $P < 0.05$ 的显著性检验,平均值为0.14未通过显著性检验;sc-PDSI中度干旱受旱



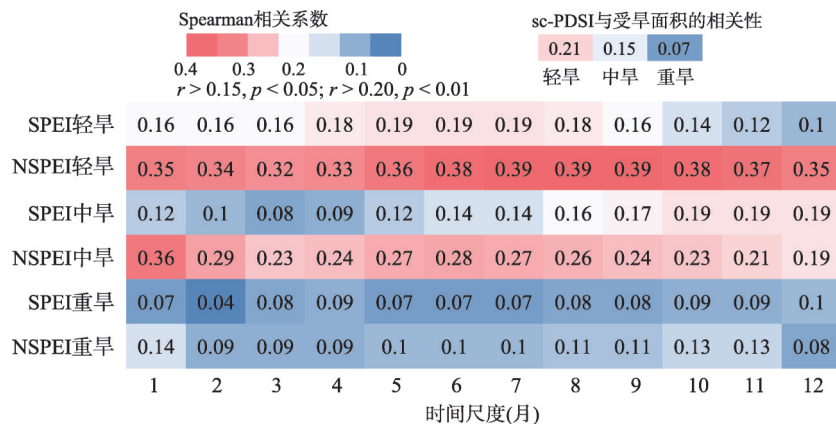


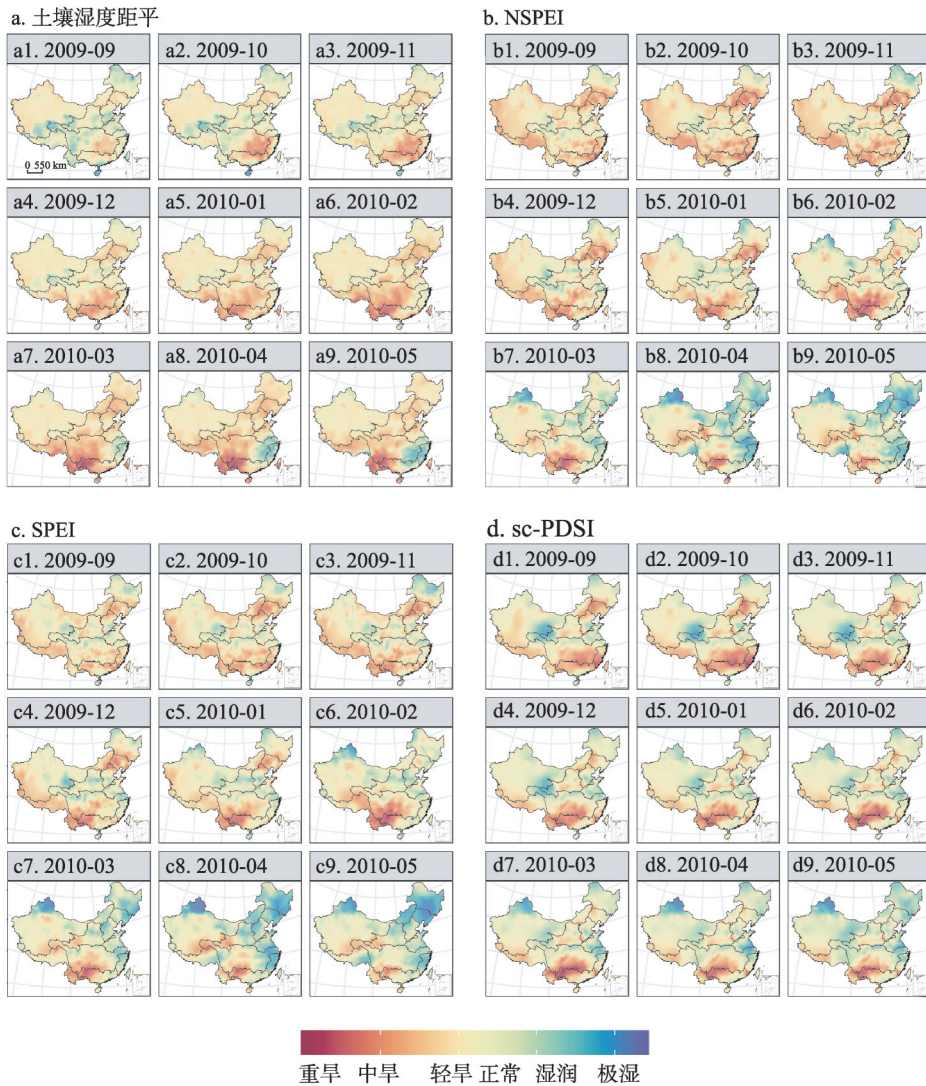
图8 中国旱灾受灾面积与NSPEI、SPEI、sc-PDSI相关分析

Fig. 8 Correlation between NSPEI, SPEI, sc-PDSI and drought-affected area in China

面积与统计受灾面积呈现显著性正相关系数为0.15 ( $P < 0.05$ ); 中度干旱的平均相关性排序为NSPEI > sc-PDSI > SPEI。在检测重度干旱上3种干旱指数均未通过显著性检验, 平均相关性指数为NSPEI = 0.1、SPEI = 0.07、sc-PDSI = 0.07; NSPEI均高于其他两种干旱指数。3种干旱指数与统计受灾面积的相关性随着干旱强度的增加而减小, 干旱指数对极端干旱的检测存在不确定性, 这可能受到人类灌溉活动的影响<sup>[38]</sup>。

