

Characteristics of Drought Variations in Hanjiang Basin in 1961-2014 Based on SPI/SPEI

Xin'e Tao, Hua Chen, Chongyu Xu

State Key Laboratory of Water Resources & Hydropower Engineering Science, Wuhan Hubei
Email: taoxine@126.com

Received: Sep. 10th, 2015; accepted: Sep. 25th, 2015; published: Oct. 9th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

To analyze the characteristics of drought variations in Hanjiang Basin, the standardized precipitation index (SPI) and the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) were calculated by using daily meteorological data (including precipitation, temperature, relative humidity, solar duration and wind speed) from 13 meteorological stations across Hanjiang Basin for 1961-2014. Results showed that: (1) in the past 54 years, the annual precipitation showed a non-significant downward trend, while the annual evapotranspiration presented a significant downward trend (-7.7 mm/10 a); the SPI index demonstrated a non-significant downward trend, and the SPEI index with a non-significant upward trend; (2) SPI values with 1-month scale had a larger fluctuation range than SPEI values, and the SPI/SPEI drought duration extended as the time scale prolong; (3) over 65% of the basin was drought-free in 1961-2014, and the drought-free cumulative probability decreased as time scale extended; (4) the driest year in Hanjiang Basin was 1966, with higher drought grade in southeast region than in northwest region overall, while the 1983 was the wettest year, with SPI/SPEI values decreased and then increased from northwest to southeast. When describing the drought grade at each station, drought grades based on SPEI were higher than SPI as a whole in the driest year, while drought grades based on SPI and SPEI were basically consistent in the wettest year in Hanjiang Basin.

Keywords

Drought Variations, SPI, SPEI, Hanjiang Basin

基于SPI/SPEI指数的汉江流域 1961~2014年干旱变化特征分析

陶新娥, 陈 华, 许崇育

作者简介: 陶新娥 (1991-), 女, 湖北武汉人, 硕士研究生, 主要从事流域水资源管理研究。

文章引用: 陶新娥, 陈华, 许崇育. 基于 SPI/SPEI 指数的汉江流域 1961~2014 年干旱变化特征分析[J]. 水资源研究, 2015, 4(5): 404-415. <http://dx.doi.org/10.12677/jwrr.2015.45050>

武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉
Email: taoxine@126.com

收稿日期: 2015年9月10日; 录用日期: 2015年9月25日; 发布日期: 2015年10月9日

摘要

本文采用汉江流域13个气象站1961~2014年逐日气象数据(降雨、温度、相对湿度、日照时数和风速), 利用标准化降水指数(SPI)和标准化降水蒸散指数(SPEI)两个干旱指标, 分析了1961~2014年汉江流域的干旱变化特征。结果表明: (1) 近54年来, 汉江流域年降水量呈不显著下降趋势, 年参照蒸发量呈显著减少趋势(-7.7 mm/10 a), SPI指数总体上呈不显著下降趋势, 而SPEI指数呈不显著上升趋势; (2) 1个月尺度的SPI指数的正负波动范围较SPEI大, 随着时间尺度延长, SPI/SPEI发生干旱的持续时间增长, 旱涝变化趋于稳定; (3) 流域无旱的累积概率超过65%, 随时间尺度延长无旱发生的概率逐渐降低; (4) 流域最干旱的年份为1966年, 最干旱年东南地区的干旱等级整体上比西北地区高, 最湿润年为1983年, SPI/SPEI由西北向东南均呈现先减小再增大的趋势; 在描述各站点干旱等级时, 最干旱年SPEI描述的流域干旱等级整体上高于SPI, 最湿润年SPI和SPEI描述的旱涝等级基本一致。

关键词

干旱变化, 标准化降水指数, 标准化降水蒸发指数, 汉江流域

1. 引言

近几十年来, 随着全球气候的持续变暖, 极端天气气候事件的发生频率和强度都有增加的趋势, 其中干旱事件的发生频率也呈现明显上升的趋势。干旱是一种发生频率高、持续时间长、影响范围广的自然灾害[1], 长期困扰着工农业生产, 造成水资源短缺、生态与环境恶化等不利影响。随着经济发展和人口膨胀, 水资源短缺现象日趋严重, 这也直接导致了干旱地区的扩大与干旱化程度的加重[2]。据统计, 20世纪后50年中国受旱面积和受旱成灾面积呈上升趋势, 各年代旱灾成灾率也呈上升趋势[3]。美国气象学会将干旱的定义划分为四种: 气象干旱、水文干旱、农业干旱和社会经济干旱, 其中气象干旱表现为降水减少或无降水, 其他三种干旱成因的形成都与气象干旱有一定关系[1][4]。

干旱指数是研究干旱气候的基础, 也是衡量干旱程度的标准和关键环节[5]。根据建立途径的不同可把干旱指数分为两类: 一类是通过研究干旱机理, 力图细致地反映干旱涉及的各个物理过程, 以提高对干旱强度和持续时间的反应精度; 第二类: 通过气象学方法, 研究降水量的统计分布规律, 以反映干旱的强度和持续时间。第二类指标计算简单, 所需资料容易获取, 而且由于指标不涉及具体的干旱机理, 时空适应性较强, 代表性指标是Mckee [6]等提出的标准化降水指数SPI (Standard Precipitation Index)。袁文平和周广胜[7]利用分布在中国不同气候区的7个气象站1951~1995年的月降水资料, 比较分析了SPI和在中国已成熟应用的Z指数。结果表明, SPI计算结果与Z指数有极好的一致性。同时, 由于SPI是通过概率密度函数求解累积概率, 再将累积概率标准化而得, 具有稳定的计算特性, 消除了降水的时空分布差异, 在各个区域和各个时段均能有效地反映旱涝状况, 优于在我国广泛应用的Z指数。

Vicente-Serrano [8]等于2010年提出了标准化降水蒸散指数SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index), 该指数基于降水和蒸散两种变量, 考虑了水分平衡对干旱的影响, 具有对温度敏感的特点, 又具备SPI计算简单、适合多尺度、多空间比较的优点[9], 是分析干旱演变趋势的理想指标。李伟光[10]等应用SPEI

指数分析了中国 1951~2009 年干旱趋势,得出的结果与应用其他干旱指数得出的结果一致。庄少伟[11]基于 SPEI 指数分析中国区域干旱化特征,认为 SPEI 在干旱区和湿润区均能充分反映增温引起的干旱程度的变化,并可作为监测指数识别干旱是否发生或结束,能较准确地表征干旱状况。

