

基于SPEI-3的云南省干湿变化时空特征分析

王玉洁, 程希平

西南林业大学地理与生态旅游学院, 云南 昆明
Email: wyj802366666@163.com, xipingcheng2012@163.com

收稿日期: 2021年2月14日; 录用日期: 2021年3月11日; 发布日期: 2021年3月19日

摘要

为探明滇近62 a的干湿变化特征, 本文利用Penman-Monteith法计算了1958~2019年滇的潜在蒸散发量(PET), 并计算了以3个月为步长的标准化降水蒸散指数(SPEI)。利用Mann-Kendall突变检验、Morlet连续复小波变换(CCWWT)分析了1958~2019年滇均值SPEI-3的变化趋势、突变点及干湿变化周期, 利用经验正交函数 EOF 基于23个站点的SPEI-3指数对滇干湿变化的时空特征进行提取。研究结果显示, ①滇西北、东北降水增多, 其他地区降水均呈不同程度减少。滇南部降水逐年减少、蒸发强烈、滇南部变干趋势极显著。滇南部是干旱发生的重灾区。②滇均值SPEI-3呈显著下降趋势, 全省变干趋势显著, 变点发生在2007年。滇干湿变化周期以26、3年为尺度的变化周期最为显著, 以26年尺度周期震荡最强, 为滇干湿变化的第一主周期。在26、3年特征时间尺度上, 滇干湿变化的平均周期分别为49、9年左右。③滇干湿变化的空间场主要有6种表现类型, 在1958~2019年间有19 a全滇变湿、17 a全滇变干、滇东南变湿西北变干有6 a、有13 a滇东南变干西北变湿。在1958~2019年滇干湿变化以变干为主, 其中西南、东南部的变干趋势极显著。滇SPEI-3指数的空间变化与滇农作物旱灾受灾面积变化趋势较一致, 说明SPEI-3计算结果指示性强, 可用于预测滇干湿变化。

关键词

SPEI-3, 干湿变化, 云南省

Spatial-Temporal Characteristics Analysis of Dry and Wet Changes in Yunnan Province, China Based on SPEI-3 Index

Yujie Wang, Xiping Cheng

School of Geography and Ecotourism, Southwest Forestry University, Kunming Yunnan
Email: wyj802366666@163.com, xipingcheng2012@163.com

Received: Feb. 14th, 2021; accepted: Mar. 11th, 2021; published: Mar. 19th, 2021

Abstract

In order to explore the characteristics of dry and wet changes in Yunnan Province in recent 62 years. In this paper, we calculated the potential evapotranspiration (*PET*) of Yunnan Province from 1958 to 2019 by Penman-Monteith method, and on this basis, calculated the *SPEI* drought index at a pace of 3 months. The author has used Manner-Kendall mutation test and Morlet complex continuous wavelet transform (CCWT) to analyze the variation trend, mutation point and dry-wet change period of mean *SPEI*-3 index in Yunnan Province from 1958 to 2019, and extracted the spatial-temporal characteristics of dry-wet change in Yunnan Province by empirical orthogonal function (EOF) decomposition method. The result showed that: ① The precipitation increased in the northwest and northeast of Yunnan Province, while in other areas of Yunnan Province, the precipitation decreased to varying degrees. There is little precipitation and intense evaporation in the south, and the drying trend in the south is very significant. The south is the worst-hit area of drought. ② The mean *SPEI*-3 index showed a significant downward trend, and the trend of drying was obvious throughout the country. The change time occurred in 2007. The cycle of dry and wet change in the study area has a significant change rule on the scale of 26 and 3 years, and the periodic oscillation on the scale of 26 years was the strongest, which was the first main cycle of dry and wet change in Yunnan Province. On the characteristic time scale of 26 years, the average period of dry and wet change in the study area was about 49 years. On the 3 years characteristic time scale, the average cycle of dry and wet change in the study area was about 9 years. ③ The spatial field of wet and dry variation has 6 types. In 1958~2019, there were 19 years in which the whole region got wet and there were 17 years in which the whole region got dry. Meanwhile, it took 6 years for the southeast to get wet and the northwest to get dry, and 13 years for the southeast to get dry and the northwest to get wet. During the period from 1958 to 2019, the dryness and wetness in Yunnan Province were the main change, and the dryness trend in the southwest and southeast was extremely significant. The spatial variation of *SPEI*-3 index was consistent with the area affected by drought in Yunnan Province, which indicated that the calculation results of *SPEI*-3 were highly indicative and could be used to predict dry-wet changes.