**3.1.3 典型历时干旱事件的验证分析** 为了进一步验证NSPEI在对中国干旱检测的适用性, 利用SPEI、SC-PDSI、NSPEI和土壤湿度距平模拟分析2009年9月—2010年5月中国干旱事件<sup>[39-40]</sup>。1个月尺度的SPEI通常代表气象干旱, 3~6个月则被认为农业干旱指数, 6~12个月尺度则用于指示水文干旱和检测地表水资源长期演变情况<sup>[30, 41]</sup>, 为了从气象、农业、水文和地表水资源等多角度来分析旱情, 本文选用的6个月尺度的NSPEI、SPEI结合SC-PDSI、土壤湿度距平进行典型干旱事件分析。图9b是NSPEI对2009年9月—2010年5月干旱的检测。2009年9—12月华北、内蒙古中东部、东北南部由重旱转为轻旱, 受旱面积在不断减少; 2010年1月华北地区基本无旱, 2月后河南、江苏北部、安徽北部出现轻旱; 华北地区与黄淮平原的干旱检测结果与实际旱情基本一致。NSPEI对西南五省干旱的检测在2009年9月重旱出现在云南、贵州、四川的交界处; 2009年11月旱情发展, 藏南、川南、贵州西部及广西西部存在中到重旱, 12月旱情有所减缓但云南大部分地区还维持着中旱; 2010年1月云南西北部、四川南部旱情加剧再次出现特旱, 大部分地区湿润缓解干旱。与实际旱情相比, NSPEI能准确刻画旱情的空间演变规律<sup>[39-40]</sup>。NSPEI的检测结果与土壤湿度距平、SPEI、sc-PDSI等干旱指数的检测结果相似, 体现出对不同干旱的反映。NSPEI(图9b)对西南五省的干旱检测结果与其他干旱指数的检测结果相似。NSPEI检测出2009年12月—2010年2月山东半岛干旱、2010年2月东北半部干旱、2010年3月海南岛重旱、2010年5月山东西北部轻旱、2010年5月新疆中部轻旱, 这与土壤湿度距平检测结果相似, 但SPEI与sc-PDSI并未检测出干旱。综上得出, NSPEI对干旱的检测符合历史灾情的描述, 且对比SPEI、sc-PDSI两种干旱指数, NSPEI能检测出SPEI未检测出的土壤湿度变化的信息, 也能反映出部分sc-PDSI信息。

**3.1.4 中国干旱和干旱特征变化趋势分析** 对比NSPEI、SPEI在干旱变化趋势与土壤湿度的变化的结果(图10), 可看出NSPEI干旱指数的变化趋势与土壤湿度的变化趋势基本相似, 呈干旱化趋势区域主要集中在云南、贵州北部、重庆、四川东南部、甘肃南部、



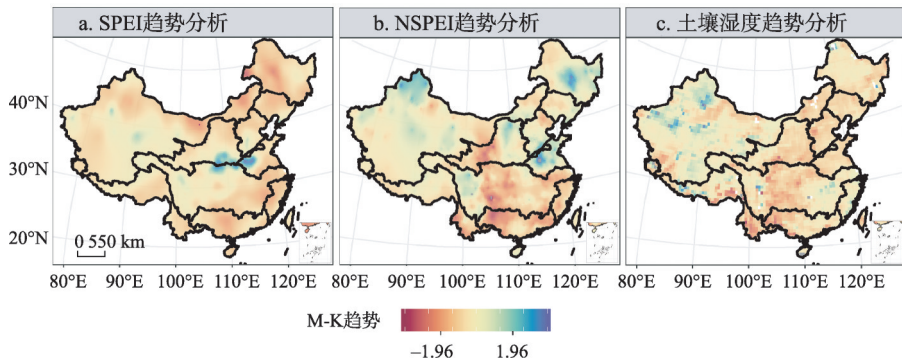
注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)1697号的标准地图制作,底图无修改。

图9 2009年9月—2010年5月典型年土壤湿度干旱、NSPEI、SPEI、sc-PDSI时空分布

Fig. 9 Spatial and temporal distribution of drought in NSPEI, SPEI, sc-PDSI and soil moisture in China in typical years

陕西、河南、河北、山东等省；呈湿润化区域主要集中在中国东南部、青海、西藏中部、新疆北部等区域。SPEI对中国西部干旱检测与NSPEI、土壤湿度相似，但是SPEI检测东部的黄淮海、东北平原呈现显著变湿的趋势，这与NSPEI、土壤湿度检测的干旱化趋势相反，这些区域气象站点多数呈非平稳（图5），表现出SPEI对非平稳干旱的检测存在偏差，NSPEI正好能够弥补这个缺点，能更加真实的反映干旱的情况。

为进一步分析NSPEI与SPEI对于干旱特征的差异，分别从干旱强度、干旱烈度、干旱历时以及干旱发生频次进行对比（图11）。SPEI检测出华北平原、新疆西北部干旱强度有显著下降的趋势，西南有显著上升的趋势；NSPEI检测出东北、山东中部、河南西部、广西贵州大部、东南沿海、重庆等干旱强度有显著上升的趋势，青海、甘肃、四川西部、淮河流域呈现显著下降的趋势。NSPEI、SPEI干旱烈度变化趋势与干旱强度相

