

基于两种干旱指数对淮河流域干旱程度变化的分析

吴昊侯, 龙凌云

岑巩县气象局(岑巩县气象台), 贵州 黔东南

收稿日期: 2024年10月3日; 录用日期: 2024年10月31日; 发布日期: 2024年11月11日

摘要

通过淮河1960~2012年间154个气象站的降水资料, 选择标准化降水蒸散指数(SPEI)与标准化降水指数(SPI)作为干旱指标, 对淮河流域的干旱特征变化进行分析。结果显示: (1) 时间尺度相同的情况下, 干旱指数SPEI相对于干旱指数SPI对干旱的评估偏低, 整体评估偏湿。(2) 两个指数的时间序列图均表明淮河流域的干湿转变在逐渐平缓, 且有干旱趋势, 但SPEI表现更为平稳, 波动较小。(3) 淮河流域整体属于洪旱灾害频发区, 流域南部、东部、东北部是洪涝灾害频发区; 流域中部、南部为干旱灾害频发区。(4) 淮河流域西部和北部面临较为严峻的干旱风险。对于Z值, SPEI普遍比SPI高, 这表明在干旱趋势上, SPEI指数比SPI指数更倾向干旱趋势。

关键词

标准化降水蒸散指数(SPEI), 标准化降水指数(SPI), 淮河流域, 干旱

Analysis on the Change of Drought Degree in Huaihe River Basin Based on Two Drought Indexes

Haoyu Wu, Lingyun Long

Cengong County Meteorological Bureau (Cengong County Meteorological Observatory), Qiandongnan Guizhou

Received: Oct. 3rd, 2024; accepted: Oct. 31st, 2024; published: Nov. 11th, 2024

Abstract

Based on the precipitation data of 154 meteorological stations in Huaihe River from 1960 to 2012, the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) and standardized precipitation

文章引用: 吴昊侯, 龙凌云. 基于两种干旱指数对淮河流域干旱程度变化的分析[J]. 气候变化研究快报, 2024, 13(6): 1564-1582. DOI: 10.12677/ccrl.2024.136168

index (SPI) are selected as drought indicators to analyze the changes of Drought Characteristics in Huaihe River Basin. The results show that: (1) Under the same time scale, the evaluation of drought-by-drought index SPEI is lower than that by drought index SPI, and the overall evaluation is wet. (2) The time series diagrams of the two indexes show that the dry wet transition in the Huaihe River Basin is gradually gentle, and there is a drought trend, but SPEI is more stable and has less fluctuation. (3) The Huaihe River Basin as a whole belongs to the area with frequent flood and drought disasters, and the south, East and northeast of the basin are the areas with frequent flood and waterlogging disasters; The central and southern parts of the basin are drought disaster prone areas. (4) The West and north of Huaihe River Basin are facing severe drought risk. For Z value, SPEI is generally higher than SPI, which indicates that SPEI index is more inclined to drought trend than SPI index.

Keywords

Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI), Standardized Precipitation Index (SPI), Huaihe River Basin, Drought

Copyright © 2024 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

淮河流域是我国洪旱灾害频繁发生的区域之一,自新中国成立以来,记录下的重大洪旱灾有许多,例如1950年7月、1954年7月的淮河大水、1978年旱灾,近年来也不少灾害发生,2019年5月发生的60年一遇干旱,但在我国已经成立的南水北调工程和江水北调工程的大力支持下,解决了人民生活的用水需求以及农业用水需求。淮河流域同时也是我国重要粮食生产基地,在农作物方面有小麦、水稻、玉米等。根据近年来的研究,淮河流域呈现干旱化的趋势[1],因此本文以淮河流域作为研究对象。

干旱是严重影响当今世界人类社会的一种范围广、时间长、频率高的气象灾害,被认为是世界上最严重的自然灾害类型之一[2],这也是干旱越来越受重视和越来越多对于干旱的研究的原因,且目前已经涌现了大量对于干旱问题的研究,但由于干旱形成的原因极其复杂、且影响因子又有很多,再加上各行各业所对干旱进行的研究目的不同,故造成了干旱未有一个普遍通用的定义。但尽管各类表述不相同,这些定义都囊括了干旱最核心的内容——水分缺乏。美国气象学会把干旱分为4种类型:水文干旱、气象干旱、农业干旱及社会经济干旱。其中,气象干旱是其他类型干旱的发生的前提,是引发其他类型干旱极其重要的因素。

对于干旱就需要使用干旱指标的概念,干旱指标是干旱监测的基础与核心,拥有量度、对比、分析旱情的作用。现如今气象指数已有上百种[3][4]。我国也涌现出许多利用干旱指数对某个区域进行研究的成果。例如罗漫雅等利用干旱指数对陕北地区的研究[5]、容锦盟等对华北地区的研究[6]、陈丽等对孔雀河流域研究[7]、郑金丽等对鄱阳湖的研究[8],由此可见,对干旱的研究正发展得越来越成熟[9],这也为干旱的监测、预警、预防提供了理论依据[10]。国外也已经有了一些将SPEI与机器学习进行结合的研究实验[11][12],也有将SPEI与农业结合研究农作物对农业干旱的响应[13],无论国内外的研究其目的都是为了更好地服务于人类生活。由于SPI不涉及具体的干旱机制,仅考虑降水所产生的影响,进而对干旱进行判断表现得极其灵敏,能较好反映干旱所发生的强度与干旱发生的持续时间,但又因为只考虑了降水量的影响,所以SPI指数对干旱的识别有一定的局限性,而SPEI由于结合了PDSI对蒸发需求变化

(由温度波动和趋势引起)的敏感性并且蒸发利用了当今更容易接受的 Penman-Monteith 方法[14], 以及结合了 SPI 的计算简单性和多时间特性, 所以特别适合于检测、监测和探索全球变暖对干旱状况的影响。由于 SPI 和 SPEI 两种指数不仅对时空的适应性强, 同时也具有多类时间尺度应用特性, 在这两种特性的影响下, SPI 和 SPEI 进行干旱在不同时间尺度的判断和比较成为可能。

基于地面气象站观测数据, 分别计算两种干旱指数 SPI 与 SPEI, 在此基础上, 对淮河流域干湿程度变化的时空分布特征及其演变趋势进行分析, 以客观评估淮河流域的气候特征, 为水资源管理和农业生产提供依据。具体研究内容如下:

- (1) 估算淮河流域的潜在蒸散发, 计算淮河流域的 SPEI 指数, 作为淮河流域干旱特征的一个量化指标;
- (2) 基于降水数据, 计算淮河流域的 SPI 指数, 作为其干旱特征的另一个量化指标;
- (3) 分别基于 SPI 与 SPEI 值, 对淮河流域进行干湿区域划分, 对比分析两种指数在区域划分上的差异;
- (4) 分别基于 SPI 与 SPEI 值, 以不同时间尺度为基准研究分析淮河流域的干湿程度变化趋势, 对比分析两种指数在时间表现上的差异;
- (5) 分别基于 SPI 与 SPEI 值, 以通用划分标准对极端干旱、极端湿润等次数进行计数统计分析, 对比分析两种指数在干旱事件捕捉能力上的差异;
- (6) 分别基于 SPI 与 SPEI 值, 采用 Mann-Kendall 非参数检验法(M-K 法)分析各指标在空间上的变化趋势;
- (7) 对结果进行分析, 对淮河流域干湿程度变化的时空分布特征及其演变趋势进行分析, 以客观评估淮河流域的气候特征。

2. 资料与方法

淮河流域位于我国南部气候过渡带, 同时也在第二、三级地势高度上, 且由西北向东南倾向。淮河流域位于东经 111°55'~121°20', 北纬 30°55'~36°20'之间, 流域分为两大水系, 为淮河与沂沭泗河(如图 1)。气温方面, 呈现由北向南、沿海地区像内陆地区增长的趋势。水量方面, 近年呈现上升趋势[15]。由于淮河流域拥有良好的地理条件, 所以自古以来淮河流域就是人口多、土地肥、交通达、资源多的地区, 近代以来, 由于国家的政策鼓励, 以及西部战略的重要部署, 淮河流域更成为我国重要的能源、制造、粮食生产基地, 所以淮河流域一直被我国视为珍宝[16]。