在计算 SPEI 指数时,需先计算蒸发量,已有研究[5] [10] [11]中采用的是 Vicente-Serrano [8]推荐的 Thornthwaite 方法来计算蒸发量,该方法仅考虑了温度要素,而忽略了其它气象要素如湿度、日照和风速等对蒸发量的影响,在气候变化的情景下,不能客观反映参照蒸发量随时间的变化趋势,从而影响了 SPEI 指数随时间变化趋势的分析。本文在计算 SPEI 指数中所需蒸发项时,采用 FAO 推荐的 Penman-Monteith 方法,该方法较为全面的考虑温度、湿度、日照和风速等气象要素,且其准确性和可靠性已得到广泛的验证[12]。本文基于 SPI 指数和 SPEI 指数,分析汉江流域不同时间尺度的 SPI/SPEI 规律, SPI/SPEI 指数的长期变化趋势和空间变化规律,从而研究汉江流域干旱变化特征,同时对比 SPI 指数和 SPEI 指数在分析流域干旱时的差异。

2. 研究区域及数据

汉江流域发源于陕西省汉中市嶓冢山,沿途流经鄂、陕、豫、川、渝、甘 6 省市,位于东经 106°12'~114°14', 北纬 30°08'~34°11', 干流全长 1577 km, 流域面积 15.9 万 km²。流域属于亚热带季风区,年降水量 873 mm,水量较充沛,年平均气温 15℃~17℃。

研究资料采用汉江流域 14 个气象站点 1961~2014 年逐日降雨资料,数据来源于中国气象数据共享服务网(图 1)。

3. 研究方法

3.1. SPI 指标

由于不同时间、不同地区降水量变化幅度很大,直接用降水量很难在不同时空尺度上相互比较,而且降水分布是一种偏态分布,不是正态分布,所以在降水分析中,采用 Γ 分布概率来描述降水量的变化,然后再经正

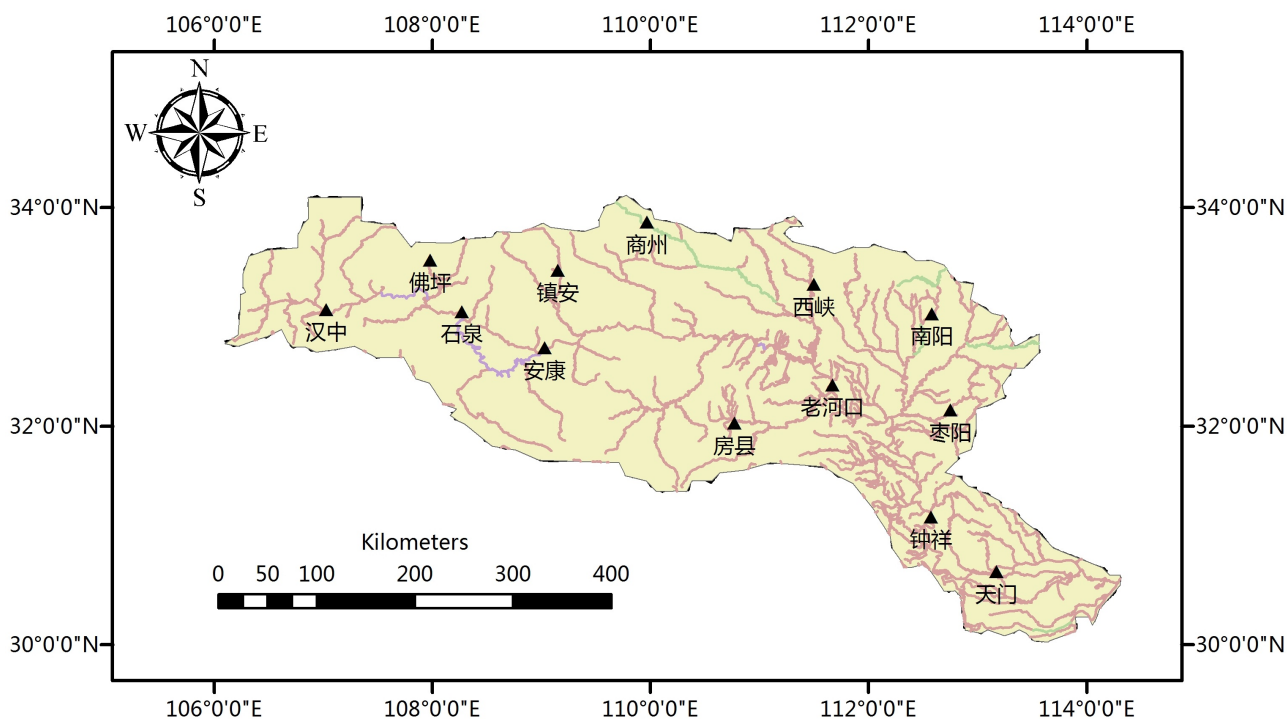


Figure 1. Locations of meteorological stations in the Hanjiang Basin

图 1. 汉江流域气象站点分布图

态标准化求得 SPI 值[7]。

假设某一时段的降水量为 x ，则其 Γ 分布的概率密度函数为：

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} \quad (x > 0) \quad (1)$$

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty x^{\alpha-1} e^{-x} dx \quad (2)$$

式中， α 为形状参数， β 为尺度参数， x 为降水量， $\Gamma(\alpha)$ 是 gamma 函数。最佳的 α 、 β 估计值可采用极大似然估计方法求得，即

$$\hat{\alpha} = \frac{1 + \sqrt{1 + 4A/3}}{4A} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\hat{\alpha}} \quad (4)$$

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(\bar{x})}{n} \quad (5)$$

式中， n 为计算序列的长度。于是，给定时间尺度的累积概率可计算如下：

$$G(x) = \int_0^x g(x) dx = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\hat{\alpha})} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} dx \quad (6)$$

令 $t = \bar{x}/\hat{\beta}$

上式可变为不完全的 gamma 方程：

$$G(x) = \frac{1}{\Gamma(\hat{\alpha})} \int_0^x t^{\hat{\alpha}-1} e^{-t/\beta} dt \quad (7)$$

由于 gamma 方程不包含 $x=0$ 的情况，而实降水量可以为 0，所以累积概率表示为：

$$H(x) = q + (1-q)G(x) \quad (8)$$

式中， q 是降水量为 0 的概率。如果 m 表示降水时间序列中降水量为 0 的数量，则 $q = m/n$ 。累积概率 $H(x)$ 可以通过下式转换为标准正态分布函数。