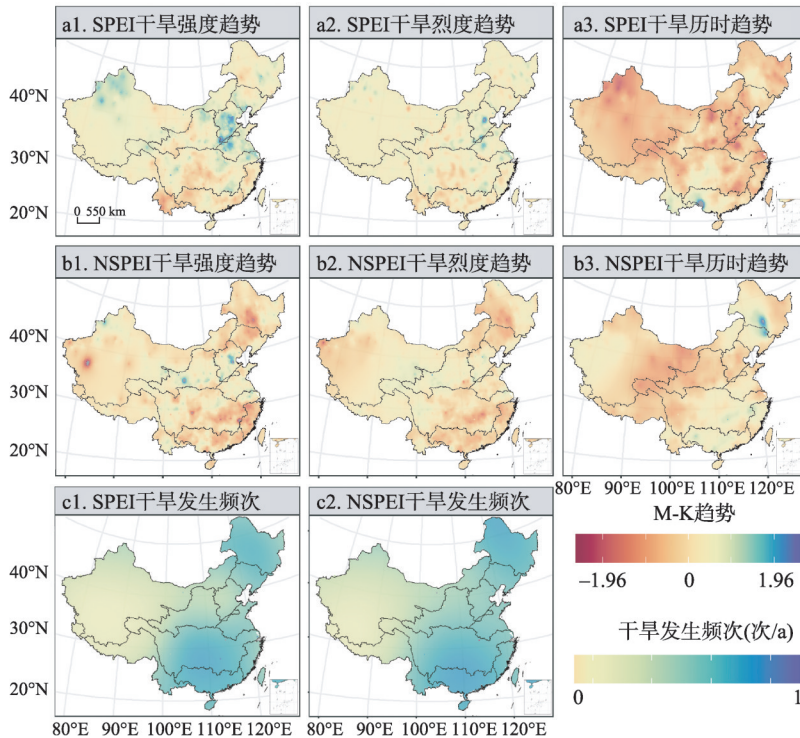


注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)1697号的标准地图制作,底图无修改。

图 10 1962—2014年NSPEI、SPEI、土壤湿度趋势分析

Fig. 10 Trend of drought in NSPEI, SPEI and soil moisture in China from 1962 to 2014

似，但NSPEI显著上升的面积扩大了，主要集中在内蒙古东部、新疆西南、广西等地区；SPEI显著上升的面积缩小，SPEI检测出来的极端干旱减少。NSPEI、SPEI干旱历时的变化趋势空间格局与干旱强度、干旱烈度相似。干旱发生频次上看，NSPEI与SPEI检测出全国干旱发生频次的格局基本相似，干旱发生频次0.9的集中在两广、贵州、湖南、重庆、和东北等区域，但在东北检测出干旱发生频次是0.9的范围要比SPEI大，包含黑龙江大部、内蒙古东部区域。



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)1697号的标准地图制作,底图无修改。

图 11 1962—2014年NSPEI、SPEI指数的干旱强度、干旱烈度、干旱历时和干旱发生频率趋势分析

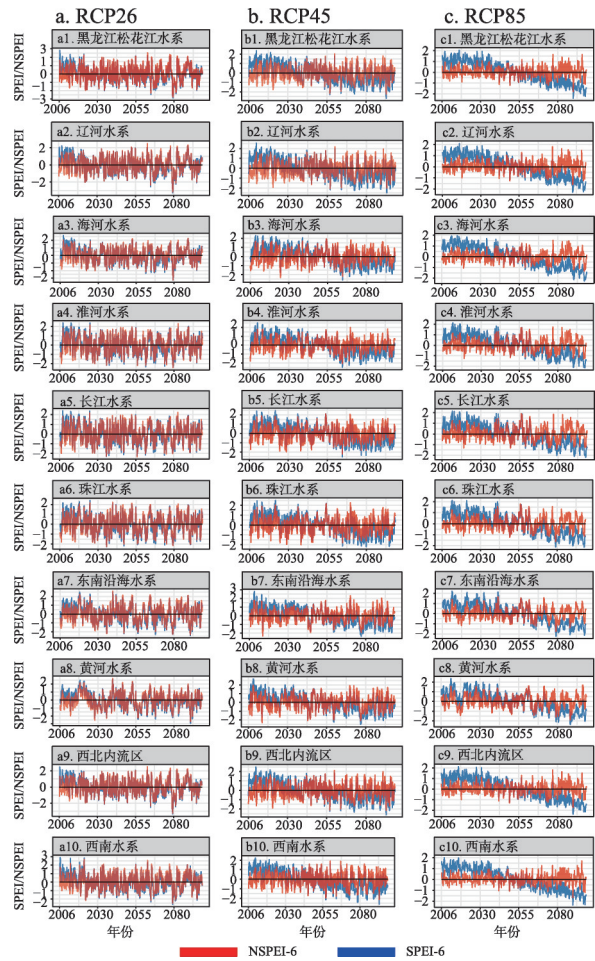
Fig. 11 Drought severity, peak, duration and frequency trend analysis in China from 1962 to 2014

### 3.2 全球变暖下平稳干旱指数和非平稳干旱指数的干旱检测

未来气候情景下干旱变化趋势和特征应使用考虑温度的干旱指数,如PDSI,但是PDSI缺乏多尺度特征,多尺度特征对于评估不同类型的干旱变化是必不可少的。因此本文使用SPEI和NSPEI以探讨全球变暖情景下未来干旱变化规律。