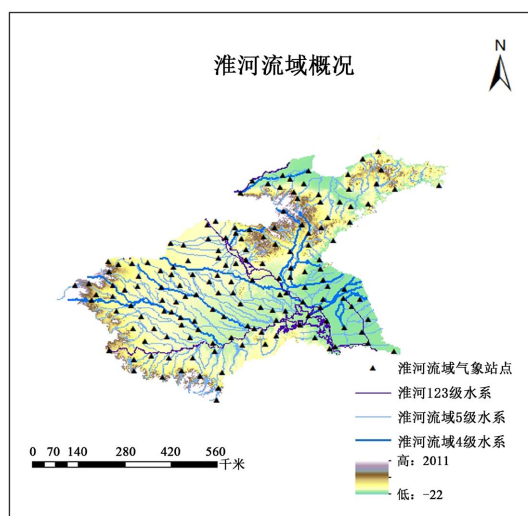


Figure 1. Overview of geographic information in the Huai River Basin
图 1. 淮河流域地理信息概况

本篇文章采用淮河流域 154 个气象站 1960~2012 年共 53 年的降水资料与蒸散发资料进行实验。同时, 本文均采用克里金插值法对各干旱等级频次在淮河流域的空间分布情况进行分析。利用彭曼蒙迪斯方法(FAO-Penman-Monteith)和曼-肯德尔法(Mann-Kendall), 通过使用蒸散发资料估算出淮河流域的潜在蒸散发量再结合降水资料, 选取标准化降水蒸腾指数(SPEI)与标准化降水指数(SPI)作为干旱指标, 对淮河流域的干旱频次、变化趋势等干旱特征进行分析研究, 促进了解淮河流域的干旱变化特征情况。

2.1. 标准化降水蒸腾指数计算

先计算月降水量与月潜在蒸发量的差值, 后经过正态标准化处理得到 SPEI。

① 建立不同时间尺度(1 个月/3 个月/6 个月/12 个月)水分盈亏累积序列 D_n 。

(1) 计算日降水与潜在蒸发的差, 即:

$$D_i = P_i - (ETC)_i \quad (1)$$

式中: i 表示某日; P_i 为日降水量(mm); $(ETC)_i$ 为潜在蒸发量(mm)。

(2) 建立不同时间尺度水分盈亏累积序列:

$$D_n^k = \sum_{i=0}^{k-1} [P_{n-i} - (ETC)_{n-i}], \quad n \geq k \quad (2)$$

式中: k 表示研究的时间尺度(d); n 表示某天。

② 概率密度拟合, 采用 Log-logistics 分布对 D_n^k 拟合。

$$F_{(x)} = \left[1 + \left(\frac{a}{x - \gamma} \right)^\beta \right]^{-1} \quad (3)$$

式中: α 、 β 、 γ 为参数。采用线性矩法得到, 如下:

$$\beta = \frac{2w_1 - w_0}{6w_1 - w_0 - 6w_2} \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{(w_0 - 2w_1)\beta}{\Gamma(1+1/\beta)\Gamma(1-1/\beta)} \quad (5)$$

$$\gamma = w_0 - \alpha\Gamma(1+1/\beta)\Gamma(1-1/\beta) \quad (6)$$

式中: Γ 为阶乘函数; W_0 、 W_1 、 W_2 为升序排列后的概率加权矩。计算步骤如下:

$$W_s = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N (1 - F_i)^s D_i \quad (7)$$

$$F_i = \frac{i - 0.35}{N} \quad (8)$$

式中: N 为参与计算的天数。

最终得到概率密度函数的参数, 并计算得出正常时间顺序的 D_i 对应的概率值 $F_{(x)}$ 。

③ 对累积概率密度进行正态标准化:

$$P = 1 - F_{(x)} \quad (9)$$

当累积概率 $P \leq 0.5$ 时, 概率加权矩(w)公式为:

$$w = \sqrt{-2\ln(P)} \quad (10)$$

$$SPEI = w - \frac{C_0 + C_1 w + C_2 w^2}{1 + d_1 w + d_2 w^2 + d_3 w^3} \quad (11)$$

当 $P > 0.5$ 时, 以 $1 - P$ 表示 P :

$$SPEI = 1 - \left(w - \frac{C_0 + C_1 w + C_2 w^2}{1 + d_1 w + d_2 w^2 + d_3 w^3} \right) \tag{12}$$

式中 $c_0 = 2.515517$, $C_1 = 0.802853$, $C_2 = 0.010328$, $d_1 = 1.432788$, $d_2 = 0.189269$, $d_3 = 0.001308$ 。

④ 等级划分: 根据所求 SPEI 值进行等级划分, 如表 1。

Table 1. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) classification table
表 1. 标准化降水蒸散指数(SPEI)等级划分表

标准化降水蒸散指数(SPEI)等级划分	
等级	阈值
极涝	≥ 2.00
重涝	1.50~2.00
中涝	1.00~1.50
轻涝	0.50~1.00
正常	0.50~-0.50
轻旱	-0.50~-1.00
中旱	-1.50~-1.00
重旱	-2.00~-1.50
极旱	≤ -2.00

2.2. 标准化降水指数的计算

通过先求出降水量 Γ 分布概率后再进行正态标准化可得标准化降水指数(SPI)。

① 设某段时间内的降水量为 x , 则概率密度为:

$$F_{(x)} = \frac{1}{\beta^\gamma \Gamma(\gamma)} x^{\gamma-1} e^{-x/\beta} \tag{13}$$

$$\Gamma(\gamma) = \int_0^\infty x^{\gamma-1} e^{-x} dx \tag{14}$$

式中: β 为尺度参数, γ 形状参数, 均可用极大似然估计法进行求解, 即:

$$\hat{\gamma} = \frac{1 + \sqrt{1 + 4A/3}}{4A} \tag{15}$$

$$\hat{\beta} = \bar{x} / \hat{\gamma} \tag{16}$$

$$A = \lg \bar{x} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg x_i \tag{17}$$

公式中: x_i 为降水量, \bar{x} 为多年降水平均值。

对于某一年的降水 x_0 , 可得随机变量小于 x_0 的概率为:

$$P_{(x < x_0)} = \int_0^\infty F(x) dx \tag{18}$$

② 降水量为 0 时的概率估计为:

$$P_{(x=0)} = \frac{m}{n} \tag{19}$$

式中: m 表示降水量等于 0 的样本数, n 为样本总数。

③ 对 Γ 进行正态化处理, 即:

$$P_{(x < x_0)} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} e^{-z^2/2} dz \quad (20)$$

进行求解后可得:

$$Z = S \frac{t - (C_2 t + C_1) t + c_0}{((d_3 t + d_2) t + d_1) t + 1.0} \quad (21)$$

式中 $t = \sqrt{\ln \frac{1}{p^2}}$, P 为所求得概率, 当 $P > 0.5$ 时, $P = 1.0 - P$, $S = 1$; 当 $P \leq 0.5$ 时, $S = -1$ 。式中 $c_0 = 2.515517$, $C_1 = 0.802853$, $C_2 = 0.010328$, $d_1 = 1.432788$, $d_2 = 0.189269$, $d_3 = 0.001308$ 。

式中 Z 值即所求 SPI 。

④ 等级划分: 根据所求 SPI 值进行等级划分, 如表 2。

Table 2. Standardized precipitation index (SPI) classification table

表 2. 标准化降水指数(SPI)等级划分表

标准化降水指数(SPI)等级划分	
等级	阈值
极涝	≥ 2.00
重涝	1.50~2.00
中涝	1.00~1.50
轻涝	0.50~1.00
正常	0.50~-0.50
轻旱	-0.50~-1.00
中旱	-1.50~-1.00
重旱	-2.00~-1.50
极旱	≤ -2.00

2.3. 曼 - 肯德尔法

曼 - 肯德尔法(Mann-Kendall), 可运用于气候诊断和预测, 属于非参数方法。特点是样本不用遵从一定的分布, 少量的异常值也不会影响, 简便的计算更适合类型变量、顺序变量。

假设 H_0 是处于时间序列下的数据 (X_1, X_2, \dots, X_n) , 且满足独立、随机、同分布的样本; 假设 H_1 采用双边检验。则所有的 i , 当 $j \leq n$, 且 $i \neq j$, X_i 和 X_j 是不同的分布。定义统计量 S :

$$S = \sum_{j=2}^n \sum_{i=1}^{j-1} \text{sign}(x_i - x_j) \quad (22)$$

式中, sign 是符号函数, 当 $x_i - x_j < 0$, $\text{sign}(x_i - x_j) = -1$; 当 $x_i - x_j = 0$, $\text{sign}(x_i - x_j) = 0$; 当 $x_i - x_j > 0$, $\text{sign}(x_i - x_j) = 1$ 。 S 则成为正态分布, 均值为 0, 方差为 $\text{Var}(S) = n(n-1)(2n+5)/18$ 。

$$Z = (S-1) / \sqrt{n(n-1)(2n+5)/18}, S > 0 \quad (23)$$

$$Z = 0, S = 0 \quad (24)$$

$$Z = (S+1) / \sqrt{n(n-1)(2n+5)/18}, S < 0 \quad (25)$$

双边检验中, 给定置信水平 α , 若 $|z| \geq z_{1-\alpha/2}$, 原假设 H_0 是不接受的, $Z > 0$ 则为增加趋势, 反之为下降趋势。当 $|z| \geq 2.32, 1.64, 1.28$ 时, 则通过显著性 99%、95%、90% 的试验。