当 $0 < H(x) \leq 0.5$ 时：

$$Z = SPI = - \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 - d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \quad (9)$$

$$t = \sqrt{\ln \left[\frac{1}{H(x)^2} \right]} \quad (10)$$

当 $0.5 < H(x) \leq 1$ 时：

$$Z = SPI = \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 - d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \quad (11)$$

$$t = \sqrt{\ln \left\{ \frac{1}{[1.0 - H(x)]^2} \right\}} \quad (12)$$

3.2. SPEI 指标

SPEI 计算方法类似于 SPI，原理是用降水量减去蒸散量的插值偏离平均状态的程度来表征某地区的干旱。该指标的计算方法是首先计算潜在蒸散，Vicente-Serrano [8]采用的是 Thornthwaite 方法，本文采用 FAO 推荐的 Penman-Monteith 方法，再通过降水与蒸散的插值的分布概率密度函数(3 参数的 log-logistic)求累积概率，然后转化成标准正态分布而得到。正态分布标准化处理能够消除时空分布上的差异，使 SPEI 能够使用于反映不同地区、不同时间尺度的旱涝情况[13]。具体计算步骤如下：

第一步，计算潜在蒸散量。本次计算采用的是 Penman-Monteith 方法[12]：

$$PET = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{273 + T} \cdot u_2 \cdot (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 \cdot u_2)} \quad (13)$$

式中：PET 为潜在蒸散量，mm/d；T 为平均气温，℃；Δ 为温度 - 饱和水汽压关系曲线上在 T 处的切线斜率，kPa/℃；R_n 为净辐射，MJ/m²·d；G 为土壤热通量，MJ/m²·d；γ 为湿度表常数，kPa/℃；u₂ 为距离地面 2 m 高处风速，m/s；e_a 为饱和水汽压，kPa；e_d 为实际水汽压，kPa；

第二步，计算不同时间尺度下的降水与蒸散量的插值 D_i：

$$D_i = P_i - PET_i \quad (14)$$

式中，P_i 为降水量；k 为时间尺度；n 为时间单位数；

第三步，对降水蒸散差值 D_i 序列标准化，计算每个数值对应的 SPEI 指数。由于原始数据序列 D_i 中可能存在负值，所以 SPEI 指数采用了 3 个参数的 log-logistic 概率分布。log-logistic 概率分布的累积函数为：

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x - \gamma} \right)^\beta \right]^{-1} \quad (15)$$

式中，参数 α、β、γ 分别为尺度参数、形状参数以及原始参数，采用线性矩的方法拟合获得。

然后对累积概率密度进行标准化，可以计算出 SPEI：

$$SPEI = w - \frac{c_0 + c_1 w + c_2 w^2}{1 - d_1 w + d_2 w^2 + d_3 w^3} \quad (16)$$

$$w = \sqrt{-2 \ln(P)} \quad (17)$$

式中，P ≤ 0.5，P 为某确定 D 值被超越的概率，P = 1 - F(x)，当 P > 0.5 时，由 1 - P 代替，同时 SPEI 变换符号。

由于 SPEI 计算原理与 SPI 类似，故 SPEI 采用与 SPI 相同的等级标准[14]，见表 1。

Table 1. The standard drought grade division
表 1. 干旱等级划分标准

| 干旱等级 | 类型 | SPI | SPEI |
|------|----|-------------------|--------------------|
| 0 | 无旱 | -0.5 < SPI | -0.5 < SPEI |
| 1 | 轻旱 | -1.0 < SPI ≤ -0.5 | -1.0 < SPEI ≤ -0.5 |
| 2 | 中旱 | -1.5 < SPI ≤ -1.0 | -1.5 < SPEI ≤ -1.0 |
| 3 | 重旱 | -2.0 < SPI ≤ -1.5 | -2.0 < SPEI ≤ -1.5 |
| 4 | 特旱 | SPI ≤ -2.0 | SPEI ≤ -2.0 |

4. 结果与分析

4.1. 汉江流域年降水量和蒸发量特征分析

汉江流域 1961~2014 年流域面平均降水量和参照蒸发量的变化趋势分别如图 2 和图 3 所示。由图 2, 1961~2014 年汉江流域历年降水量在 581.9~1221.3 mm 之间, 年降水量最大值和最小值分别出现在 1966 年和 1983 年, 年降水量极值相差达 639.3 mm, 年际变化明显。汉江流域历年平均降水量为 859.6 mm, 近 54 年来, 汉江流域年降水量呈下降趋势, 减少速率为 7.3 mm/10 年, 没有通过 95% 的置信度检验。

根据图 3, 1961 年~2014 年汉江流域历年参照蒸散量在 824.3~1089.1 mm 之间, 年参照蒸发量的最大值和最小值分别出现在 1966 年和 1989 年, 年参照蒸散量极值相差 264.8 mm, 流域历年平均参照蒸散量为 967.0 mm。1961~2014 年间, 汉江流域年参照蒸散量呈显著减少趋势(显著性水平 $\alpha = 0.10$), 参照蒸散量减少速率为 7.7 mm/10 年。