#### 3.2.1 中国十大流域未来干旱演变趋势分析

本文选用能够综合表达气象、农业、水文干旱信息<sup>[30,41]</sup>的6个月尺度NSPEI、SPEI分析未来干旱演变规律。结合CMIP5不同情境下的模式数据,对比分析中国十大流域不同排放情景NSPEI和SPEI的时间演化特征(图12)。在低排放情景下(图12a, RCP 26),SPEI在2006—2025年之前为湿润期( $SPEI > 0$ ),而在2025年后则出现干湿交替现象;NSPEI在所有流域表现出了干湿交替现象。中等排放情景(RCP 45)下(图12b),SPEI检测结果表明从2006年到2050年所有流域均呈湿润化特征( $SPEI > 0$ ),2050年以后则表现出干旱化趋势( $SPEI < 0$ );中等排放情景(RCP 45)下基于NSPEI检测的未来干旱趋势则为干湿交替特征。高排放情景(RCP 85)下NSPEI、SPEI对未来干旱的检测结果如图12c所示,可以看出SPEI高估了RCP 85情景下干旱强度变化,从极度湿润转变到极度干旱,这种持续的干旱化特征明显不符合事实。根据Sheffield等<sup>[10]</sup>研究,计算干旱指数使用了简化的蒸散模型,模型仅对温度响应因此高估了干旱的增加,而NSPEI在RCP 85的情景下对干旱的检测结果显示干湿交替,较符合实际干旱检测结果。在RCP 26的情景下,2030年前后NSPEI检测出黄河水系有一个极端湿润的过程,其他的水系仅为湿润;2080年前后黑龙江松花江水系、辽河、海河、淮河、西北内流区和西南水系有一个极端干旱的过程。在RCP 45、RCP 85的排放情景下十大流域的干旱变化趋势基本相似,但是到2050年后NSPEI的极值开始增大(特别是在RCP 85的情景下),辽河、海河、淮河、长江以及西北内流区等流域的极值之差从2006年到2100年的3增加到了4.5。这样的结果反映出在高排放的情景下极端的干旱、湿润事件在不断的增加,Huntington等<sup>[42]</sup>的研究结果表明气温上升会加剧水文循环,这也是在高排放情景下干湿极端事件会增加的一个重要原因。

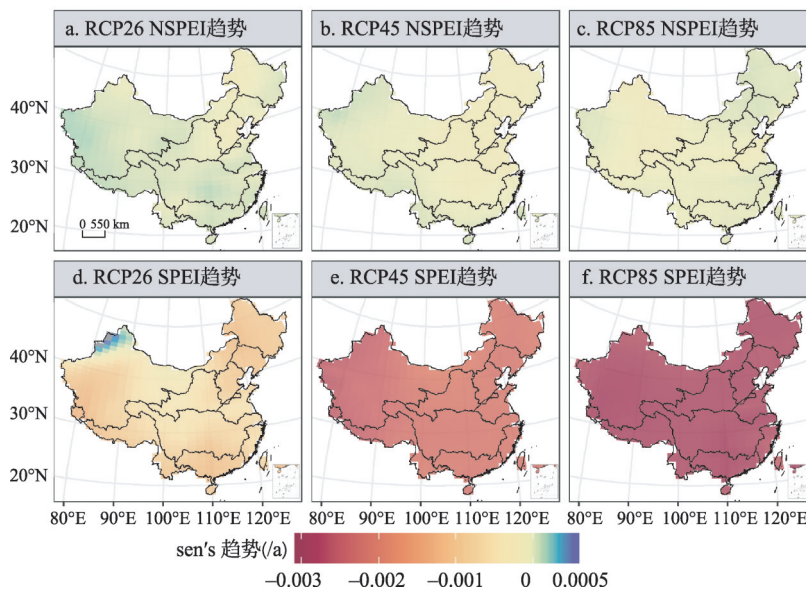


注:该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的标准地图号为GS(2019)1697号的标准地图制作,底图无修改。

图12 2006—2100年中国十大流域6个月尺度NSPEI、SPEI不同排放情景时序分析

Fig. 12 Analysis of NSPEI and SPEI in ten major river basins of China on a six-month scale in different emission scenarios from 2006 to 2100

**3.2.2 年际、月际尺度中国未来干旱演变趋势分析** 对比分析SPEI和NSPEI在不同排放情景下的干旱变化趋势(图13),趋势分析采用Sen's slope。图13a为RCP 26情景下的NSPEI干旱空间变化趋势,中国西部有微弱的变湿趋势,东部有微弱的变干趋势;RCP 26情景下的SPEI检测出(图13d)中国西北部有变湿的趋势,其余大部分区域呈干旱化趋势。在RCP 45的排放情景下,NSPEI在中国东北有变干趋势(图13b),SPEI检测所有区域都在变干(图13e),但西部区域变干的趋势(趋势大于 $-0.002/a$ )大于中国东部。在RCP 85的情景下,NSPEI对干旱变化趋势(图13c)的检测没有体现显著的变化,SPEI变干的趋势均大于 $-0.003/a$ 。Sheffield等<sup>[10]</sup>的研究在过去60年干旱存在被高估的现象,发现计算干旱指数使用了简化的蒸散模型,模型仅对温度响应因此高估了干旱的增加,因此在温度发生较大变化的情况下SPEI对干旱的评估存在错误的估计。而NSPEI在非平稳的条件下对干旱评估,修正了蒸发模型对温度的过度敏感响应。