Keywords

SPEI-3 Index, Dry and Wet Changes, Yunnan Province of China

Copyright © 2021 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

干旱事件发生的长度、周期、空间范围对地球表面生物的活动影响巨大, 干旱事件的发生是地表物质对太阳辐射的综合反馈[1]。受行星运动及大气环流影响, 广布于地球表面的陆地因地理位置不同当干旱事件发生时所表现的上层气候性状也不同[2]。相较于长期干旱, 短期干旱对地球生物的影响更为致命, 短期干旱考验地球生物体供水系统的能力, 短期干旱所反映出的气象干旱进一步发展会导致农业干旱发生, 对气象干旱所呈现的时空特征进行分析解读对人类生产生活极为重要[3]。气象干旱通常用季、年、几十年降水不足与蒸散减少的关系来衡量, 国内外学者利用多种指数的对比来分析不同区域的干旱特征[4] [5] [6], 当前国际主要使用的是标准化降水指数(*SPI*, Standardised Precipitation Index)和标准化降水蒸散指数(*SPEI*, Standardized Precipitation Evapotranspiration Index)等[7] [8] [9], 也有学者引入气象要素、归一

化植被指数(*NDVI*, Normalized Difference Vegetation Index), 参与潜在蒸散发量(*PET*, Potential Evapotranspiration)及 *SPEI* 的释因分析及相关性分析[10] [11]。但 *PET*、*SPEI* 的计算流程已考虑气象要素, 在对二者的释因分析上还需结合区域大气环流因素。对 *SPEI* 的计算常用的有基于 Thornthwaite、Hargreaves、Penman-Monteith 等模型来计算 *PET* [12], 不同的模型对不同地形条件的地区适应性不同。Penman-Monteith 法是计算 *PET* 的优良模型[13], 而以 3 个月步长为基础的 *SPEI* 指数相较其他步长的 *SPEI* 指数能更准确地反映区域短期气象干旱特征, 即干湿变化[14] [15]。滇干旱事件频发[16], 对其干湿变化特征分析有助于理解低纬度、近洋高原山地的干湿变化, 为当前本区供水、低纬内陆区水循环研究提供数据支持。有国内学者利用相对湿度指数(*M*)、降水气温均一化指数(*I_s*)等对滇干旱特征分析[17] [18]。高瑞等[19]基于 *SPEI* 指数对滇中部的季节性干旱时空特征分析, 但未指明计算 *PET* 的方法及 *SPEI* 使用的步长。但多数研究结果都指出一个事实, 西南地区在新世纪变干趋势显著[20]。基于以上的研究工作, 作者采用 Penman-Monteith 法计算滇 *PET*、计算步长为 3 个月的 *SPEI* 指数并以此提取滇近 62 a 干湿变化的时空特征。

2. 数据和方法

2.1. 研究区概况

云南省(21°8'~29°15' N, 97°31'~106°11' E) (以下简称滇)位于青藏高原东南部与云贵高原的结合处, 全省地势西北高、东南低, 自西北向东南海拔逐级降低。四季温差小、干湿季明显、垂直变异气候显著[21]。水汽输送途径的来源既有西南方向的印度洋, 又有东南方向的太平洋。

2.2. 数据来源与处理

云南省气象站观测资料选取于中国气象科学数据网(<http://data.cma.cn/>) 1958~2019 年日气象观测数据。对一年内单一站点缺测数据超过样本量 5% 的站点剔除后, 保留 23 个较完整气象站的观测资料(图 1)。参与 *PET*、*SPEI*-3 计算的气象要素主要有日降水量(*RP*, mm)、日日照时数(*SD*, h·d⁻¹)、日大气压(*P*, hpa)、日相对湿度(*RH*, %)、日 2 m 风速(*WS*, m·s⁻¹)、日气温(*T_a*, °C)等。对缺失的日气象数据用该年份对应月份的平均值补齐。基础气象数据的单位换算、计算、整理在 Microsoft Excel 2019 软件中实现。

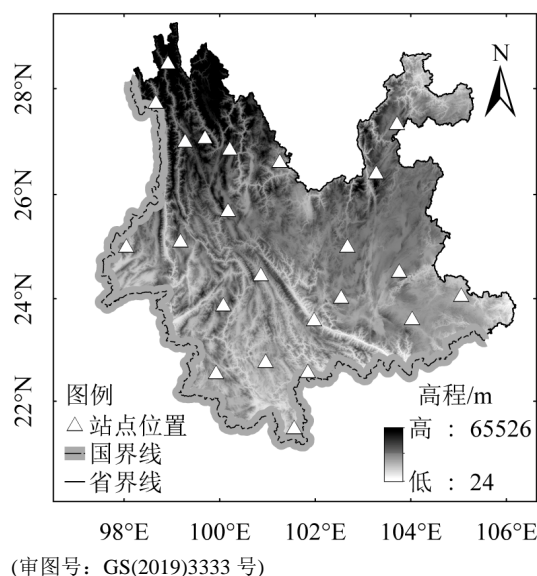


Figure 1. Geographical location and meteorological station distribution in Yunnan Province

图 1. 云南省地理位置及气象站点分布

2.3. 研究方法

2.3.1. SPEI-3 的计算流程

1) 采用 1998 年 FAO 修正后的 Penman-Monteith 公式计算逐日 PET [22], 计算 PET 的公式如下,

$$PET = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_a + 273} u_2 (E - e)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

式中: PET 为潜在蒸散发量($\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$); Δ 为饱和水汽压曲线斜率($\text{kPa}\cdot\text{C}^{-1}$); R_n 为地面净辐射($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$); G 为土壤热通量($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$); γ 为干湿常数($\text{kPa}\cdot\text{C}^{-1}$); u_2 为地表 2 m 高处的风速($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); T_a 为平均气温(C); E 为饱和水汽压(kPa); e 为实际水汽压(kPa).