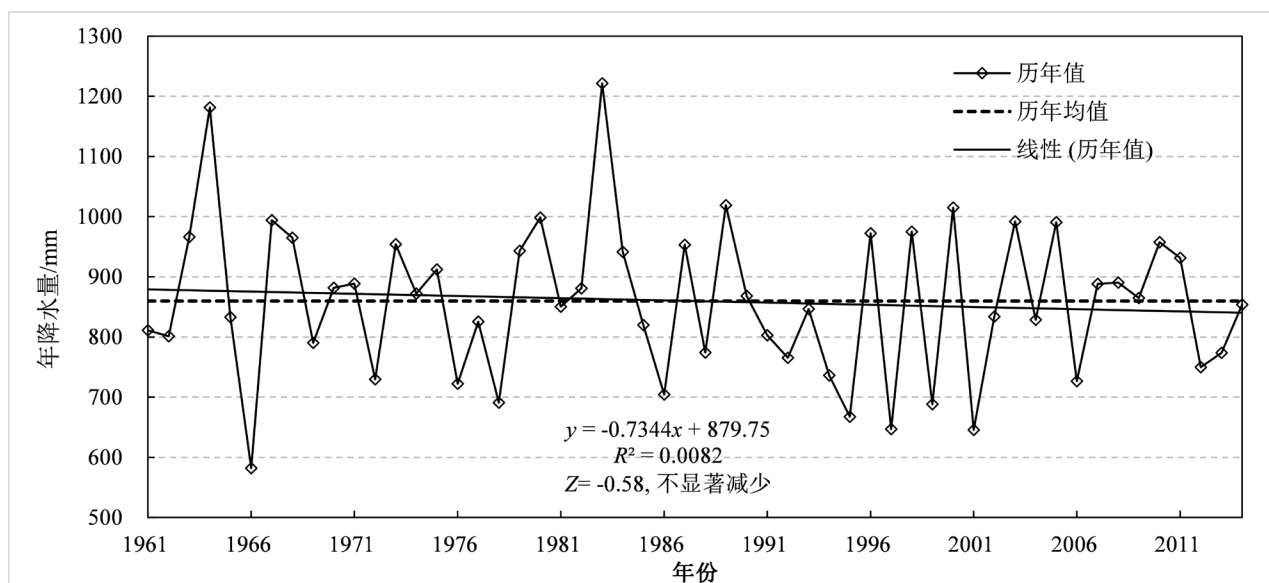


Figure 2. Annual precipitation from 1961 to 2014 in Hanjiang Basin

图 2. 汉江流域 1961 年~2014 年历年降水量

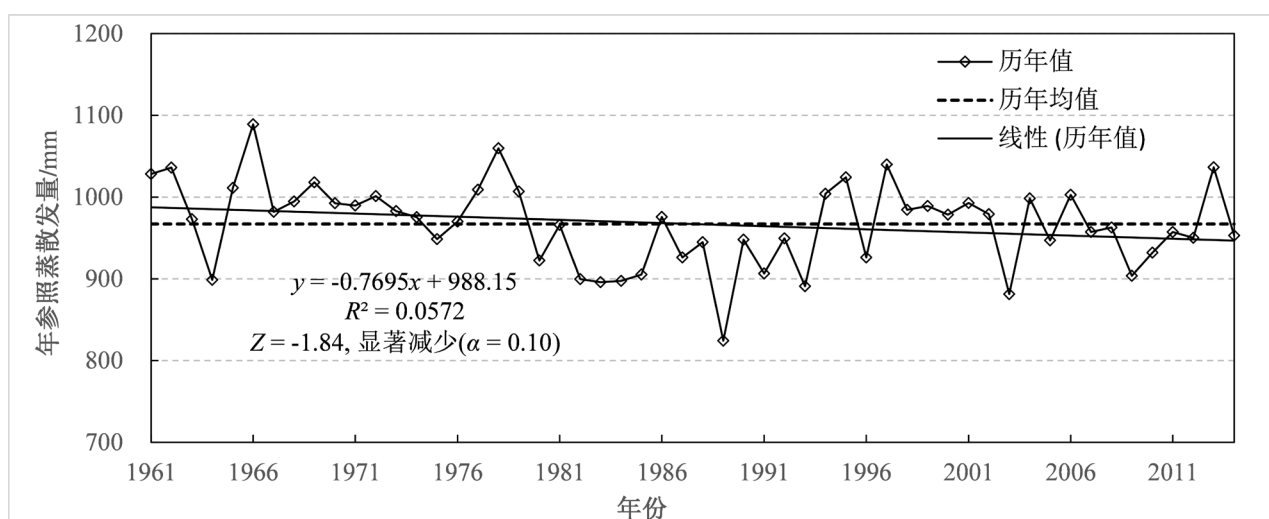


Figure 3. Annual evapotranspiration from 1961 to 2014 in Hanjiang Basin

图 3. 汉江流域 1961 年~2014 年历年参照蒸发量

4.2. 汉江流域不同时间尺度的 SPI/SPEI 规律分析

不同时间尺度的 SPI/SPEI 可用于不同类型干旱的监测评估,多种时间尺度的 SPI/SPEI 综合应用可实现对旱涝的综合检测评估。以汉江流域为例,比较 1961~2014 年汉江流域不同时间尺度 SPI/SPEI 的变化规律。图 4 给出了 1961~2014 年汉江流域不同时间尺度(1 个月,3 个月,6 个月和 12 个月)的 SPI/SPEI 变化过程;根据图 4,表 2 列出了汉江流部分旱涝时间及相应的 1 个月尺度 SPI/SPEI 指数;

根据图 4,1 个月尺度的旱涝指数 SPI/SPEI 沿着 0 值上下剧烈波动,且 SPI 指数的正负波动范围较 SPEI 大,如 1 个月时间尺度 SPI 指数的最大值为 3.23,发生在 1983 年 10 月,最小值为-3.59,发生在 1963 年 1 月;而 SPEI 指数的最大值为 2.58 发生于 1983 年 10 月,最小值为-2.90,发生于 1979 年 10 月,其次为 1963 年 1 月,值为-2.77。随时间尺度的增加,SPI 指数的正负波动范围较 SPEI 指数波动范围大的情况依然存在。综合分析 1 个月尺度的 SPI 指数和 SPEI 指数的计算结果,汉江流域旱 1961~2014 年旱涝特征非常明显的月份如下表 2 所列。3 个月尺度的旱涝指数 SPI/SPEI 可以反映季节干旱,与 1 个月尺度 SPI/SPEI 指数相比,3 个月尺度的旱涝指数