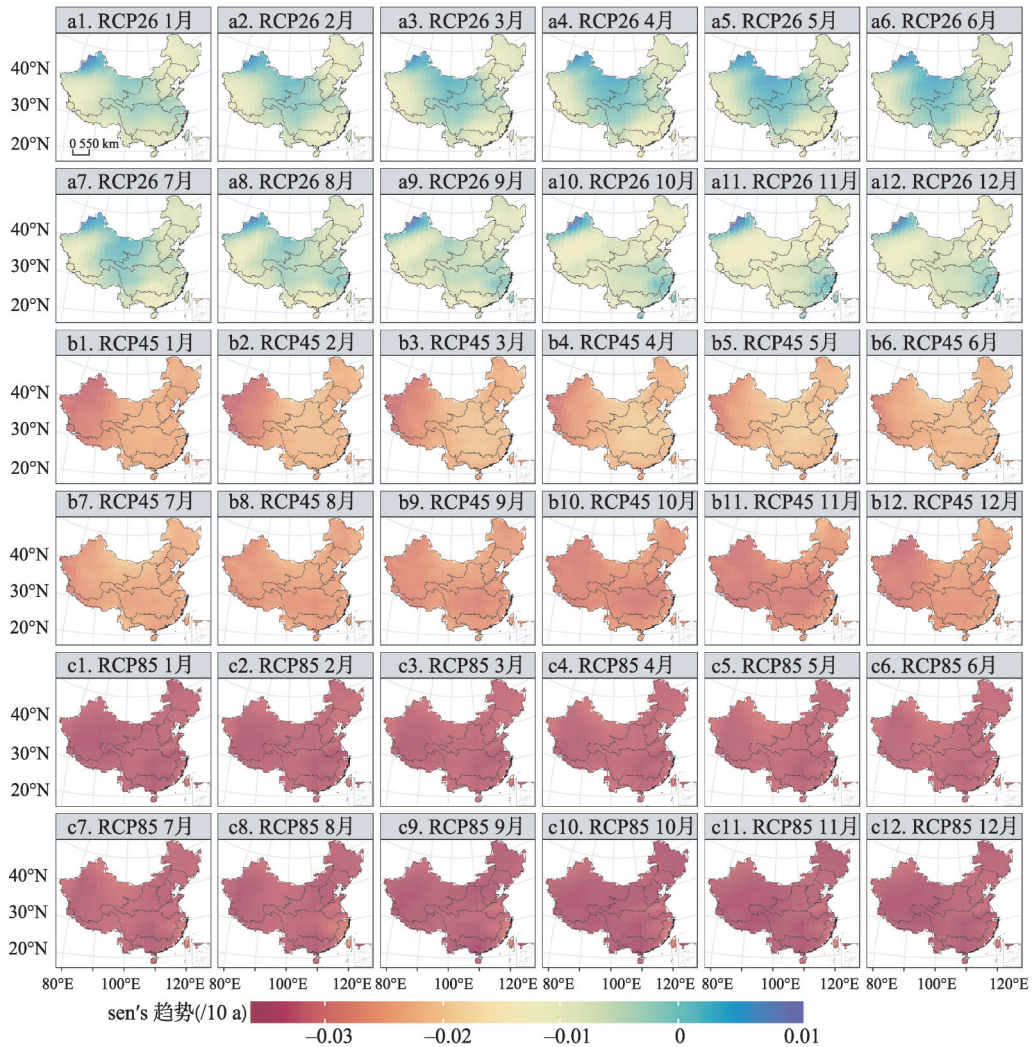


注:该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)1697号的标准地图制作,底图无修改。

图13 2006—2100年NSPEI、SPEI不同排放情景下干旱趋势分析

Fig. 13 Trend of drought in NSPEI and SPEI in different emission scenarios in China from 2006 to 2100

不同排放情景下2006—2100年月尺度SPEI干旱趋势分析如图14所示。在RCP 26排放情景下(图14a)1—8月份中国西北有变湿的趋势( $0.005/10 a$ ),其余均呈干旱化趋势;10—12月西北部和东南部呈现变湿趋势( $0.005/10 a$ )。在RCP 45排放情景下(图14b)1—7月中国区域呈干旱化趋势,其中西部呈显著干旱化趋势( $-0.03/10 a$ )。RCP 85排放情景下(图14c),中国全域干旱趋势显著增加( $-0.035/10 a$ )。基于NSPEI的2006—2100年干旱检测结果(图15)则显示RCP 26排放情景下(图15a)1—5月东北地区呈显著干旱化趋势( $-0.02/10 a$ ),东南和西北则呈湿润化趋势;东北地区6月—12月干旱化区域逐渐扩大,直到整个中国北方区域,且干旱强度不断增加(从 $-0.02$ 到 $-0.04$ );中国南方湿润化区域从华中向东南沿海转移。在RCP 45排放情景下(图15b),中国东部季风区在所有月份均呈干旱化趋势,而西部区域则有湿润化趋势,但1—7月显著干旱化趋势区域则从中国南方向中国北方转移,中国南方的趋势值从1—12月呈逐月减小(从 $-0.03$ 到 $-0.01$ )。由图15c看出,RCP 85排放情景下NSPEI检测的干旱变化结果显示(图15c)中