2) 计算气候水平衡量,

$$D_i = RP_i - PET_i \quad (2)$$

式中, D_i 为气候水平衡量(mm); RP_i 为月降水量(mm); PET_i 为月潜在蒸散发量(mm).

3) 建立时间尺度为 3 个月的水平衡累积序列,

$$D_n^k = \sum_{i=0}^{k-1} (RP_{n-i} - PET_{n-i}), n \geq k \quad (3)$$

式中, k 为时间尺度 - 月, n 为计算次数.

4) 对 D_i 进行正态化, 并利用三参数 \log - \logistic 方法计算概率分布

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x - \gamma} \right)^\beta \right]^{-1} \quad (4)$$

式中, 参数 α 、 β 、 γ 分别为尺度参数、形状、位置参数, 用线性矩的方法拟合得到.

对累积概率密度进行标准化处理

$$P = 1 - F(x) \quad (5)$$

当累积概率密度 $P \leq 0.5$ 时,

$$\begin{cases} W = \sqrt{-2 \ln P} \\ SPEI = W - \frac{c_0 + c_1 W + c_2 W^2}{1 - d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3} \end{cases} \quad (6)$$

当累积概率密度 $P > 0.5$ 时,

$$\begin{cases} W = \sqrt{-2 \ln(1 - P)} \\ SPEI = \frac{c_0 + c_1 W + c_2 W^2}{1 - d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3} - W \end{cases} \quad (7)$$

其中, $c_0 = 2.5155$; $c_1 = 0.8029$; $c_2 = 0.0103$; $d_1 = 1.4328$; $d_2 = 0.1893$; $d_3 = 0.0013$.

2.3.2. 干旱评估指标

对 $SPEI-3$ 的划分(表 1).

2.3.3. 干湿变化的时空特征提取方法

对 23 个站点 RP 、 PET 、 $SPEI-3$ 的逐年变化斜率通过反距离权重插值(IDW, Inverse Distance Weight)

Table 1. SPEI-3 index drought rating**表 1.** SPEI-3 干旱等级划分

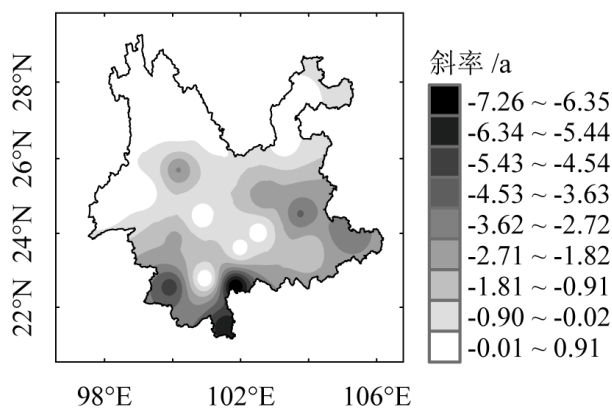
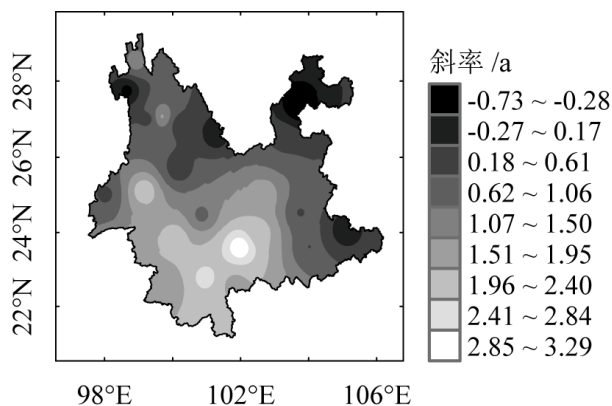
	极端干旱	中等干旱	轻度干旱	正常	轻度湿润	中等湿润	极端湿润
SPEI-3	≤ -2.0	$-2.0 \sim -1.0$	$-1.0 \sim -0.5$	$-0.5 \sim 0.5$	$0.5 \sim 1.0$	$1.0 \sim 2.0$	≥ 2.0

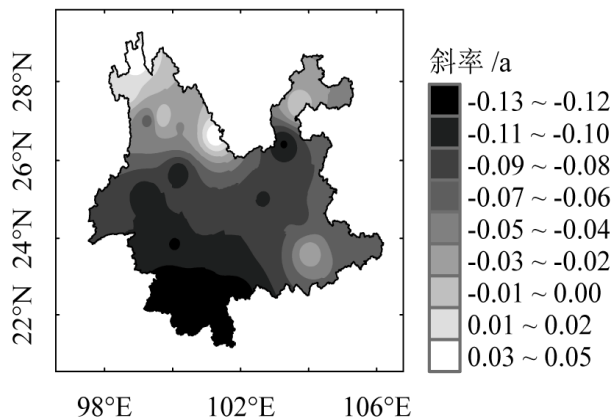
得到滇境内的 RP 、 PET 、 $SPEI-3$ 在 1958~2019 年的逐年变化斜率的空间分布特征。对 23 个站点的 $SPEI-3$ 做平均化处理得到滇 $SPEI-3$ 均值, 基于滇均值 $SPEI-3$ 利用 Manner-Kendall 突变检验(以下简称 M-K 检验)及 Morlet 连续复小波变换(CCWT, Complex Continuous Wavelet Transform)提取滇干湿变化在 1958~2019 年的周期特征[23]。基于 23 个站点 $SPEI-3$ 值利用经验正交函数(EOF, Empirical Orthogonal Function)提取滇干湿变化在 1958~2019 年的时空变化特征。