2.4. 彭曼蒙迪斯公式

彭曼蒙迪斯公式(Penman-Monteith)是计算蒸发能力(水面蒸发) E_0 的半经验半理论公式, 具体如下:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (26)$$

式中: ET_0 潜在蒸发量, R_n 地表净辐射, G 为土壤热通量, T 为 2 米日均温度, U_2 为 2 米风速, e_s 饱和水汽压, e_a 实际水汽压, Δ 饱和水汽压线斜率, γ 干湿表常数 $0.665 \times 10^{-3} \text{P}$ 。

2.5. 干湿指数

用同时时间的降水量除以蒸发量得到干湿指数, 如下:

$$K = \frac{P}{E} \quad (27)$$

式中: P 表降水量(mm); E 表蒸发量(mm)。

3. 结果分析

3.1. 淮河流域气象条件分析

根据图 2(a)可以明显看出, 淮河流域年均降水量整体呈现从东南到西北呈阶梯式逐级递减趋势, 年均降水量范围在 569~1465 mm。由于我国季风气候条件与地形条件, 使得淮河流域处于半湿润地区($400 \text{ mm} < P < 800 \text{ mm}$)以及湿润地区($P > 800 \text{ mm}$)交界地带。综上, 淮河流域拥有良好的雨水条件, 但南北降水量差异较大。

根据图 2(b), 淮河流域年均蒸散发大致呈现由东南至西北逐级增加, 但是蒸发量变化不大, 范围在 101 mm~125 mm, 在淮河北部蒸发量达到最大, 为 125 mm, 年均蒸散发量整体差距较小。

图 2(c)显示, 淮河流域干湿指数大致呈现由南到北逐级递减的情形, 在淮河流域最南部到达最大值, 为 14.66; 干湿指数在淮河流域的分布与年均降水量在淮河流域的分布大体相一致, 因此可以认为降水量是影响淮河流域干旱程度的重要因素之一。

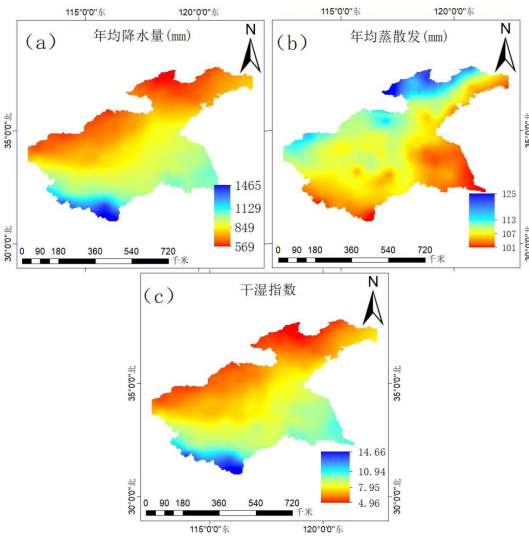


Figure 2. Overview of basic meteorological information in the Huai River Basin
图 2. 淮河流域基本气象信息概况

3.2. 淮河流域干旱特征

3.2.1. 淮河流域各干旱等级频次概况

表 3 为分别基于 SPI 指数、SPEI 指数, 进行的不同时间尺度下干旱频次统计。由于本文主要研究淮河流域干旱事件, 因此将 SPI 指数、SPEI 指数大于 0.5 的事件均记为涝。

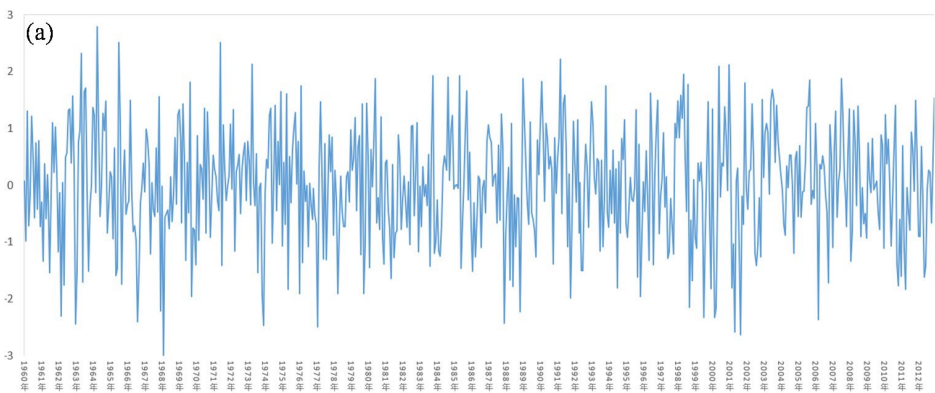
Table 3. Analysis of drought frequency at different time scales
表 3. 各时间尺度干旱频次统计

干旱指数	时间尺度(月)	干旱等级					
		涝合计	正常	轻旱	中旱	重旱	极旱
SPI	1	199	249	85	54	33	16
	3	204	240	87	53	35	17
	6	196	245	91	63	28	13
	12	190	249	103	55	25	14
SPEI	1	203	218	97	83	29	6
	3	209	218	95	75	32	7
	6	199	236	93	71	28	9
	12	201	240	101	57	26	11

比较两种干旱指数。明显可以看出, 在时间尺度相同的情况下, SPEI 对重旱、极端干旱事件识别的频次较 SPI 少, 但对轻旱、中旱的识别较 SPI 多, 对涝事件的评估偏多。说明在相同尺度下, 干旱指数 SPEI 对于干旱的评估偏低, 整体评估偏湿。

3.2.2. 两种干旱指数的时间特征对比分析

图 3 为不同时间尺度上的 SPI 时间序列, 其中图 3(a)中 SPI 处于-3.05~2.80, 图 3(b)中 SPI 处于-2.85~2.44, 图 3(c)中 SPI 处于-3.38~2.52, 图 4(d)中 SPI 处于-2.56~2.64。可以看出, 随着时间尺度的增大, SPI 值整体振荡幅度减小, 且振荡的频率也在减小。值得注意的是, 图 3(d)序列从 2009 年开始 SPI 值振荡幅度在 1 左右甚至小于 1 且多为小于 0, 这表明淮河流域的干湿转变程度更为平缓, 且多表现为干旱状态。所以可以认为淮河流域从 2009 年开始呈现干旱的趋势。图 4 为不同时间尺度上的 SPEI 时间序列, 其中图 4(a) SPEI 值处于-2.14~2.31; 图 4(b)中 SPEI 处于-2.31~2.32; 图 4(c)中 SPEI 处于-2.42~2.16; 图 4(d)中 SPEI 处于-2.45~2.33。根据四幅图比较显示出, 随着时间尺度增大, SPEI 值的振荡频率是呈现下降趋势, SPEI 值的振幅从整体上没有很明显的趋势变化, 但明显可以看见从 2009 年开始, 振幅有着很强的减小趋势, 且多数小于 0, 这表明淮河流域干湿转变变化更为平缓, 且多主要表现为干旱状态。