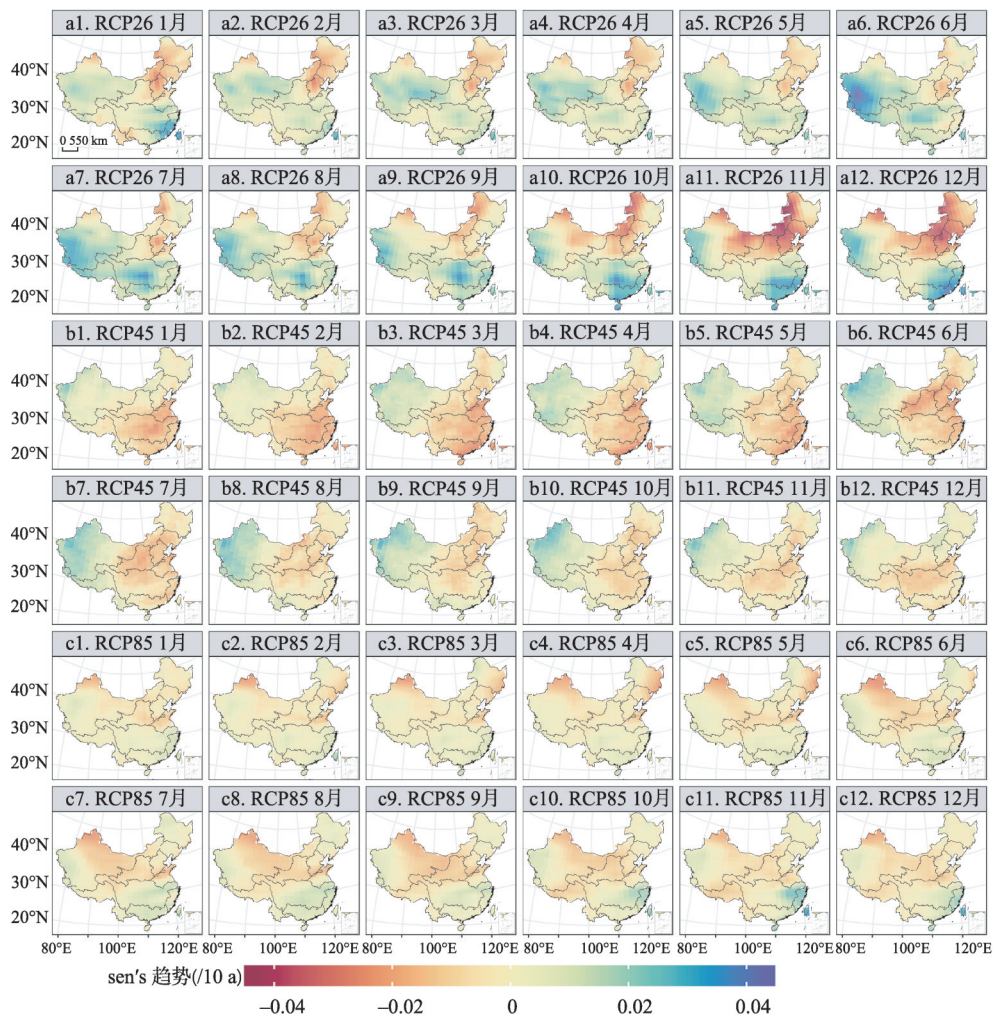
注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)1697号的标准地图制作,底图无修改。

图 14 2006—2100年SPEI不同排放情景下月尺度干旱趋势分析

Fig. 14 Trend of drought in SPEI on monthly scale in different emission scenarios in China from 2006 to 2100

国北方呈干旱化趋势，而中国南方则呈湿润化趋势；而从1—12月份，显著干旱化区域则不断扩大，同时干旱强度也在增加（从-0.01到-0.02）；中国南方湿润化区域不断集中于中国东南沿海区域。

上述研究表明，在不同排放情景下不同区域NSPEI所检测的干旱趋势不同，干湿极端事件呈常态化特征；而SPEI检测的结果则呈显著变干趋势。Sun等<sup>[43]</sup>采用极端气温指数和极端降水指数研究极端高温干旱事件的演变规律，结果表明未来黄土高原的西南和中南部将会出现更加频繁的极端高温干旱事件，本研究表明3种排放路径下NSPEI检测的干旱结果表明黄土高原有显著变干旱趋势，同时表明黄土高原未来干旱事件的频率和强度均在增加<sup>[43]</sup>。在中高排放情景下，2050年后极端干湿事件频率和强度将增加。而SPEI对未来的检测只表现出干旱强度和面积显著的增加。这一结果表明平稳性SPEI在干旱检测中存在不足，而考虑了水文气象过程非平稳性的NSPEI在干旱检测方面要优于SPEI。



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)1697号的标准地图制作,底图无修改。

图 15 2006—2100年NSPEI不同排放情景下月尺度干旱趋势分析

Fig. 15 Trend of drought in NSPEI in different emission scenarios in China from 2006 to 2100

## 4 结论

正确的干旱指标是检测干旱和干旱风险评估的关键,因此SPEI在全球和区域性气象干旱检测中得到了广泛应用。然而,本文研究表明SPEI显著高估了干旱强度和干旱历时,主要原因在于SPEI对温升过于敏感,且忽视了水文气象水过程的非平稳性,因而在干旱检测结果中易出现偏差,易导致误导性结论。基于上述问题,本研究构建了同时适用于平稳和非平稳条件下的非平稳标准化降水蒸散指数(NSPEI),并通过与sc-PDSI, SPEI以及干旱灾害统计结果进行对比,验证了NSPEI在气象干旱检测中较已有指标的优越性及能更好地描述观测的干旱事件,在此基础上,研究了中国区域气象干旱时空格局,得出以下重要发现及结论:

(1) 本文充分考虑了气象过程的非平稳性,提出了非平稳性Log-logistic概率分布计算框架,构建了非平稳性标准化降水蒸散指数(NSPEI)。采用平稳性检验发现非平稳性

集中在东北平原、黄淮海-长江中下游平原, 青藏高原及横断山区、南疆等区域。通过比较NSPEI、SPEI的干旱检测结果, NSPEI对PET的拟合分布要优于SPEI; 中国站点的NSPEI与sc-PDSI、土壤湿度的相关性要高于SPEI与sc-PDSI、土壤湿度, 而相关性的空间分布方面, NSPEI也要优于SPEI。