3. 结果与分析

3.1. 滇 RP 、 PET 、 $SPEI-3$ 的变化

滇 RP 变化斜率由东南向西北逐阶梯增加; 除西北、东北部降水逐年增多外, 滇其他地区降水均呈不同速率减少; 滇南部降水量减少明显。滇 PET 的变化斜率由南向北减少, 东北部 PET 减小趋势明显; 滇大部分地区 PET 增加且以南部 PET 增加趋势大, 滇南部降水少、蒸发强烈。滇 $SPEI-3$ 的变化斜率由南向北呈增加趋势, 即除滇西北变湿外, 其他地区变干趋势明显, 滇南部是干旱发生的重灾区(图 2)。

(a) RP (b) PET



(c) SPEI-3

Figure 2. The change slope of rain point (RP), potential evapotranspiration (PET) and standardized precipitation evapotranspiration index of 3 (SPEI-3) from 1958 to 2019 in Yunnan Province

图 2. 滇 1958~2019 年降水量(RP)、潜在蒸散发量(PET)、标准化降水蒸散指数(SPEI-3)的变化斜率

3.2. 滇均值 SPEI-3 指示的干湿变化

在 $\alpha = 0.05$ 的置信水平下, 参与 M-K 突变检验的 23 个站点中, 有 15 个站点 SPEI-3 下降趋势明显且通过 M-K 显著性检验, 其他 8 个站点的 SPEI-3 既无上升也无下降趋势, 变化趋势不明显且 Z 值未通过显著性检验(表 2)。滇均值 SPEI-3 的 M-K 检验结果表明, 滇均值 SPEI-3 显著下降, 即变干了, 变点发生在 2007 年(图 3(a))。小波变换的结果显示, 当时间尺度为 26、3 年时, 上述 2 个周期的波动控制着 1958~2019 年滇的干湿变化(图 3(b)~(c))。以 26 年为尺度的周期特征明显, 为滇干湿变化的第一主周期, 同时又存在以 3 年为尺度的第二周期。在 26 年特征时间尺度上, 滇干湿变化的一个周期为 49 a, 并在 1958~2019 年间经历了不到 1 个干湿转换周期。在 3 年特征时间尺度上, 滇干湿变化的一个周期为 9 a, 并在 1958~2019 年间经历了不到 8 个干湿转换周期(图 3(d))。

3.3. 滇站点 SPEI-3 指示的干湿变化

滇站点 SPEI-3 指数经 EOF 分解后的前 5 个特征向量特征值的累计方差贡献率为 77.19%, 从特征根误差范围看, 前 3 个特征根可以较好解释 1958~2019 年滇干湿变化的 3 种分布类型(表 3)。

模态 1 特征向量的方差贡献率为 46.15%, 是滇干湿变化空间场分布的主要形式。模态 1 中站点的特征值为正, 即 1958~2019 年全滇干湿变化趋势一致性强, 即全滇全年变干或变湿。整个滇中部的干湿变化率高于其他地区, 且以同心圆的形式向其他地区扩散。滇中部是高值中心, 四周低且低值中心位于滇

Table 2. The years in which drought occurred significantly at 15 sites

表 2. 15 个站点中干旱显著发生的年份

站点	会泽 56684	腾冲 56739	保山 56748	大理 56751	昆明 56778	景东 56856	玉溪 56875	泸西 56886	临沧 56951	澜沧 56954	思茅 56964	元江 56966	勐腊 56969	江城 56977	广南 59007
年份	2008	2005 2007	2009	2009 2011 2016	2004	2011 2015 2017	2007 2017	1991	2002	1980 1984	1998	2005	1984	1986~ 2000	2001