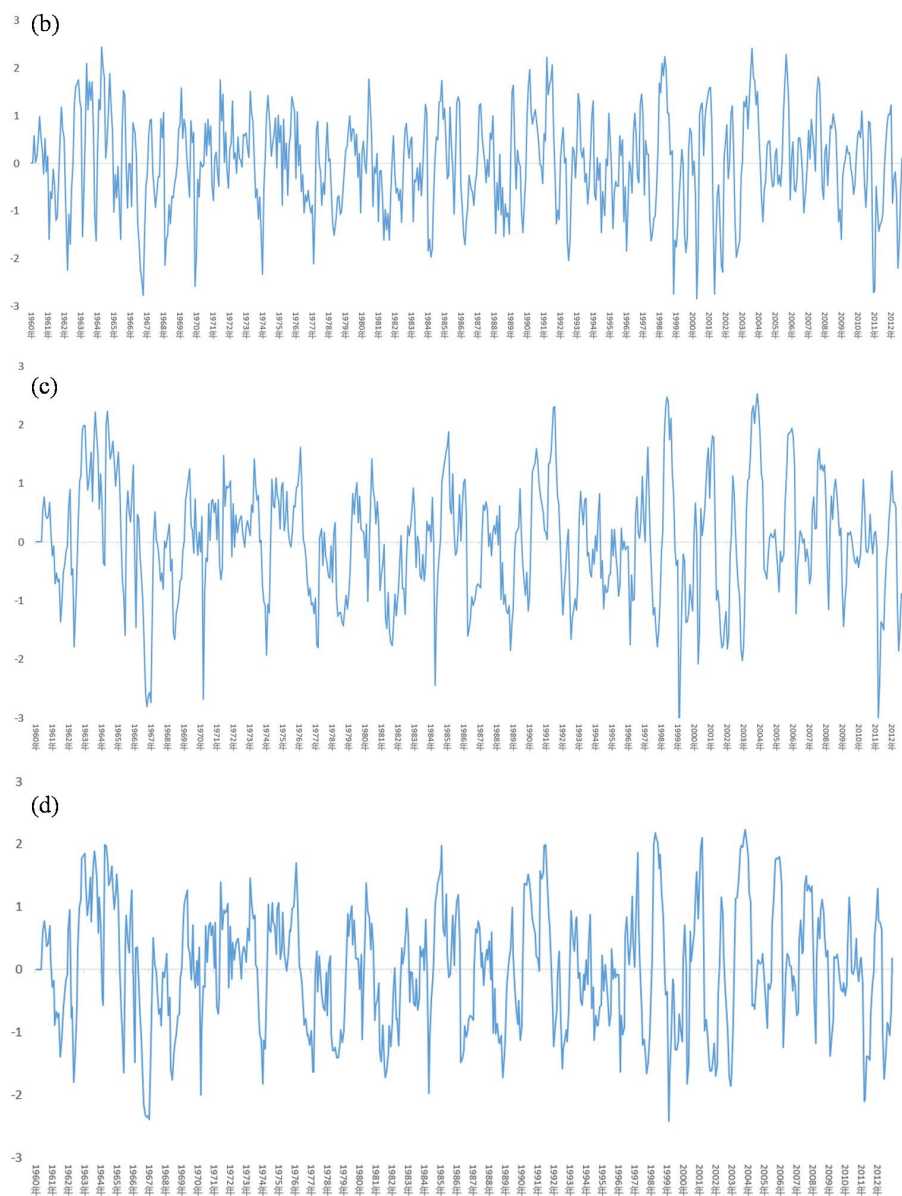
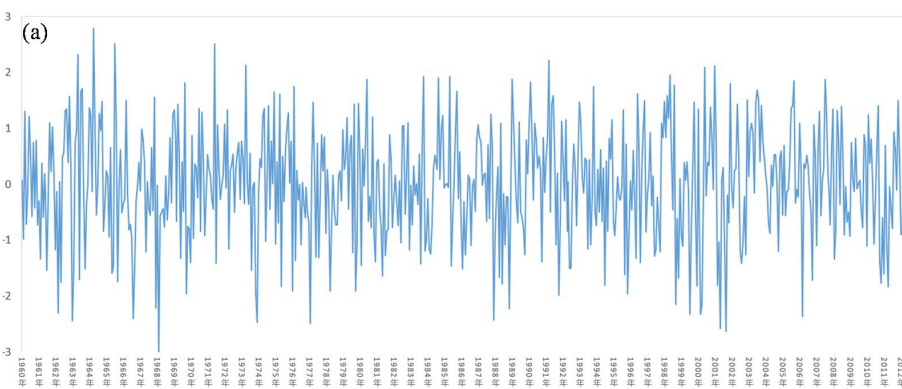


Figure 3. SPI time series diagram (From top to bottom, the time scale is 1, 3, 6, and 12 months)
图 3. SPI 时间序列图(从上至下, 时间尺度为 1, 3, 6, 12 个月)



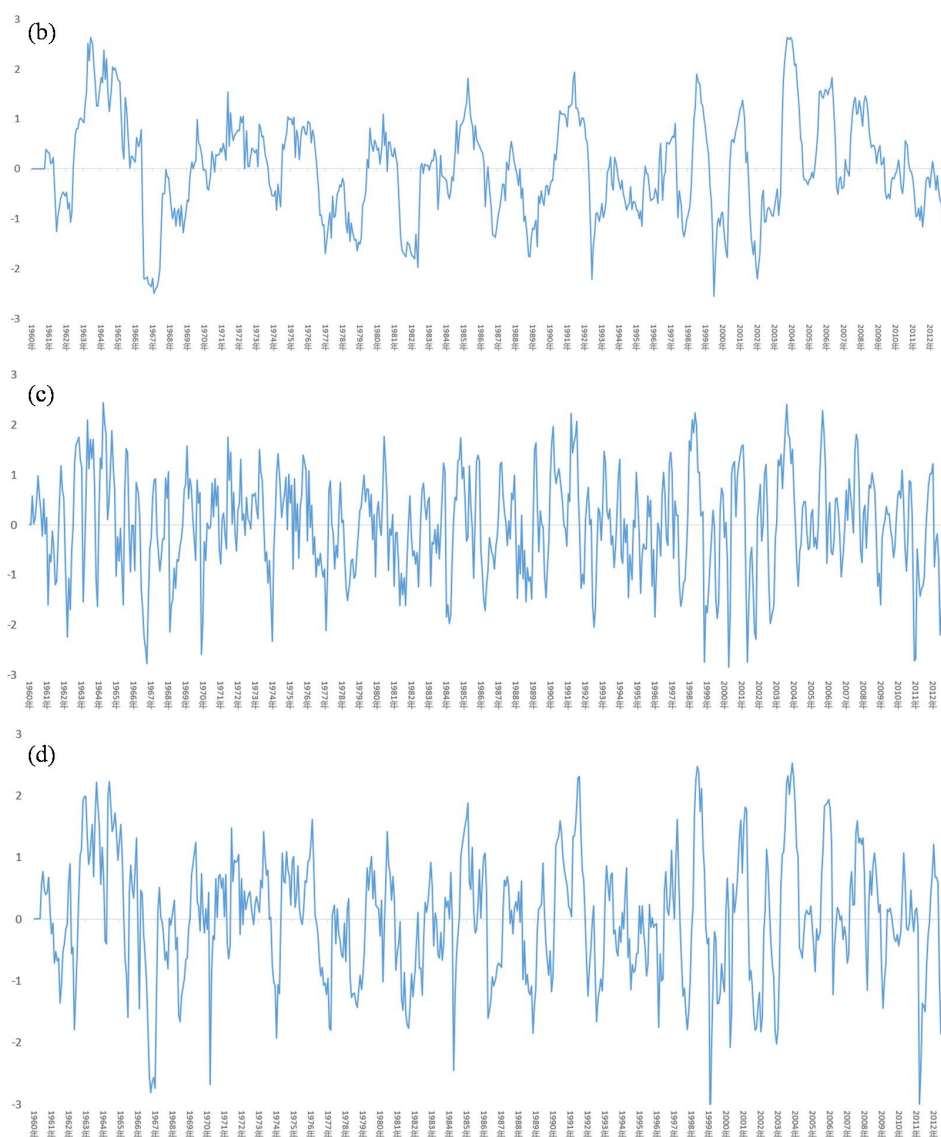


Figure 4. SPEI time series diagram (From top to bottom, the time scale is 1, 3, 6, and 12 months)
图 4. SPEI 时间序列图(从上至下, 时间尺度为 1、3、6、12 个月)

对比图 3 和图 4, 两指数 SPI 和 SPEI 因为时间尺度的增大, 振荡频率都有所下降, 都表明淮河流域的干湿转变变化更为平缓, 且从时间尺度为 12 个月的图来看近年(2009 年~2012 年)都呈现着干旱的趋势。对比两指数, SPI 随着时间尺度的增大, 振幅是有明显的减小变化, 而 SPEI 随着时间尺度的增大, 振幅变化不明显, 这说明 SPEI 对于评价淮河流域的干旱特征更为平稳。

3.2.3. 两种干旱指数的干旱等级频次对比分析

对比图 5 与图 6, 两幅图展现的洪涝事件频次分布大体相同, 流域洪涝事件在 1960~2012 年中都发生 200 次左右, 即 3.8 次/年, 西部和北部小部分地区发生较少, 南部和东部相对较多, 随着时间尺度的增加, 原洪涝灾害低频次区域逐渐集中, 洪涝灾害高频次区域也是逐渐集中, 相比之下洪涝事件主要集中在南部和东部及东北小部分地区, 原因可参考图 2(a)。因为南部和东部年降水量较多, 使得降水容易积累, 东北部由于靠近海域, 且我国又是季风气候国家, 所以会产生水汽输送至东北部, 导致东北部洪