(2) 结合历史旱灾受灾、成灾面积分析出, NSPEI的受旱面积较SPEI、sc-PDSI要更接近真实的干旱情况。结合SPEI、sc-PDSI、土壤湿度距平对2009—2010年中国干旱进行比较, NSPEI检测的干旱与实际的观测结果在干旱区域和空间干旱演化上是一致的, NSPEI能够检测出SPEI未包含的干旱信息。结合干旱特征分析NSPEI、SPEI之间的差异, NSPEI空间变化格局与土壤湿度相似, 并检测出中国南方和东北的干旱强度、烈度、历时在逐年增大, 青海黄土高原逐年减少; 干旱发生频次两种指数则相似。

(3) 使用CMIP5项目组的RCP 26、RCP 45、RCP 85不同排放情景数据对比分析NSPEI和SPEI对未来干旱检测的效果。随着排放强度的增加, SPEI对温度响应敏感, 干旱变化趋势呈现显著上升, 特征表现为从极端湿润到极端干旱变化, 不符合正常的干旱检测。NSPEI在3种排放情景下对干旱的检测保持着干湿交替, 符合正常的干旱检测现象。在RCP 26、RCP 85情景下NSPEI检测出中国北方变干, 南方变湿, RCP 45则相反; SPEI在3种情景下均呈现变干趋势, 随着排放强度增加变干趋势越显著。NSPEI检测出在中高排放的情景下, 中国的极端干湿事件强度和频率在不断增加; SPEI只检测出未来维持着干旱的状态。

### 参考文献(References)

- [1] Schwalm C R, Williams C A, Schaefer K, et al. Reduction in carbon uptake during turn of the century drought in western North America. *Nature Geoscience*, 2012, 5(8): 551-556.
- [2] Coumou D, Rahmstorf S. A decade of weather extremes. *Nature Climate Change*, 2012, 2(7): 491-496.
- [3] State Flood Control and Drought Relief Headquarters, The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. *China Flood and Drought Bulletin 2018*. Beijing: China Water Power Press, 2019: 82-87. [国家防汛抗旱总指挥部, 中华人民共和国水利部. 中国水旱灾害公报2018. 北京: 中国水利水电出版社, 2019: 82-87.]
- [4] Vörösmarty C J, Green P, Salisbury J, et al. Global water resources: Vulnerability from climate change and population growth. *Science*, 2000, 289(5477): 284-288.
- [5] Wang Hao. Some thoughts on comprehensive response to China's drought. *China Water Resources*, 2010(8): 4-6. [王浩. 综合应对中国干旱的几点思考. *中国水利*, 2010(8): 4-6.]
- [6] Mishra A K, Singh V P. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 2010, 391(1-2): 202-216.
- [7] Dai A, Trenberth K E, Karl T R. Global variations in droughts and wet spells: 1900-1995. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(17): 3367-3370.
- [8] Cai W, Cowan T, Briggs P, et al. Rising temperature depletes soil moisture and exacerbates severe drought conditions across southeast Australia. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(21): 272-277.
- [9] Wang J, Chen F, Jin L, et al. Characteristics of the dry/wet trend over arid central Asia over the past 100 years. *Climate Research*, 2010, 41(1): 51-59.
- [10] Sheffield J, Wood E F, Roderick M L. Little change in global drought over the past 60 years. *Nature*, 2012, 491(7424): 435-438.
- [11] Sun P, Zhang Q, Wen Q Z, et al. Multisource data-based integrated agricultural drought monitoring in the Huai River Basin, China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, 122(20): 10751-10772.
- [12] Moreira E E, Coelho C A, Paulo A A, et al. SPI-based drought category prediction using loglinear models. *Journal of Hydrology*, 2008, 354(1-4): 116-130.
- [13] Zhai J, Su B, Krysanova V, et al. Spatial variation and trends in PDSI and SPI indices and their relation to streamflow in 10 large regions of China. *Journal of Climate*, 2010, 23(3): 649-663.
- [14] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. Eighth Conference on Applied Climatology of American Meteorological Society (Anaheim), 1993.
- [15] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I, et al. A multiscale drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 2010, 23(7): 1696-1718.