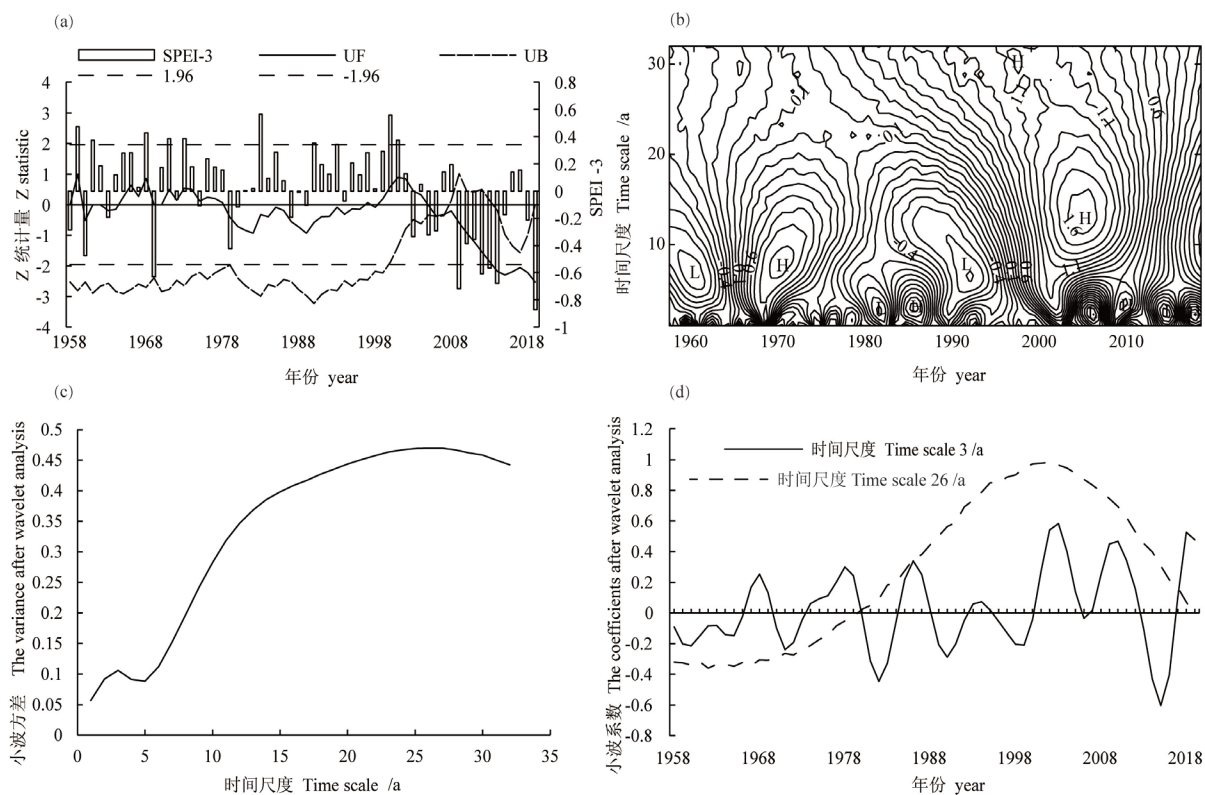


Figure 3. Results of M-K mutation test and extraction cycle of Morlet complex continuous wavelet transform (CCWT) based on mean *SPEI-3* index in Yunnan Province

图 3. 滇均值 *SPEI-3* 的 M-K 突变检验及 Morlet 连续复小波变换(CCWT)提取周期结果

Table 3. The top 5 eigenvector contribution rates of *SPEI-3* index after EOF decomposition

表 3. *SPEI-3* 经 EOF 分解后的前 5 个特征向量贡献率

模态	特征值	方差贡献率	累计方差贡献率	特征根误差范围	
				下限	上限
1	2.8638	0.4615	0.4615	2.0193	3.7083
2	0.9581	0.1543	0.6159	0.6755	1.24058
3	0.3962	0.0638	0.6797	0.2793	0.5131
4	0.3188	0.0513	0.7312	0.2247	0.4128
5	0.2529	0.0407	0.7719	0.1783	0.3275

西北角, 即滇西北干湿变化率小(图 4(a))。模态 2 特征向量的方差贡献率为 15.43%, 以临沧 - 昭通线为界, 向西南为正值区, 向西北为负值区, 正值中心出现在以澜沧、景洪、砚山为代表的滇西南, 负值中心出现在滇西北角。模态 2 呈现西北东南反向分布, 滇东南变湿、滇西北变干或滇东南变干、滇西北变湿。特征向量值从西北向东南依次增加, 即滇干湿变化由西北向东南递增或递减(图 4(b))。模态 3 特征向量的方差贡献率为 6.4%, 也是滇干湿变化空间场的主要形式。以华坪 - 元江线为界, 向东北为正值区, 向西南为负值区, 正值中心出现在以昭通为代表的滇东北, 负值中心出现在滇西南角。模态 3 呈现西南东北反向分布, 即滇西南变湿、滇东北变干或滇西南变干、滇东北变湿。特征向量值从西南向东北依次增加, 即滇干湿变化也是由东北向西南递增或递减(图 4(c))。