涝频次也处于较高水平。相同时间尺度上, SPEI 的洪涝事件频次比 SPI 的洪涝事件频次普遍偏高, 但明显 SPI 各时间尺度洪涝事件频次分布所展现的区域性对比 SPEI 各时间尺度洪涝事件频次分布更为分散, SPEI 的洪涝事件区域性更为分明, 例如在淮河流域的东部和北部区域, 图 6(d)中高频次区域集中出现在东北部和东部地区, 而图 5(d)中高频次区域分布在淮河流域南部、东部和东北部。

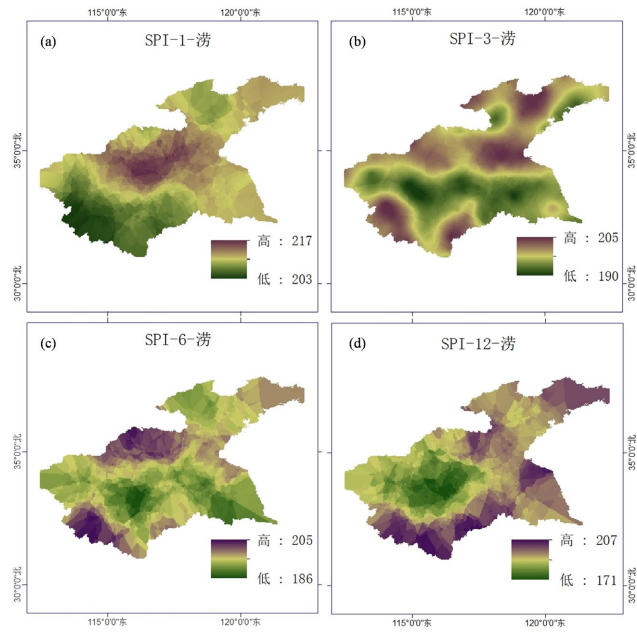


Figure 5. The total frequency map of flood events at different time scales of SPI in the Huai River Basin
图 5. 淮河流域 SPI 各时间尺度洪涝事件总频次图

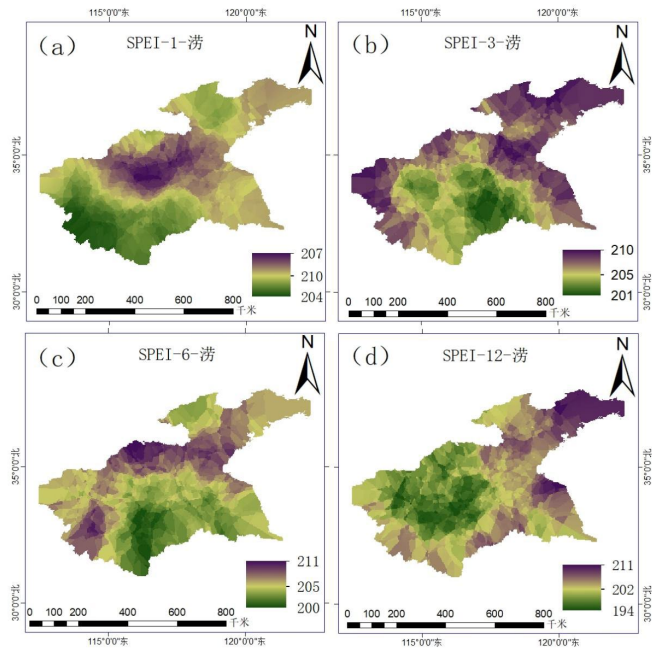


Figure 6. The total frequency map of flood events at different time scales of SPEI in the Huai River Basin
图 6. 淮河流域 SPEI 各时间尺度洪涝事件总频次图

比较图 7 与图 8, SPI 指数与 SPEI 指数所识别的轻旱事件频次分布结构大致相同, 轻旱事件在 1960~2012 年均发生 100 次左右, 即 1.9 次/年, 轻旱事件主要集中在中部、中西部和东北部。观察发现, 随着时间尺度的加大, 轻旱高频次区逐渐集中至中西部以及东北部区域。淮河流域北部随着时间尺度的增加, 从较高值区变为低值区, 而中部、中西部水汽输送较少, 频次分布变化相对稳定。再次表明水汽输送对干旱程度的影响。但通过对比可以看出, SPEI 所识别的轻旱事件高值区比 SPI 识别的轻旱事件高值区占比更重, 如图 8(d)与图 7(d)中, 原 SPI 识别为轻旱频次较低的区域在 SPEI 中颜色有所加深, 即轻旱事件频次有所上升。这表明 SPEI 指数在识别干旱时, 对于干旱程度的识别较 SPI 指数轻。

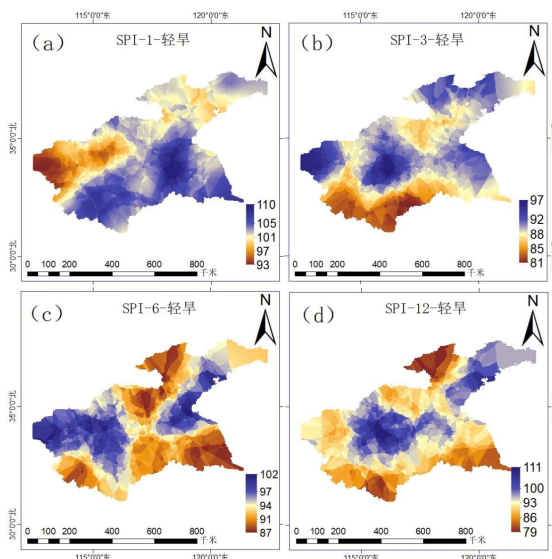


Figure 7. The total frequency map of light drought events at different time scales of SPI in the Huai River Basin
图 7. 淮河流域 SPI 各时间尺度轻旱事件频次分布图

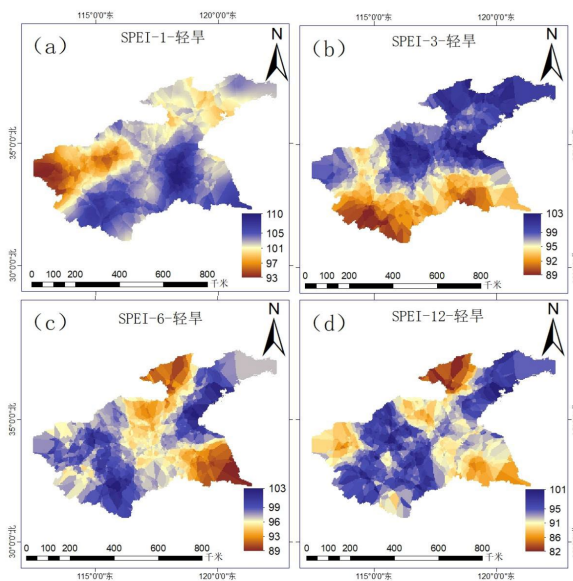


Figure 8. The total frequency map of light drought events at different time scales of SPEI in the Huai River Basin
图 8. 淮河流域 SPEI 各时间尺度轻旱事件频次分布图

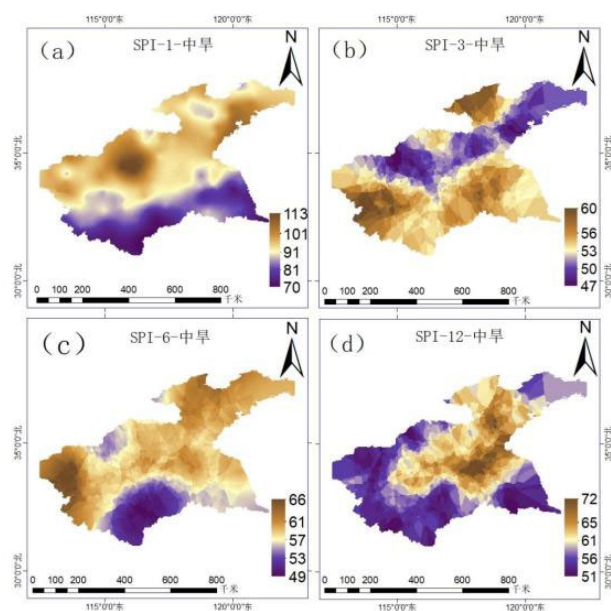


Figure 9. The total frequency map of moderate drought events at different time scales of SPI in the Huai River Basin
图 9. 淮河流域 SPI 各时间尺度中旱事件频次分布图