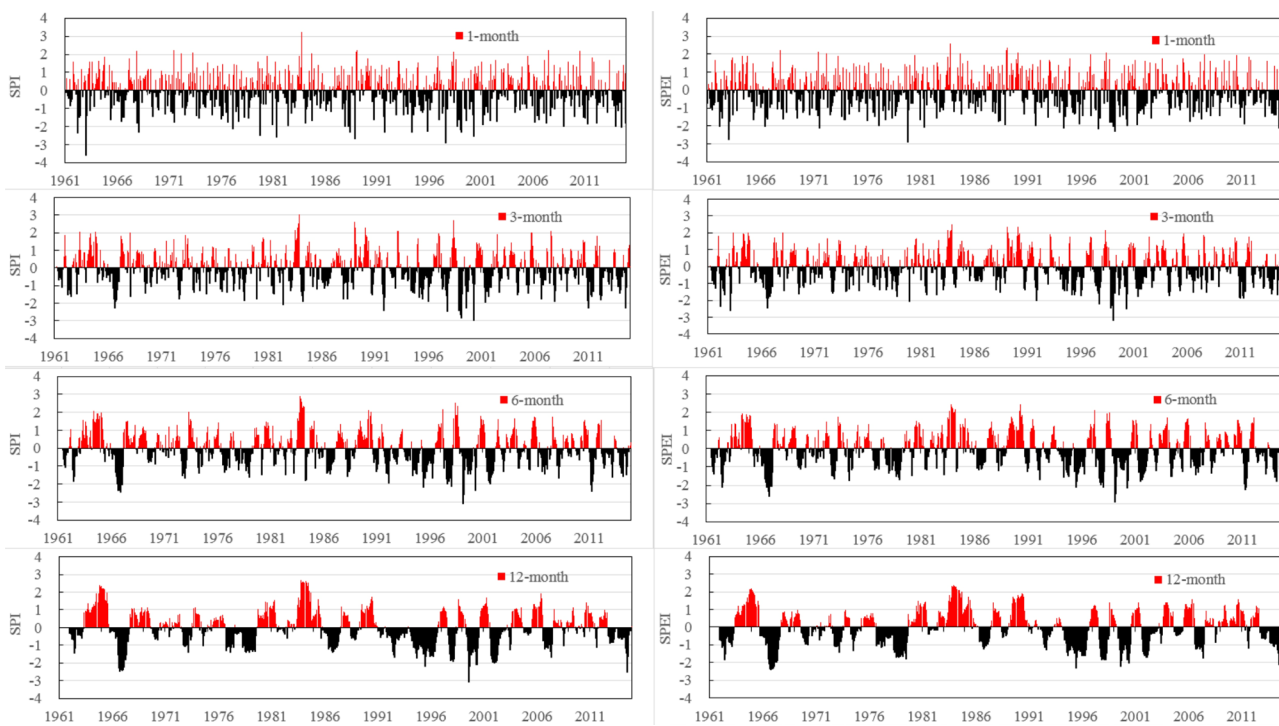


Figure 4. SPI/SPEI values with 1-month, 3-month, 6-month and 12-month scales in Hanjiang Basin
图 4. 1961~2014 年汉江流域 1 个月,3 个月,6 个月和 12 个月尺度的 SPI/SPEI 变化过程

Table 2. The time list and SPI/SPEI values of part of the drought and flood in Hanjiang Basin in 1961-2014
表 2. 1961~2014 年汉江流域部分旱涝月份列表及相应 SPI/SPEI 指数(1 个月尺度)

| 旱 | | | 涝 | | |
|-------------|-------|-------|-------------|------|------|
| 时间 | SPI | SPEI | 时间 | SPI | SPEI |
| 1963 年 01 月 | -3.59 | -2.77 | 1967 年 11 月 | 2.19 | 2.23 |
| 1979 年 10 月 | -2.48 | -2.90 | 1971 年 06 月 | 2.24 | 2.12 |
| 1997 年 08 月 | -2.90 | -2.15 | 1983 年 10 月 | 3.23 | 2.58 |
| 2000 年 04 月 | -2.57 | -2.13 | 1989 年 02 月 | 2.23 | 2.35 |

SPI/SPEI 正负波动范围与 1 个月尺度类似, 正负波动次数比 1 个月尺度减少。随着时间尺度的延长, SPI/SPEI 发生干旱的持续时间增长, 6 个月和 12 个月尺度的 SPI/SPEI 旱涝变化比较稳定, 可以较清楚地反映长期的旱涝变化特征。可以看出, 1991 年至 2000 年汉江流域发生干旱的等级高, 持续时间长。

本文中 SPI/SPEI 指数和干旱程度按照表 1 标准进行划分, 表 3 统计了不同时间尺度 SPI 指数和 SPEI 指数描述的汉江流域不同等级干旱发生的概率。由表 3, 采用 1 个月至 12 个月时间尺度时, 汉江流域无旱的累积概率均超过 65%, 发生轻度干旱的累积概率为介于 13.68% 至 16.66% 之间, 特旱的累积概率最低, 均在 2.5% 以内。随时间尺度增加, 汉江流域无旱发生的概率逐渐降低, SPI 指数描述的各等级干旱发生概率逐渐增加, 而 SPEI 指数描述的不同等级干旱变化趋势不一致。

4.3. 汉江流域年 SPI/SPEI 长期变化趋势和空间变化规律

(1) 年 SPI/SPEI 长期变化趋势

图 5 和图 6 分别给出了汉江流域 SPI 指数和 SPEI 指数年际变化趋势及其 Mann-Kendall (M-K) 检验结果。综合分析标准化降水指数 SPI 指数和 SPEI 指数的计算结果可以看出, 汉江流域共有 6 个时段发生了连续干旱, 分别是 1961~1962, 1965~1966, 1976~1978, 1994~1995, 2001~2002, 2012~2013 年; 其中干旱最严重的年份为 1966 年(特旱), 1997 年(重旱), 2001 年(重旱)和 1995 年(重旱), 最湿润的 2 个年份为 1983 年和 1964 年。由 UF 曲线, 近 54 年汉江流域标准化降水指数 SPI 指数和 SPEI 指数均呈现出先下降后上升再下降再上升的复杂趋势, 但不论是上升还是下降趋势均未超过 0.05 的显著性水平临界线。而 1961~2014 年, 汉江流域 SPI 指数总体上呈不显著下降趋势, SPEI 指数总体上呈不显著上升趋势。在显著水平 0.05 的临界线内, SPI 指数及 SPEI 指数的 UF, UB 曲线交点较多。从 SPI 指数和 SPEI 指数的年际变化来看, 20 世纪 90 年代汉江流域发生等级较高干旱的年份较其余时段多。

(2) 年 SPI/SPEI 空间变化规律

由图 5 汉江流域 SPI 指数和 SPEI 指数的年际变化曲线可知, 汉江流域最干旱的年份为 1966 年(SPI 值为-2.43, SPEI 值为-2.34), 最湿润的年份为 1983 年(SPI 值为 2.58, SPEI 值为 2.36), 图 6 至图 9 分别为汉江流域最干旱年份(1966 年)和最湿润年份(1983 年) SPI 指数和 SPEI 指数的空间分布图, 颜色由浅至深表示干旱等级由低到高。

分析汉江流域最早年 SPI 指数(图 6)和 SPEI 指数(图 7)的空间分布情况可知, 1966 年汉江流域东南地区的干旱等级整体上比西北地区高, 且北部商州地区干旱等级最低(SPI 指数显示轻旱, SPEI 指数显示为中旱), 房县、老河口及钟祥等地区干旱等级最高(SPI 指数和 SPEI 指数均显示为特旱)。对比图 6 和图 7, 可知, SPEI 指数描述的最干旱年各站点的干旱等级整体上比 SPI 指数表征的干旱等级高。