- [16] Chen H, Sun J. Changes in drought characteristics over China using the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 2015, 28(13): 5430-5447.
- [17] Gagniuc P A. *Markov Chains: From Theory to Implementation and Experimentation*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2017: 1-256.
- [18] Priestley M B. Non-linear and non-stationary time series analysis. *Applied Statistics*, 1988, 39(2): 385-386.
- [19] Milly P C D, Betancourt J, Falkenmark M, et al. Climate change: Stationarity is dead: Whither water management? *Science*, 2008, 319(5863): 573-574.
- [20] Ganguli P, Coulibaly P. Does non-stationarity in rainfall require non-stationary intensity-duration-frequency curves? *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(12): 6461-6483.
- [21] Deb P, Kiem A, Willgoose G. Mechanisms influencing non-stationarity in rainfall-runoff relationships in southeast Australia. *Journal of Hydrology*, 2019, 571: 749-764.
- [22] Sun P, Wen Q Z, Zhang Q, et al. Nonstationarity-based evaluation of flood frequency and flood risk in the Huai River basin, China. *Journal of Hydrology*, 2018, 567: 393-404.
- [23] Li J Z, Wang Y X, Li S F, et al. A nonstationary standardized precipitation index incorporating climate indices as covariates. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120: 12082-12095.
- [24] Wang Y X, Li J Z, Feng P, et al. A time-dependent drought index for non-stationary precipitation series. *Water Resources Management*, 2015, 29(15): 5631-5647.
- [25] Bazrafshan J, Hejazi S. A non-stationary reconnaissance drought index (NRDI) for drought monitoring in a changing climate. *Water Resources Management*, 2018, 32(8): 2611-2624.
- [26] Rashid M M, Beecham S. Development of a non-stationary standardized precipitation index and its application to a South Australian climate. *Science of the Total Environment*, 2018, 657: 882-892.
- [27] Russo S A, Dosio A, Sterl P, et al. Projection of occurrence of extreme dry-wet years and seasons in Europe with stationary and nonstationary standardized precipitation indices. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118: 7628-7639.
- [28] Vicente-Serrano S M, García-Herrera R, Barriopedro D, et al. The westerly index as complementary indicator of the North Atlantic oscillation in explaining drought variability across Europe. *Climate Dynamics*, 2016, 47(3/4): 845-863.
- [29] Water Resources Research and the Area Delimit Office, The Ministry of Water Conservation. Preliminary Appraisal on Water Resources of China. Beijing: Office for Water Resources Research and Regionalization, The Ministry of Water Conservation, 1981. [水利部水资源研究及区划办公室. 中国水资源初步评价. 北京: 水利部水资源研究及区划办公室, 1981.]
- [30] Beguería S, Vicente-Serrano S M, Reig F, et al. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: Parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *International Journal of Climatology*, 2014, 34(10): 3001-3023.
- [31] Hosking J R M. L-Moments: Analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 1990, 52(1): 105-124.
- [32] Cook E R, Peters K. The smoothing spline: A new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. *Tree-Ring Bull.*, 1981, 41: 45-53.
- [33] Wells N, Goddard S, Hayes M J. A self-calibrating palmer drought severity index. *Journal of Climate*, 2004, 17(12): 2335-2351.
- [34] Yevjevich V M. An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts. *Hydrology Papers*. Colorado: Colorado State University, 1967, 23: 1-18.
- [35] Lee D, Schmidt P. On the power of the KPSS test of stationarity against fractionally-integrated alternatives. *Journal of Econometrics*, 1996, 73(1): 285-302.
- [36] Stephens M A. EDF statistics for goodness of fit and some comparisons. *Journal of the American Statistical Association*, 1974, 69(347): 730-737.
- [37] Yang Q, Li M X, Zheng Z Y, et al. Regional applicability of seven meteorological drought indices in China. *Science China Earth Sciences*, 2017, 60(4): 745-760.
- [38] Zhang Q, Gu X, Singh V P, et al. Spatiotemporal behavior of floods and droughts and their impacts on agriculture in China. *Global Planetary Change*, 2015, 131: 63-72.
- [39] Yin Han, Li Yaohui. Summary of advance on drought study in southwest China. *Journal of Arid Meteorology*, 2013, 31(1): 182-193. [尹晗, 李耀辉. 我国西南干旱研究最新进展综述. *干旱气象*, 2013, 31(1): 182-193.]
- [40] Barriopedro D, Gouveia C M, Trigo R M, et al. The 2009/10 drought in China: Possible causes and impacts on vegetation. *Journal of Hydrometeorology*, 2012, 13(4): 1251-1267.

- [41] Hayes M, Svoboda M, Wall N, et al. The Lincoln declaration on drought indices: Universal meteorological drought index recommended. *Bulletin of the American Meteorological*, 2011, 92(4): 485-488.
- [42] Huntington T G. Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis. *Journal of Hydrology*, 2006, 319(1-4): 83-95.
- [43] Sun C X, Huang G H, Fan Y, et al. Drought occurring with hot extremes: Changes under future climate change on Loess Plateau. *China. Earth's Future*, 2019, 7(6): 587-604.

## **A multi-scalar drought index for global warming: The non-stationary standardized precipitation evaporation index (NSPEI) and spatio-temporal patterns of future drought in China**

WEN Qingzhi<sup>1,2</sup>, SUN Peng<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Qiang<sup>2,4</sup>, YAO Rui<sup>5</sup>

(1. School of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241000, Anhui, China; 2. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 4. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 5. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment for the Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** Drought is one of the most severe natural disasters that have widespread impacts on eco-environment and agriculture. Great efforts have been made on the study of the non-stationarity of hydrometeorological processes, while few reports are available addressing non-stationarity in drought index. Therefore, in this study, we attempted to develop a non-stationary standardized precipitation evaporation index (NSPEI) based on standardized precipitation evaporation index and non-stationary theory with the aim of investigating drought conditions across China in both space and time under different emission scenarios from 2006 to 2100. The results indicated that: (1) Stations with non-stationary hydrometeorological processes are concentrated in northeast China, the Huang-Huai-Hai Plain, the Yangtze River Delta, the Tibetan Plateau, the Hengduan Mountains, and the southern Xinjiang. The NSPEI has the best fitting performance at 88% of the meteorological stations considered in this study. (2) Compared with other drought indices, SPEI tends to overestimate the intensity and duration of droughts during evaluations of the future drought changes; while NSPEI avoids the weakness of SPEI in overestimation of drought intensity. Therefore, NSPEI can better monitor the meteorological droughts in China and describe the future drought changes across the country. (3) Drought monitoring results based on NSPEI indicated an increasing drought trend in northern China, and southern China is dominated by a wetting trend under the scenario of low and high emissions. Extreme dry and wet duration and occurrence frequency showed an increasing trend in China in the future under medium and high emission scenarios.

**Keywords:** non-stationary standardized precipitation evapotranspiration index; drought monitoring; spatio-temporal patterns; global warming