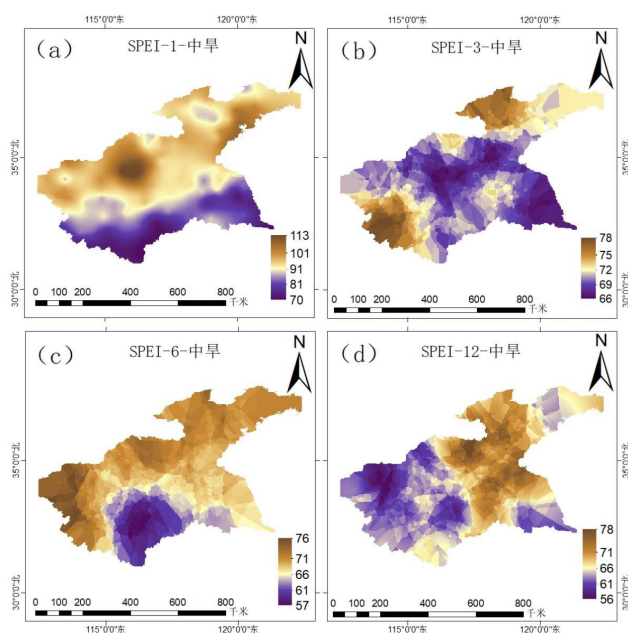


Figure 10. The total frequency map of moderate drought events at different time scales of SPEI in the Huai River Basin
图 10. 淮河流域 SPEI 各时间尺度中旱事件频次分布图

根据图 9 与图 10, 中旱频次在 1960~2012 年均发生 80 次左右, 即 1.5 次/年。SPI 各时间尺度中旱事件频次分布几乎呈两级分布即南少北多, 这与图 2 中年均降水量分布结果极其贴切, 而随着时间尺度的增加, 频次分布明显逐渐稳定集中, 且主要集中于淮河流域的中部、中西部与北部即高值区, 而南部与东南部因为降水量丰富而频次相对较少。干旱事件频次也因时间尺度的增加而有所降低。SPEI 计算呈现出的中旱事件频次区域变动较大, 但随着时间尺度的增加, 分布主要表现集中在淮河流域中部、北部地

区, 西南部地区相对较少。对比发现, 时间尺度均为 1 个月与 6 个月时, 两种指数计算的中旱频次分布图比较契合; 时间尺度为 3 个月时, 中旱频次分布图在东北部与东南部差异较大, 时间尺度为 12 个月时, 中旱频次分布图在流域中西部有较大差异。这表明 SPI 与 SPEI 指数在识别中旱时, 在影响干旱程度因素较少的地区识别程度大体相同, 而在影响因素比较复杂的地区表现则有所不同, 例如图 9(b)中流域东北部地区为低频次区, 而图 10(b)中流域东北部地区为较高频次区。

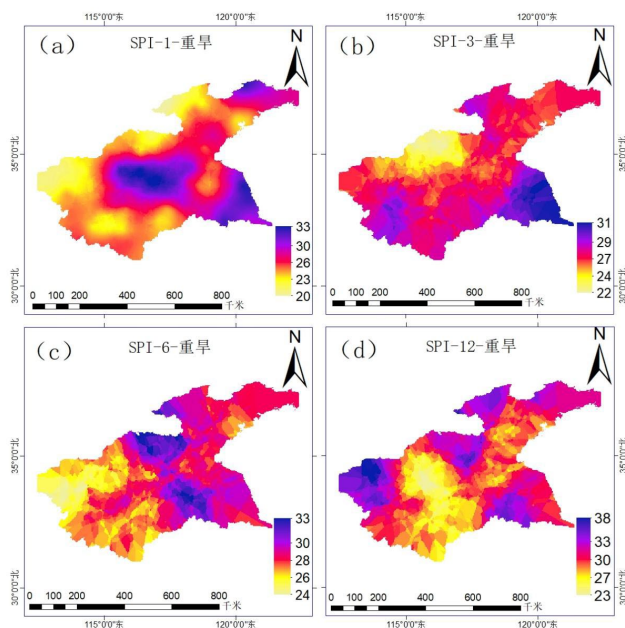


Figure 11. The total frequency map of severe drought events at different time scales of SPI in the Huaihe River Basin
图 11. 淮河流域 SPI 各时间尺度重旱事件频次分布图

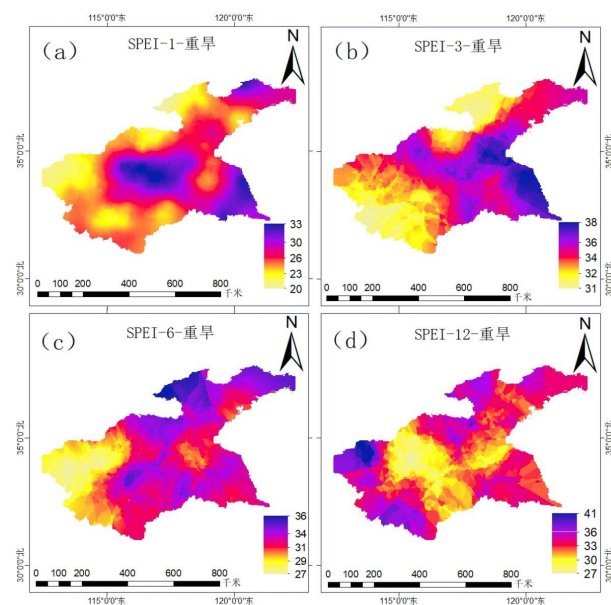


Figure 12. The total frequency map of severe drought events at different time scales of SPEI in the Huaihe River Basin
图 12. 淮河流域 SPEI 各时间尺度重旱事件频次分布图

SPI 统计的淮河流域重旱频次在 1960~2012 年均发生 34 次左右, 即 0.6 次/年(图 11), SPEI 统计的淮河流域重旱频次在 1960~2012 年均发生 37 次左右, 即 0.7 次/年(图 12), 高于 SPI 统计结果。两图均表现了重旱事件频次随着时间尺度的增加而呈现上升趋势, 但在流域上, 干旱程度是整体呈现下降趋势, 且高值区多集中在流域西部, 中部为低值区, 同时 SPEI 各时间尺度重旱事件明显比 SPI 各时间尺度重旱事件的频次略高。从图 11(d)与图 12(d)两图中可以清晰看见共同高值区在西部, 而图 11(d)中北部与东南部小部分高值区在图 12(d)中成为了较高值区, 相同关系在图 11(b)与图 12(b)、图 11(c)与图 12(c)中也有所体现。可以认为在考虑蒸散发因素后, 干旱指数 SPEI 与干旱指数 SPI 在识别重旱时, SPEI 所识别出的流域整体的干旱程度比 SPI 所识别出的流域整体的干旱程度低。

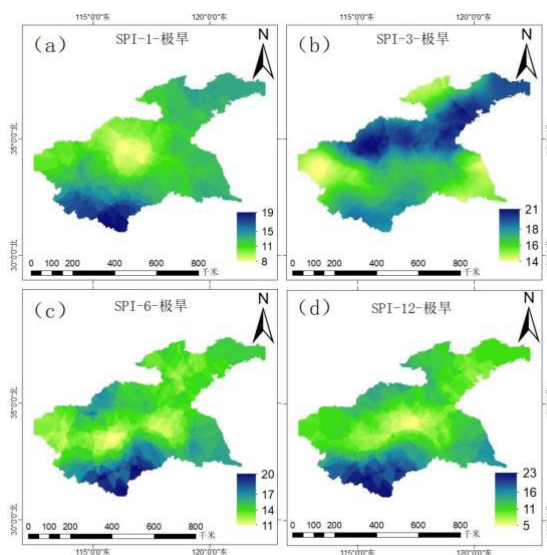


Figure 13. The total frequency map of extreme drought events at different time scales of SPI in the Huaihe River Basin
图 13. 淮河流域 SPI 各时间尺度极旱事件频次分布图

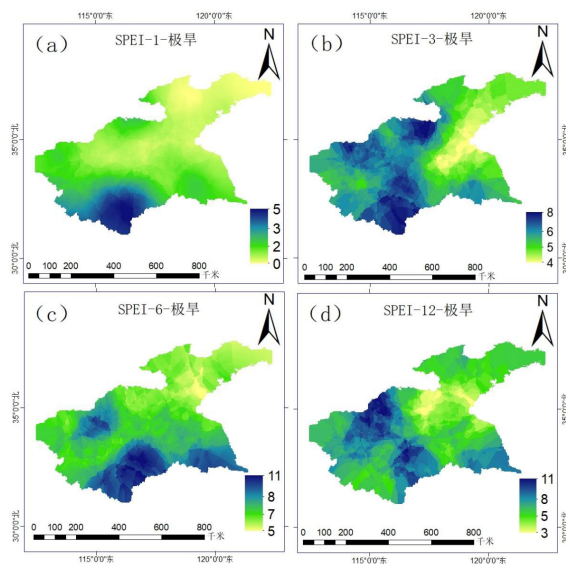


Figure 14. The total frequency map of extreme drought events at different time scales of SPEI in the Huaihe River Basin
图 14. SPEI 各时间尺度极旱事件频次分布图