根据图 8 和图 9, 分析汉江流域最湿润年 SPI 指数和 SPEI 指数的空间分布图, 可知流域东北方向南阳、老河口和枣阳地区发生轻涝; 流域西北地区(包括汉中、佛坪、石泉、镇安和商州)和东南地区(天门)发生特涝; SPI

Table 3. Probability of different drought grades described by SPI/SPEI at different time scales in Hanjiang Basin
表 3. 不同时间尺度 SPI 指数和 SPEI 指数描述的汉江流域不同等级干旱发生的概率

| 干旱等级 | 类型 | 1 个月尺度 | | 3 个月尺度 | | 6 个月尺度 | | 12 个月尺度 | |
|------|----|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| | | P _{SPI} (%) | P _{SPEI} (%) | P _{SPI} (%) | P _{SPEI} (%) | P _{SPI} (%) | P _{SPEI} (%) | P _{SPI} (%) | P _{SPEI} (%) |
| 0 | 无旱 | 71.05 | 67.33 | 69.34 | 67.75 | 68.36 | 67.27 | 67.30 | 66.98 |
| 1 | 轻旱 | 13.68 | 14.93 | 14.62 | 14.53 | 15.53 | 14.93 | 16.66 | 14.42 |
| 2 | 中旱 | 8.63 | 10.55 | 9.44 | 10.55 | 9.83 | 10.37 | 9.91 | 11.48 |
| 3 | 重旱 | 4.30 | 5.67 | 4.47 | 5.33 | 4.52 | 5.79 | 4.83 | 5.48 |
| 4 | 特旱 | 2.35 | 1.51 | 2.13 | 1.83 | 1.76 | 1.64 | 1.29 | 1.63 |

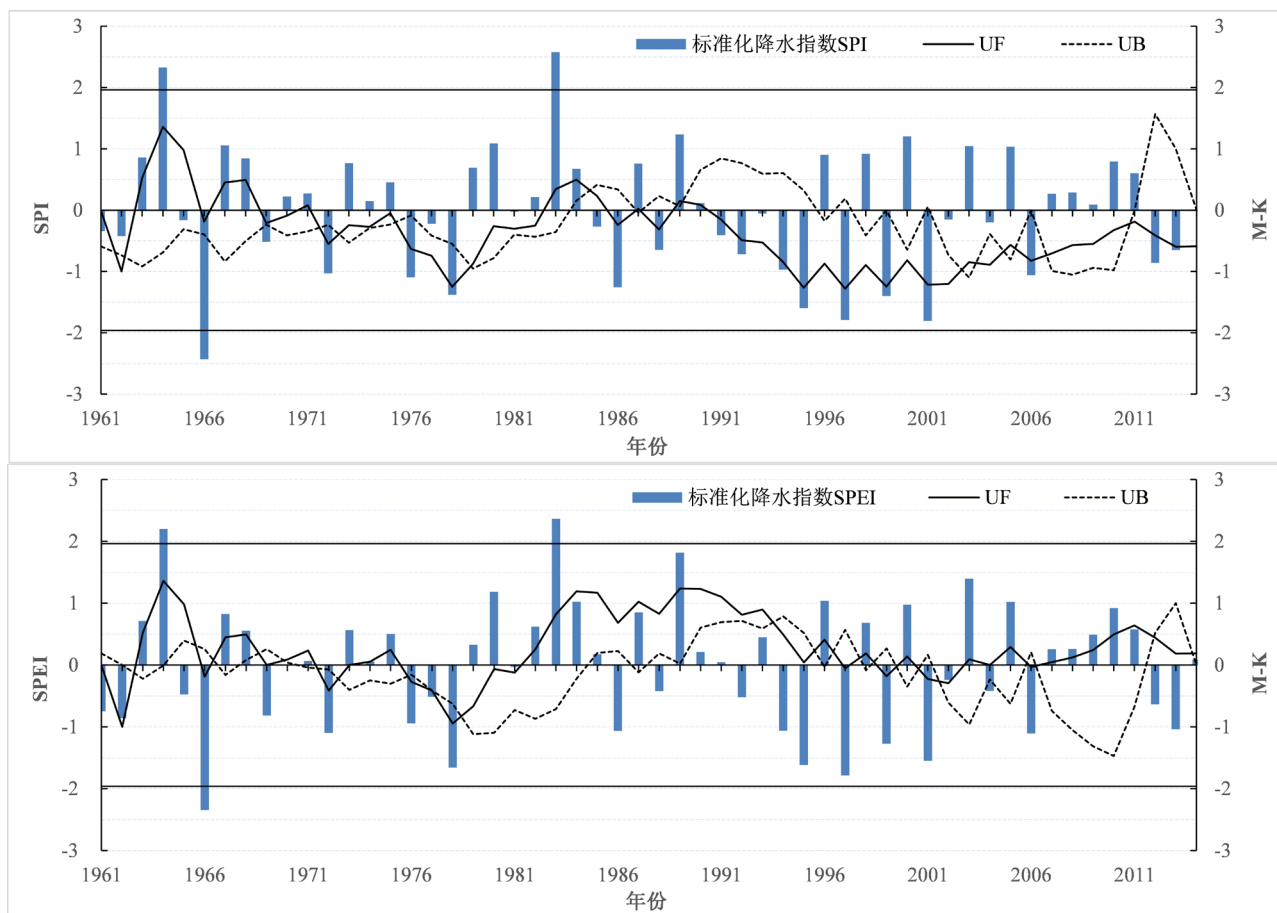


Figure 5. Interannual variations and mutation test of SPI/SPEI in Hanjiang Basin

图 5. 汉江流域 SPI 指数和 SPEI 指数年际变化及突变检验

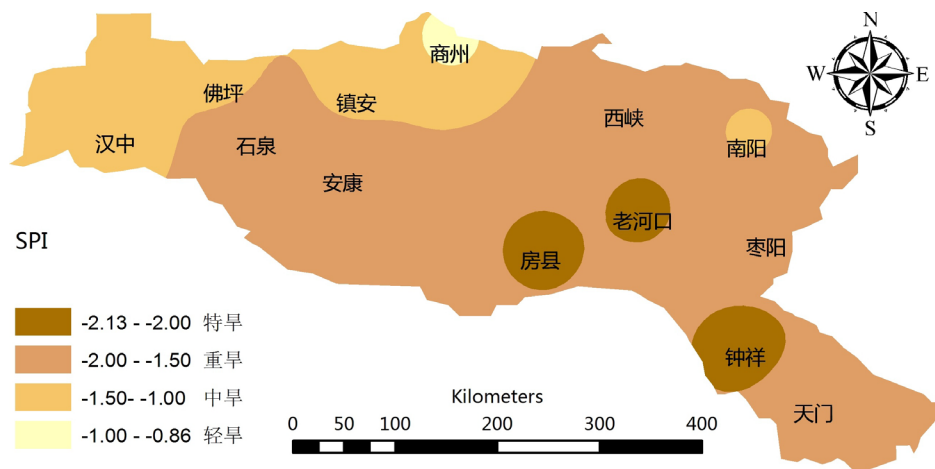


Figure 6. Spatial distribution of the SPI values in the driest year (1966) in Hanjiang Basin