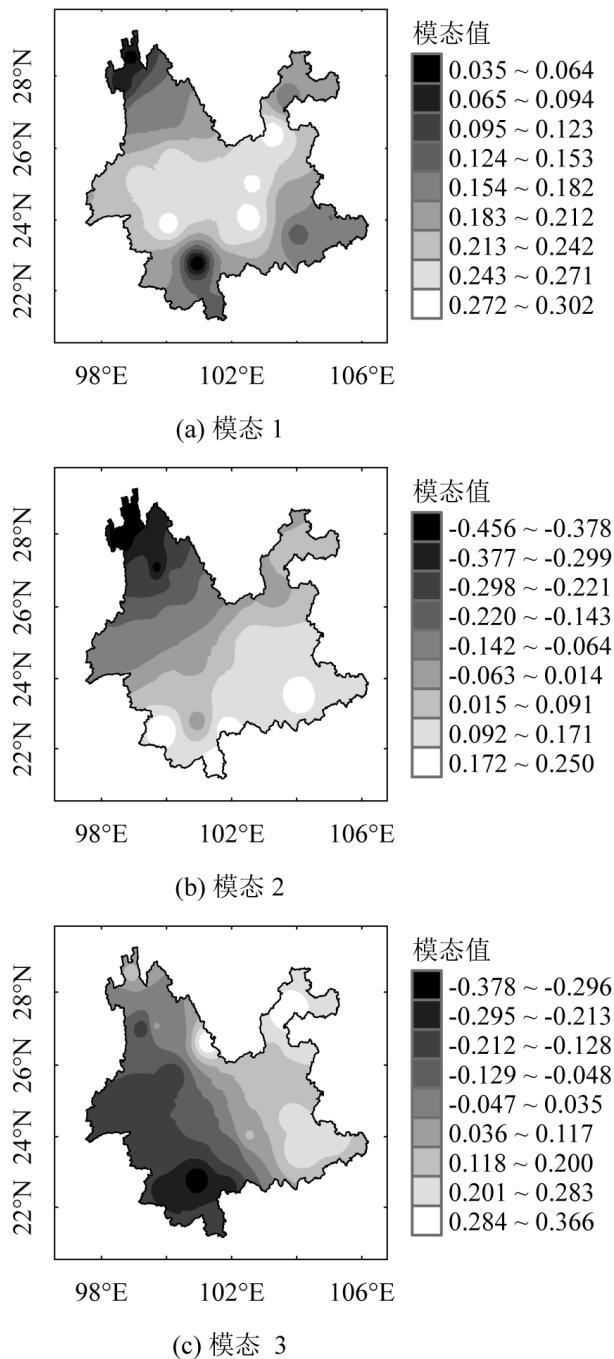


Figure 4. SPEI-3 index's main modes after EOF decomposition at 23 sites in Yunnan Province

图 4. 滇 23 个站点 SPEI-3 经 EOF 分解后的主模态

EOF 分解后的主模态时间系数显示, 滇干湿变化的空间场有 6 种表现类型。模态 1 为全年全滇变干或全滇变湿 2 种类型; 模态 2 为全年滇西北变干东南变湿, 或滇西北变湿东南变干 2 种类型; 模态 3 反映全年滇东北变干西南变湿, 或滇东北变湿西南变干 2 种类型。在 1958~2019 年间, 有 19 a 全滇变湿, 17 a 全滇变干; 滇东南变湿西北变干有 6 a, 滇东南变干西北变湿有 13 a。滇干湿变化场的分布以模态 1 为主, 有 36 a, 占总年数 58.07%, 且模态 1 的时间系数变化斜率小于零, 即滇 62 a 来全滇整体有变干趋

势。模态 2 出现 19 a, 占总年数 30.65%, 模态 2 时间系数变化斜率小于零, 即 62 a 来滇东南有变干趋势、西北有变湿趋势。模态 3 出现 7 a, 占总年数 11.3%, 模态 3 时间系数变化斜率大于零, 即 62 a 来滇东北有变湿趋势、滇西南有变干趋势(表 4)。

Table 4. The slope of the change of the time coefficient of the main mode and the six types of dry and wet field performance and corresponding years

表 4. 主模态的时间系数变化斜率及六种干湿场表现类型及对应年份

模态	时间系数变化斜率	干湿场分布类型	年份
1	-0.0334	全区变湿	1959, 1961, 1962, 1965, 1966, 1968, 1970, 1971, 1973, 1974, 1983, 1985, 1990, 1991, 1993, 1997, 1999, 2000, 2001
		全区变干	1958, 1960, 1963, 1969, 1979, 1987, 2003, 2005, 2006, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2018, 2019
2	-0.012	东南变湿, 西北变干	1964, 1972, 1976, 1981, 1982, 2015
		东南变干, 西北变湿	1977, 1980, 1984, 1988, 1989, 1992, 1995, 1996, 1998, 2002, 2004, 2007, 2016
3	0.0162	东北变湿, 西南变干	1978, 1986, 1994, 2008, 2017
		东北变干, 西南变湿	1967, 1975

4. 结论与讨论

本文研究结果显示, 在 1958~2019 年研究时间段内:

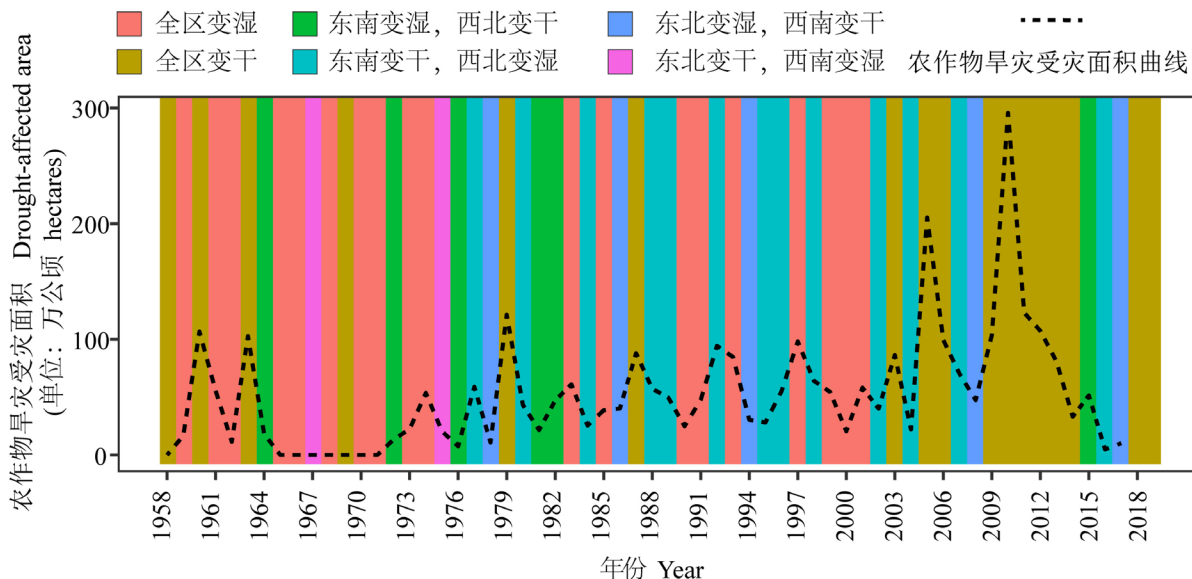
①滇西北、东北降水增多, 其他地区降水均呈不同程度逐年减少。滇南部降水少、蒸发强烈、滇南部变干趋势极显著。滇南部是干旱发生的重灾区。

②滇均值 *SPEI-3* 呈显著下降趋势, 全省变干趋势显著, 变点发生在 2007 年。滇干湿变化周期以 26、3 年为尺度的变化周期最为显著, 以 26 年尺度周期震荡最强, 为滇干湿变化的第一主周期。在 26、3 年特征时间尺度上, 滇干湿变化的平均周期分别为 49、9 年左右。

③滇干湿变化的空间场主要有 6 种表现类型, 在 1958~2019 年间有 19 a 全滇变湿、17 a 全滇变干、滇东南变湿西北变干有 6 a、有 13 a 滇东南变干西北变湿。62 年来滇干湿变化以变干为主, 其中西南、东南部的变干趋势极显著。

滇干湿变化以变干为主, 这与任菊章等的研究结论较一致[17] [20]。滇在 19 世纪 80 年代至今干旱事件越来越频繁, 这与郑建萌的研究结论较一致[18]。在蒸散和降水综合作用下, 滇南部变干趋势极显著, 而以滇西北为代表的横断山区变湿趋势却极显著。通过从中华人民共和国农业农村部查阅云南省近年农作物旱灾受灾面积数据发现, 滇六种干湿场的逐年变化情况与滇旱灾受灾面积对应较一致, 以西双版纳地区为代表的勐腊等地近年旱情明显从侧面印证了滇南部干旱增加(图 5)。横断山区生物多样性的增多、植被覆盖度的改善也可印证滇西北变湿对地区生物活动的影响[24]。滇西北高东南低的逐级阶梯地势, 加之下方向两侧水汽来源作用, 使得在地势较高的滇西北迎风坡形成降水丰区。而滇生产活动多集中在中部、南部、及东南部地势平坦区, 用水量大, 降水却逊于滇西北, 以上因素的综合作用形成当前滇干湿变化时空分布特征。以西双版纳地区为代表的滇南部从上世纪 50 年代至今, 因原始雨林的采伐、人工橡胶林的培育、城市发展等多种人类活动对地表理化性质的改变无不在对该区域蒸散的增加出力。作者在对元江干热河谷林地内外潜在蒸散的研究中发现, 无稀树灌丛植被影响下的 *PET* 大于有植被影响下的 *PET* 约 $0.86 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ [25]。由此可见, 地表理化性质的变化对蒸散的影响显著。但对当前滇干湿变化的时空分布格局同时也存在另一种解读即来自西南、东南方向的洋面季风的风力有增强趋势使得大规模团的洋面水分在不同风力的作用下难以在滇南部地势低洼处停留而造成滇南部供水不足, 同时滇南部因地

表理化性质的变化造成蒸散增强从而使得滇南部在研究时间段内变干趋势显著。



(注: 滇旱灾受灾面积数据来源于中华人民共和国农业农村部 <http://zdscxx.moa.gov.cn:8080/nyb/pc/search.jsp>)

Figure 5. Year-by-year variation of six dry and wet fields is corresponding to the drought-affected area curve of Yunnan province

图 5. 滇六种干湿场的逐年变化与滇旱灾受灾面积变化趋势对应图

鉴于滇特殊的西北高、东南低的山地地形, 干湿变化在空间分布上同样也受制于地形条件的影响。在未来对基于 *SPEI* 指数滇干湿变化的原因分析上仍需进一步收集长时间段印度洋、太平洋的洋面季风路径及季风强度变化信息、洋面气象事件信息加强对滇干湿变化的原因解读。

致谢

特别感谢导师对文章的指导!