SPI 统计的淮河流域极旱频次在 1960~2012 年均发生 21 次左右, 即 0.4 次/年(图 13)。SPEI 统计的淮河流域极旱事件频次在 1960~2012 年均发生 9 次左右, 即 0.2 次/年(图 14)。同时也可以看出根据时间尺度的增大, 极旱事件频次表现出上升的趋势, 且高值区集中于流域西南部地区。比较发现, 极旱事件频次上, SPEI 所识别出的极旱频次在同时间尺度上均比 SPI 识别出的极旱频次少, 这再次表明了考虑了蒸散发影响的干旱指数 SPEI 在识别干旱时, 表现出的干旱程度比干旱指数 SPI 低。其次频次分布上, SPI 高值区主要集中分布在流域南部, 而 SPEI 高值区主要集中分布在流域南部、中西部; SPI 的低值区主要分布于流域中部, 而 SPEI 的低值区主要分布在流域东北部。最后两幅图也都表现出, 随着时间尺度的增大, 极旱事件频次呈现出上升趋势。

3.2.4. 两种干旱指数的干旱风险对比分析

当 Z 的绝对值大于等于 2.32、1.64、1.28 时, 分别通过信度为 99%、95%、90% 的显著性试验, 且为正为上升趋势, 为负为下降趋势。

根据图 15, SPI 的重旱频次计算出的 Z 值均没有通过显著性试验, 而 SPEI 的重旱频次计算的 Z 值在高值区是通过信度 90% 的显著性试验。但两干旱指数均表现出在流域的西部、北部对于重旱事件频次呈现上升的趋势, 在流域中部、东南部对于重旱事件频次呈现下降的趋势。由于 SPEI 的 Z 值均相较于 SPI 的 Z 值偏大, 表明考虑了蒸散发影响的 SPEI 指数评价淮河流域时更倾向于干旱趋势。

根据图 16, 在淮河流域西部、中部、东南部、东北部, SPI 极旱的 Z 值为负值区, 呈现下降趋势; 而 SPEI 极旱的 Z 值与 SPI 表现相反, 且为 Z 值高值区, 极旱呈现较为明显的上升趋势。在流域南部, SPI 指数 Z 值高于 SPEI 指数 Z 值, 对极旱的评估偏严重; 在流域东北部, SPI 评估为不显著下降, SPEI 中为不显著上升, SPEI 对极旱的评估偏严重。总体来说, SPEI 指数在淮河流域的干湿特征评估中更倾向于干旱化形势。

结合图 15、图 16, 两干旱指数在各自的重旱 Z 值图、极旱 Z 值图中所表现的重旱事件、极旱事件的趋势中, SPI 在流域中部、东北部均呈现下降趋势, 流域西部、北部呈现上升趋势; SPEI 在流域北部、东北部呈上升趋势。说明流域西部和北部面临较为严峻的干旱风险。

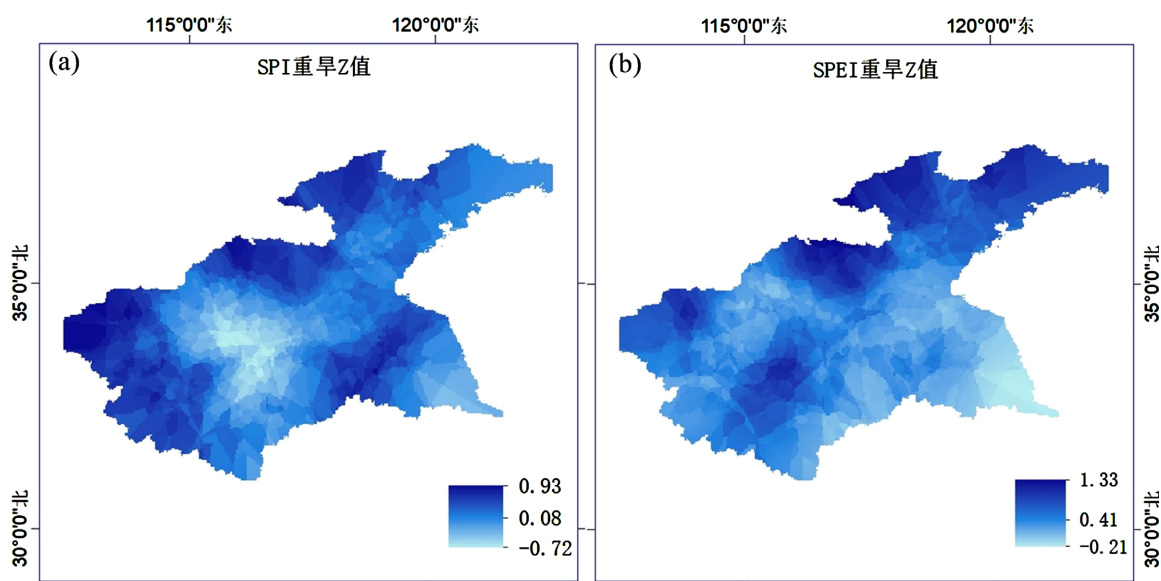


Figure 15. MK test Z-value chart for two index severe drought events

图 15. 两指数重旱事件 MK 检验 Z 值图

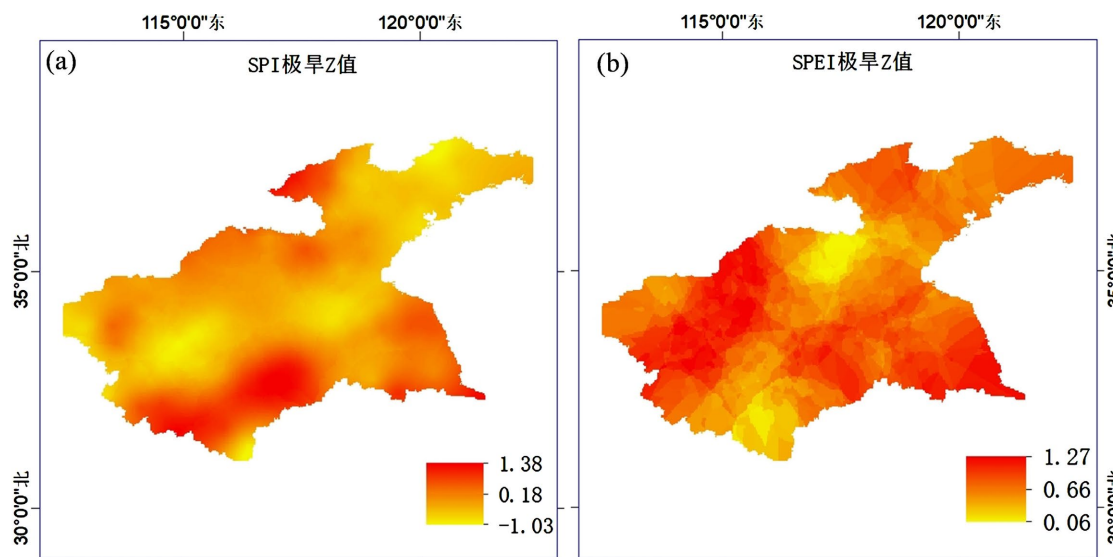


Figure 16. MK test Z-value chart for two index extreme drought events

图 16. 两指数极旱事件 MK 检验 Z 值图

4. 结论

本文选择标准化降水蒸散指数(SPEI)与标准化降水指数(SPI)作为干旱指标,对淮河流域的干旱特征变化进行分析,得到如下结论:

(1) 在时间尺度相同的情况下, SPEI 对重旱、极端干旱事件识别的频次较 SPI 少,但对轻旱、中旱的识别较 SPI 多,对涝事件的评估偏多。说明在相同尺度下,干旱指数 SPEI 对干旱的评估偏低,整体评估偏湿。

(2) 两种指数均表现出随着时间尺度的增大,振荡频率都有所下降,这显示淮河流域的干湿转变变化更为平缓,且从时间尺度为 12 个月的图来看,近年(2009 年~2012 年)都呈现着干旱的趋势。但从两指数对比发现, SPI 随着时间尺度的增大,振幅有明显的减小变化,而 SPEI 随着时间尺度的增大,振幅变化不明显,这说明 SPEI 对于评价淮河流域的干旱特征更为平稳。