图 6. 汉江流域最干旱年(1966 年) SPI 指数空间分布图

指数和 SPEI 指数由西北向东南均呈现先减小再增大的趋势，且由西北向东南由特涝到重涝到中涝到轻涝，再由轻涝转为中涝、重涝、特涝。对比图 8 和图 9 可以发现，在描述汉江流域各站点发生的洪涝等级时，SPI 指数和 SPEI 指数的表征的洪涝等级基本一致。

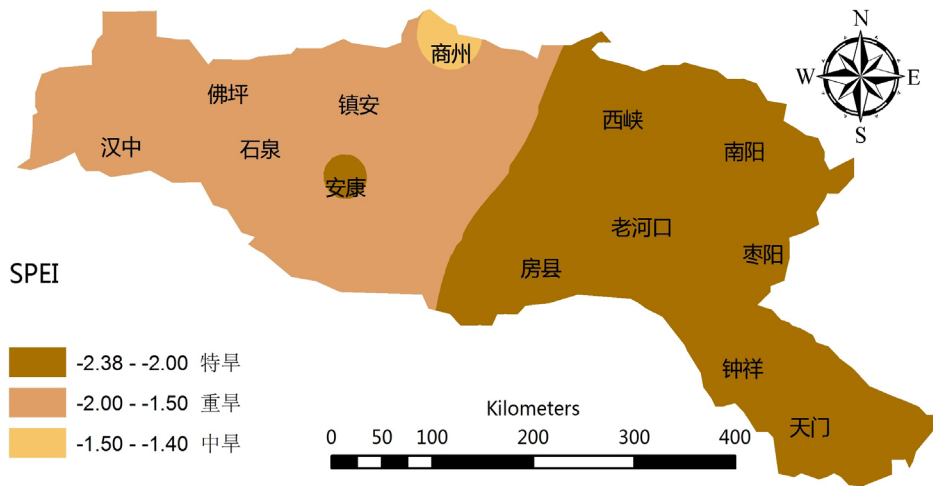


Figure 7. Spatial distribution of the SPEI values in the driest year (1966) in Hanjiang Basin
图 7. 汉江流域最干旱年(1966 年) SPEI 指数空间分布图

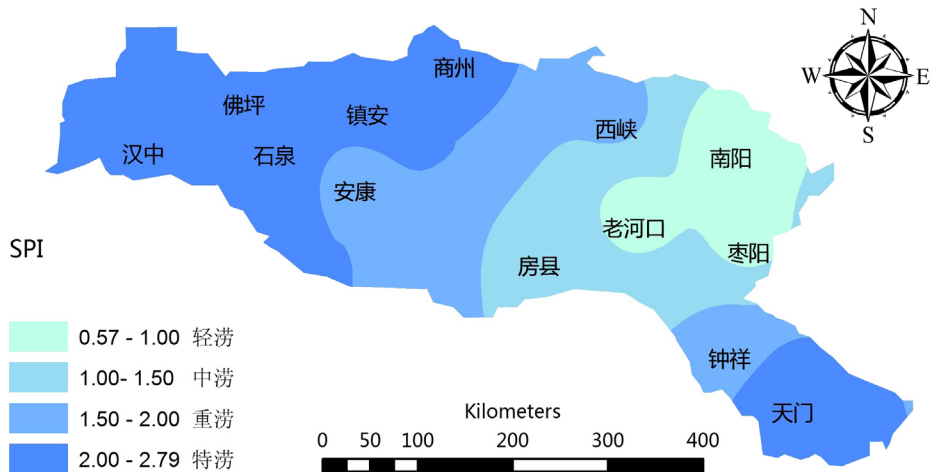


Figure 8. Spatial distribution of the SPI values in the wettest year (1983) in Hanjiang Basin
图 8. 汉江流域最湿润年(1983 年) SPI 指数空间分布图

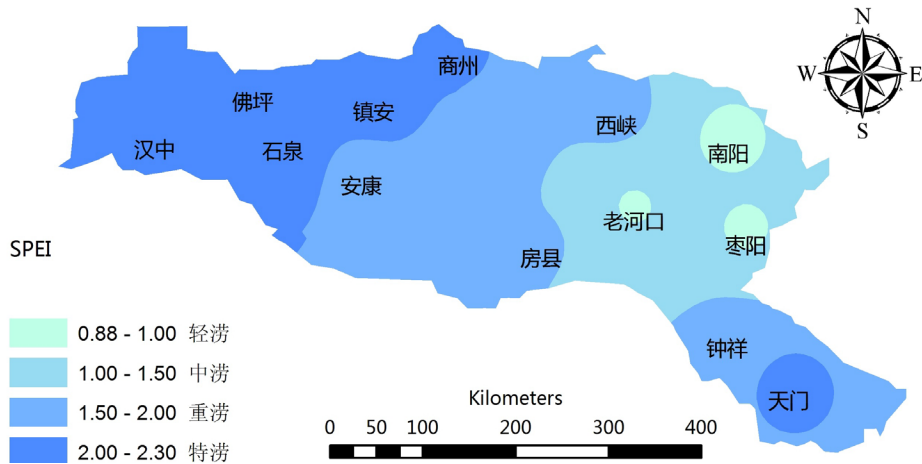


Figure 9. Spatial distribution of the SPEI values in the wettest year (1983) in Hanjiang Basin
图 9. 汉江流域最湿润年(1983 年) SPEI 指数空间分布图

5. 结论

本文采用汉江流域 13 个气象站 1961~2014 年逐日气象数据,利用标准化降水指数(SPI)和标准化降水蒸发指数(SPEI)两个干旱指标,分析 1961~2014 年汉江流域的干旱变化特征,包括流域不同时间尺度 SPI/SPEI 的规律,以及流域年 SPI/SPEI 的长期变化趋势和空间变化规律,得出以下结论:

(1) 近 54 年来,汉江流域历年降水量呈不显著下降趋势,历年参照蒸发量呈显著减少趋势($\alpha = 0.10$),减少速率为 7.7 mm/10 年;另外,1961~2014 年间流域 SPI 指数和 SPEI 指数均呈现出不显著的先下降后上升再下降再上升的复杂趋势,且总体上 SPI 指数呈不显著下降趋势,SPEI 指数呈不显著上升趋势。

(2) 1 个月尺度的旱涝指数 SPI/SPEI 沿着 0 值上下剧烈波动,且 SPI 指数的正负波动范围较 SPEI 大;3 个月尺度的旱涝指数 SPI/SPEI 正负波动范围与 1 个月尺度类似,正负波动次数比 1 个月尺度减少。随着时间尺度延长,发生干旱的持续时间增长,6 个月和 12 个月尺度的 SPI/SPEI 旱涝变化比较稳定,可以较清楚地反映长期的旱涝变化特征。1991 年至 2000 年汉江流域发生干旱的等级高,持续时间长。

(3) 采用不同时间尺度时(1, 3, 6, 12 个月),汉江流域无旱的累积概率均超过 65%。随时间尺度增加,流域无旱发生的概率逐渐降低,SPI 指数描述的各等级干旱发生概率逐渐增加,而 SPEI 指数描述的不同等级干旱变化趋势不一致。

(4) 流域最干旱的年份为 1966 年,最干旱年东南地区的干旱等级整体上比西北地区高,SPEI 指数描述的最干旱年各站点的干旱等级整体上比 SPI 指数表征的干旱等级高;最湿润的年份为 1983 年,最湿润年份的 SPI 指数和 SPEI 指数由西北向东南均呈现先减小再增大的趋势,而在描述汉江流域各站点发生的洪涝等级时,SPI 指数和 SPEI 指数的表征的洪涝等级基本一致。

基金项目

国家自然科学基金(51339004; 51279138)。

参考文献 (References)

- [1] 洪兴骏,郭生练,马鸿旭,刘德地. 基于 SPI 的鄱阳湖流域干旱时空演变特征及其与湖水位相关分析[J]. 水文, 2014, 34(2): 25-31.
HONG Xingjun, GUO Shenglian, MA Hongxu and LIU Dedi. Spatial and temporal analysis of drought and its relationship with water level of Poyang Lake. Journal of China Hydrology, 2014, 34(2): 25-31. (in Chinese)
- [2] 尹晗. 中国西南地区干旱气候特征及 2009~2012 年干旱分析[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.
YIN Han. Research on the characteristics of drought climate and (lie formation analysis for the extreme drought event from 2009 to 2012 in Southwest China. Lanzhou: Lanzhou University, 2013. (in Chinese)
- [3] 李茂松,李森,李育慧. 中国近 50 年旱灾灾情分析[J]. 中国农业气象, 2003, 24(1): 7-10.
LI Maosong, LI Sen and LI Yuhui. Studies on drought in the past 50 years in China. Chinese Journal of Agrometeorology, 2003, 24(1): 7-10. (in Chinese)
- [4] American Meteorological Society. Meteorological drought-policy statement. Bulletin of American Meteorological Society, 1997, 78: 847-849.
- [5] 王东,张勃,安美玲,等. 基于 SPEI 的西南地区近 53a 干旱时空特征分析[J]. 自然资源学报, 2014, (6): 1003-1016.
WANG Dong, ZHANG Bo, AN Meiling, et al. Temporal and spatial distributions of drought in Southwest China over the past 53 years based on standardized precipitation evapotranspiration index. Journal of Natural Resources, 2014, (6): 1003-1016. (in Chinese)
- [6] MCKEE, T., DOESKEN, N. and KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. 8th Conference on Applied Climatology, Anaheim, CA, American Meteor Society, 1993: 179-184.
- [7] 袁文平,周广胜. 标准化降水指标与 Z 指数在我国应用的对比分析[J]. 植物生态学报, 2004, 28(4): 523-529.
YUAN Wenping, ZHOU Guangsheng. Comparison between Standardized Precipitation Index and Z-index in China. Chinese Journal of Plant Ecology, 2004, 28(4): 523-529. (in Chinese)
- [8] VICENTE-SERRANO, S.M., BEGUERIA, S., LOPEZ-MORENO, J.I., et al. A new global 0.5° gridded dataset (1901-2006) of a multiscalar drought index: Comparison with current drought index datasets based on the palmer drought severity index [J].

Journal of Hydrometeorology, 2010, 11(4): 1033-1043.

- [9] 周丹, 张勃, 任培贵, 等. 基于标准化降水蒸散指数的陕西省近 50a 干旱特征分析[J]. 自然资源学报, 2014, 29(4): 677-688.
ZHOU Dan, ZHANG Bo, REN Peigui, et al. Analysis of drought characteristics of Shaanxi Province in recent 50 years based on standardized precipitation evapotranspiration index. Journal of Natural Resources, 2014, 29(4): 677-688. (in Chinese)
- [10] 李伟光, 易雪, 侯美亭, 陈汇林, 陈珍莉. 基于标准化降水蒸散指数的中国干旱趋势研究[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(5): 643-649.
LI Wei-Guang, YI Xue, HOU Meiting, CHEN Huilin and CHEN Huili. Standardized precipitation evapotranspiration index shows drought trends in China. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(5): 643-649. (in Chinese)
- [11] 庄少伟. 基于标准化降水蒸发指数的中国区域干旱化特征分析[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.
ZHUANG Shaowei. The Drought Characteristics in the Regions of China Based on the standardized precipitation evapotranspiration index. Lanzhou: Lanzhou University, 2013. (in Chinese)
- [12] ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D., et al. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirement. FAO Irrigation and Drainage Paper, No.56, Rome, 1998.
- [13] 李伟光, 侯美亭, 陈汇林, 陈小敏. 基于标准化降水蒸散指数的华南干旱趋势研究[J]. 自然灾害学报, 2012, (4): 84-90.
LI Weiguang, HOU Meiting, CHEN Huilin and CHEN Xiaomin. Study on drought trend in south China based on standardized precipitation evapotranspiration index. Journal of Natural Disasters, 2012, (4): 84-90. (in Chinese)
- [14] GB/T 20481-2006, 气象干旱等级[S].
GB/T 20481-2006, Classification of meteorological drought. (in Chinese)