基金项目

国家自然科学基金项目(31860206)。

参考文献

- [1] Wilhite, D.A. and Glantz, M.H. (1985) Understanding: The Drought Phenomenon: The Role of Definitions. *Water International*, **10**, 111-120. <https://doi.org/10.1080/02508068508686328>
- [2] Mahmood, R., Pielke Sr, R.A., Hubbard, K.G., et al. (2014) Land Cover Changes and Their Biogeophysical Effects on Climate. *International Journal of Climatology*, **34**, 929-953. <https://doi.org/10.1002/joc.3736>
- [3] Nagarajan, R. (2009) Drought Assessment. Capital Publishing Company, Bombay.
- [4] Zhao, H., Gao, G., An, W., et al. (2017) Timescale Differences between SC-PDSI and SPEI for Drought Monitoring in China. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, **102**, 48-58. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2015.10.022>
- [5] Banimahd, S.A. and Khalili, D. (2013) Factors Influencing Markov Chains Predictability Characteristics, Utilizing SPI, RDI, EDI and SPEI Drought Indices in Different Climatic Zones. *Water Resources Management*, **27**, 3911-3928. <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0387-z>
- [6] Mavromatis, T. (2007) Drought Index Evaluation for Assessing Future Wheat Production in Greece. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, **27**, 911-924. <https://doi.org/10.1002/joc.1444>
- [7] Stagge, J.H., Tallaksen, L.M., Gudmundsson, L., et al. (2015) Candidate Distributions for Climatological Drought In-

- dices (SPI and SPEI). *International Journal of Climatology*, **35**, 4027-4040. <https://doi.org/10.1002/joc.4267>
- [8] Tirivarombo, S., Osupile, D. and Eliasson, P. (2018) Drought Monitoring and Analysis: Standardised Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) and Standardised Precipitation Index (SPI). *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, **106**, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2018.07.001>
- [9] Tong, S., Lai, Q., Zhang, J., *et al.* (2018) Spatiotemporal Drought Variability on the Mongolian Plateau from 1980-2014 Based on the SPEI-PM, Intensity Analysis and Hurst Exponent. *Science of the Total Environment*, **615**, 1557-1565. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.121>
- [10] Fan, Z.X. and Thomas, A. (2018) Decadal Changes of Reference Crop Evapotranspiration Attribution: Spatial and Temporal Variability over China 1960-2011. *Journal of Hydrology*, **560**, 461-470. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.080>
- [11] 罗新兰, 李英歌, 殷红, 等. 东北地区植被 NDVI 对不同时间尺度 SPEI 的响应[J]. 生态学杂志, 2020, 39(2): 412-421.
- [12] 张晓琳, 熊立华, 林琳, 等. 五种潜在蒸散发公式在汉江流域的应用[J]. 干旱区地理, 2012, 35(2): 229-237.
- [13] Didari, S. and Ahmadi, S.H. (2019) Calibration and Evaluation of the FAO56-Penman-Monteith, FAO24-Radiation, and Priestly-Taylor Reference Evapotranspiration Models Using the Spatially Measured Solar Radiation across a Large Arid and Semi-Arid Area in Southern Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, **136**, 441-455. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2497-2>
- [14] 姚俊强, 杨青, 毛炜峰, 等. 西北干旱区大气水分循环要素变化研究进展[J]. 干旱区研究, 2018, 35(2): 269-276.
- [15] 赵慧, 姚俊强, 李新国, 等. 新疆气候干湿变化特征分析[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2020, 59(5): 126-133.
- [16] 琚建华, 吕俊梅, 谢国清, 等. MJO 和 AO 持续异常对云南干旱的影响研究[J]. 干旱气象, 2011, 29(4): 401-406.
- [17] 任菊章, 黄中艳, 郑建萌. 基于相对湿润度指数的云南干旱气候变化特征[J]. 中国农业气象, 2014, 35(5): 567-574.
- [18] 郑建萌, 黄玮, 陈艳, 等. 云南极端气象干旱指标的研究[J]. 高原气象, 2017, 36(4): 1039-1051.
- [19] 高瑞, 王龙, 张燕明, 等. 基于 SPEI 的滇中季节性干旱时空特征分析[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2019, 34(3): 516-521.
- [20] Wang, W., Zhu, Y., Xu, R., *et al.* (2015) Drought Severity Change in China during 1961-2012 Indicated by SPI and SPEI. *Natural Hazards*, **75**, 2437-2451. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1436-5>
- [21] 施化云, 肖丰. 云南森林资源抗雨雪冰冻灾害能力比较研究[J]. 林业调查规划, 2018, 43(2): 36-41.
- [22] Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., *et al.* (1998) Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements-FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- [23] 吴利华, 彭汐, 马月伟, 等. 1951~2016 年昆明极端气温和降水事件的变化特征[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2019, 41(1): 91-104.
- [24] 徐波, 陈光富. 滇西北高山冰缘带植物新记录[J]. 广西植物, 2020, 40(12): 1824-1832.
- [25] 王玉洁, 周炳江, 黄郑雯, 等. 元江干热河谷林地内外潜在蒸散发量的变化及其驱动因素[J]. 生态学杂志, 2021, 40(2): 501-511.