(3) 对于洪涝事件:相同时间尺度上, SPEI 的洪涝事件频次比 SPI 的洪涝事件频次普遍偏高,但明显 SPI 各时间尺度洪涝事件频次分布所展现的区域性对比 SPEI 各时间尺度洪涝事件频次分布更为分散, SPEI 的洪涝事件区域性更为分明;对于轻旱事件: SPI 指数与 SPEI 指数所识别的轻旱事件频次分布大致相同,轻旱事件主要在中部、中西部和东北部。随着时间尺度的加大,轻旱高频次区逐渐集中至中西部以及东北部区域。淮河流域北部随着时间尺度的增加,从较高值区变为低值区,而中部、中西部水汽输送较少,频次分布变化相对稳定。表明水汽输送对干旱程度会产生很大影响,且 SPEI 对于干旱程度的识别较 SPI 指数轻;对于中旱事件:时间尺度为 1、6 个月时,两种指数的频次分布图比较契合。时间尺度为 3 个月时,中旱频次分布图在东北部与东南部差异较大,时间尺度为 12 个月时,中旱频次分布图在流域中西部有较大差异。这表明两种指数在影响干旱程度因素较少的地区识别程度大体相同,而在影响因素比较复杂的地区表现则有所不同;对于重旱事件:两指数均表现了重旱事件频次随着时间尺度的增加而呈现上升趋势,但在流域上干旱程度是整体呈现下降趋势。同时 SPEI 各时间尺度重旱事件明显比 SPI 各时间尺度重旱事件的频次略高。但对比两指数各时间尺度重旱频次图后,可以认为在考虑蒸散发因素后,两指数在识别重旱时, SPEI 所识别出的流域整体的干旱程度比 SPI 所识别出的流域整体的干旱程度低;对于极旱事件:根据时间尺度的增大,极旱事件频次表现出上升的趋势。SPEI 所识别出的极旱频次

在同一时间尺度上均比 SPI 识别出的极旱频次少, 这再次表明 SPEI 在识别干旱出的干旱程度比干旱指数 SPI 低。频次分布上, SPI 高值区主要在流域南部, 而 SPEI 高值区主要在流域南部、中西部; SPI 的低值区主要在流域中部, SPEI 的低值区主要在流域东北部。两指数也都表现出, 随着时间尺度增大, 极旱事件频次呈现出上升趋势。

(4) 两干旱指数在各自的重旱 Z 值图、极旱 Z 值图所示表现的重旱事件、极旱事件的趋势中, SPI 在流域中部、东北部均呈现下降趋势, 流域西部、北部呈现上升趋势; SPEI 在流域北部、东北部呈上升趋势。说明流域西部和北部面临较为严峻的干旱风险。对于 Z 值, SPEI 普遍比 SPI 高, 这表明在干旱趋势上, SPEI 指数比 SPI 指数更倾向干旱趋势[17]。证明考虑蒸散发对于干旱特征分析的重要性[18]。

由于淮河流域处于我国一个气象条件复杂多变的地区, 而且紧密联系着经济与人口的发展, 但许多研究结果并不一致, 有淮河流域未来时段的降雨、气温和蒸发量均比历史观测值有所上升[19]; 也有水文极值方面十年以下呈现下降趋势, 十年以上呈现上升趋势[20]。很难得到一个统一的结论, 这就要求要努力发展研究手段, 更好地模拟实时情况, 对灾害要做到更精准的提前预测与防治, 对水量情况、气象情况等有更深入的了解并进行实时监测[21], 以达到对洪旱灾害的监测, 帮助提高对灾害的预见性, 提高对灾害的防御与防治, 减少更多的生命财产损失, 同时为水资源生产利用活动提供更好的理论依据[22][23]。

参考文献

- [1] 方国华, 涂玉虹, 闻昕, 等. 1961-2015 年淮河流域气象干旱发展过程和演变特征研究[J]. 水利学报, 2019, 50(5): 598-611.
- [2] 郑远长. 全球自然灾害概述[J]. 中国减灾, 2000, 10(1): 14-19.
- [3] 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.
- [4] Keyantash, J.A. and Dracup, J.A. (2004) An Aggregate Drought Index: Assessing Drought Severity Based on Fluctuations in the Hydrologic Cycle and Surface Water Storage. *Water Resources Research*, **40**, W09304. <https://doi.org/10.1029/2003wr002610>
- [5] 罗漫雅, 耿广坡, 周洪奎, 等. 常用气象干旱指数 SPEI 和 SPI 在陕北地区的适用性研究[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(21): 42-50.
- [6] 容锦盟, 周丹, 罗静, 等. 4 种干旱指标在华北地区气象干旱监测中的适用性分析[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(1): 259-267.
- [7] 陈丽, 徐长春, 孙琪, 等. 典型干旱指数在干旱内陆河流域的适用性分析[J]. 江西农业学报, 2021, 33(8): 71-77.
- [8] 郑金丽, 严子奇, 周祖昊, 等. 基于综合干旱指数的鄱阳湖流域干旱时空分异特征研究[J]. 水利水电技术, 2021, 52(8): 91-100.
- [9] 张俊, 陈桂亚, 杨文发. 国内外干旱研究进展综述[J]. 人民长江, 2011, 42(10): 65-69.
- [10] 张强, 姚玉璧, 李耀辉, 等. 中国西北地区干旱气象灾害监测预警与减灾技术研究进展及其展望[J]. 地球科学进展, 2015, 30(2): 196-213.
- [11] Fu, R., Chen, R., Wang, C., Chen, X., Gu, H., Wang, C., *et al.* (2022) Generating High-Resolution and Long-Term SPEI Dataset over Southwest China through Downscaling EEAD Product by Machine Learning. *Remote Sensing*, **14**, Article 1662. <https://doi.org/10.3390/rs14071662>
- [12] Shrivastava, S., Kiran, R.U., Bal, P.K. and Singh, K.K. (2022) Estimation of the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) Using a Multilayer Perceptron Artificial Neural Network Model for Central India. *Pure and Applied Geophysics*, **179**, 1461-1473. <https://doi.org/10.1007/s00024-022-02969-2>
- [13] Yao, N., Li, Y., Liu, Q., Zhang, S., Chen, X., Ji, Y., *et al.* (2022) Response of Wheat and Maize Growth-Yields to Meteorological and Agricultural Droughts Based on Standardized Precipitation Evapotranspiration Indexes and Soil Moisture Deficit Indexes. *Agricultural Water Management*, **266**, Article ID: 107566. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107566>
- [14] 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>

- [15] 朱昊宇, 姬钰. 2011-2020 年淮河流域水资源变化特征研究[J]. 水利技术监督, 2022(3): 162-165, 173.
- [16] 姜健俊, 万瑞容, 牛战富. 淮河流域主要社会经济指标统计分析研究[J]. 治淮, 2022(1): 34-36.
- [17] 林慧, 王景才, 黄金柏, 蒋陈娟. 基于 SPI 和 SPEI 的淮河中上游流域气象干旱时空分布特征对比研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(6): 59-67.
- [18] 林慧. 基于 CMIP6 模式的淮河中上游流域气象干旱特征及演变趋势研究[D]: [硕士学位论文]. 扬州: 扬州大学, 2021.
- [19] 黎敏, 吕海深, 欧阳芬. 基于 Delta 方法的淮河流域气候变化预测分析[J]. 人民长江, 2012, 43(7): 11-14, 46.
- [20] 杨赤, 刘志雨, 李洋. 淮河流域水文极值预测模型研究[J]. 气候变化研究进展, 2015, 11(1): 22-30.
- [21] 董晓华, 张庆玉, 张特, 喻丹, 刘冀, 魏冲. 三种长期定量降水产品在淮河流域干旱监测中的潜力[J]. 农业工程学报, 2021, 37(11): 93-103.
- [22] Huang, Z.Y. and Hu, J.J. (2022) Study of the Spatial and Temporal Patterns of the Water Footprint of Grain Production in the Huaihe River Basin. *Scientific Journal of Intelligent Systems Research*, **4**.
- [23] Fang, G., Li, X., Xu, M., Wen, X. and Huang, X. (2021) Spatiotemporal Variability of Drought and Its Multi-Scale Linkages with Climate Indices in the Huaihe River Basin, Central China and East China. *Atmosphere*, **12**, Article 1446. <https://doi.org/10.3390/atmos12111446>