

# 三种气象干旱指数在四川省的适用性分析

王荣江<sup>1, 2</sup> 李谢辉<sup>1</sup> 周任君<sup>2</sup> 王磊<sup>11</sup>

(1. 成都信息工程大学 大气科学学院/

高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225;

2. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026)

**【摘要】:** 受气候和地形等多种因素影响, 气象干旱指数在不同地区有着不同的表现。位于长江上游地区的四川省地貌条件复杂, 气候类型多样, 在使用气象干旱指数进行干旱监测前需要评估其适用性。利用四川省 34 个气象站点 1987~2016 年间日降水和日平均气温数据, 基于 SPI、SPEI 和 2017 年新版国标文件中增加的 MCI 指数, 利用时间序列和空间插值等方法主要对四川省 1987~2010 年间的干旱过程和干旱年份进行了分析, 借助建立的 RMSE 指标和评分法重点研究了多时间尺度指数反映的干旱强度、干旱范围等与实际旱情的符合度。结果表明: (1) 总体上 MCI 最好, SPI 与 SPEI 效果接近; 具体月尺度上, MCI、SPI3(3 个月)、SPEI3(3 个月)是适用性排名的前三位。(2) 川东部盆地适合用 MCI, 川西南山地适合用 SPEI3, 川西北高原适合用 SPI6(6 个月)或 SPI1(1 个月)。(3) SPI、SPEI、MCI 指数在川东部盆地的监测误差最小, 川西南山地次之, 川西北高原最大。

**【关键词】:** SPI 指数 MCI 指数 适用性分析 监测效果评分

**【中图分类号】:** P49 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)03-0734-11

气象干旱指数是基于气象站不同时间尺度的数据, 利用数学、物理等方法进行干旱指标的计算, 从而用于监测特定地区, 特定时段由于气候异常而引发的干旱<sup>[1]</sup>。目前较普遍使用的 PDSI (Palmer Drought Severity Index)、SPI (Standard Precipitation Index)、SPEI (Standard Precipitation Evaporation Index)、CI (Composite Index) 等干旱指数各有优劣, 由于区域的差异性和指数本身存在的缺陷, 因此在使用前需要对指数的适用性进行分析。例如, Vicente-Serrano 等<sup>[2]</sup>利用 PDSI、SPI、SPEI 监测了干旱对全球水文, 生态和农业系统的影响, 发现 SPEI 和 SPI 在不同时间尺度上计算的干旱指数能力更高, 与不同变量的时间变化相关, 而 PDSI 指数由于缺乏反映干旱内在多标量性质的灵活性, 系统性地比 SPI 和 SPEI 要糟糕。Surendran 等<sup>[3]</sup>比较了 3 种干旱指数在印度的表现, 得出 SPI 比其他指标更好更容易理解的结论。杨庆等<sup>[4]</sup>研究了 7 种干旱指数在中国的区域适用性, 结果表明干旱指数能够反映中国长期的干湿情况, 但在量级上差别较大。袁文平等<sup>[5]</sup>做了 SPI 与 Z 指数在我国应用的对比分析, 结果表明 SPI 具有更加优越的计算稳定性。沈国强等<sup>[6]</sup>分析了 SPEI 指数在中国东北地区干旱研究中的适用性, 表明 SPEI 指数不仅能满足数学理论统计的要求, 而且与实际旱情与土壤湿度对应的很好, 可以说明其在监测东北地区干旱时较好的适用性。熊光洁等<sup>[7]</sup>做了 3 种干旱指数 (M、SPI、SPEI) 对西南地区的适用性分析, 结果表明 SPEI 指数是西南地区适用性最好的指数。

**作者简介:** 王荣江(1997~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为气象灾害与区域气候变化. E-mail: 823392850@qq.com

李谢辉, E-mail: lixiehui@cuit.edu.cn

**基金项目:** 四川省科技厅项目(2017ZR0043); 国家自然科学基金项目(41971308)

中国地处亚欧大陆东部，濒临太平洋和南海的大部分地区每年都有明显的风向偏转，是典型的季风气候国家，受全球变暖以及季风降水的不确定性影响，干旱发生频率逐渐增加，近 60 年间中国平均每年干旱受旱面积达到 20 多万 km<sup>2</sup>[8,9]。为了应对日益加重的干旱问题，中国 2017 年出台了新版国标文件《GB/T20481-2017 国家气象干旱等级》来评估干旱，该版文件相对旧版文件做了很大改动，特别增加了气象干旱综合监测指数 MCI (Meteorological drought composite index)，具有明显的中国特色<sup>[10]</sup>。国内一些学者利用新旧版国标文件做了中国范围内干旱指数的适用性研究，例如，王素萍等<sup>[11]</sup>评价了几种干旱指标对西南和华南区域月尺度干旱监测的适用性，得出 MCI 指数在研究区各季干旱监测中表现均较好。李红梅等<sup>[12]</sup>分析了气象干旱监测指标在青海高原的适用性，发现 SPI 能很好地监测出干旱范围和干旱强度，而 MCI 指数对于干旱范围和干旱强度均有很大的偏差<sup>[12]</sup>。杨玮等<sup>[13]</sup>做了 MCI 在安徽省的适用性分析，结果表明 MCI 对于干旱过程具有较好的识别与诊断能力，在安徽省适用性良好。潘妮等<sup>[14]</sup>利用旧版国标提供的算法研究了 SPI、SPEI、CI 指数在四川省的适用性，结果表明 SPEI 指数是最适合四川省的干旱指标。从以上研究成果可以看出，一方面像 PDSI、SPI、SPEI 这类的干旱指数得到了广泛应用，另一方面由于其在不同地区的差异表现，因此使用前需要根据不同的区域情况进行重新评估和调整，虽然目前针对干旱指数的适用性研究已经做了不少，但针对更具体不同时间尺度下干旱指数监测影响评估的研究并不多。

进入 21 世纪以来，四川省遭遇了多次严重干旱过程，比如 2006 年盛夏有 126 个县(市)发生伏旱，其中有 53 个县(市)旱情在 40d 以上，农作物受灾 206 多万公顷，1000 多万人饮水困难，因高温干旱造成的直接经济损失达 100 多亿元<sup>[15]</sup>。同样在 2009~2010 年四川南部的秋冬春连旱过程中，有 13 个市(州)、71 个县、市(区)受灾，攀枝花，凉山州占受灾人数大部，直接经济损失 13.8 亿元<sup>[14]</sup>。因此迫切需要选择适用的气象干旱指数来对地形条件复杂，气候类型多样，旱灾频发的四川进行准确的干旱监测和评估。本文试图基于新版国标中给出的 SPI、SPEI 和 MCI 指数算法来评估 3 个指数在四川省的适应性，通过找出适合四川省不同时间尺度和不同地形区域下的干旱指数，以期为四川旱灾监测、风险评估和制定防灾减灾规划提供有价值的理论和应用基础。

## 1 研究区概况和研究方法

### 1.1 研究区概况

四川省介于 97° 21' E~108° 33' E 和 26° 03' N~34° 19' N 之间，海拔范围为 178~7143m。按地形特点可以分为川东部盆地、川西南山地、川西北高原 3 大区域(图 1)。由于受季风气候和复杂地形影响，降水时空分布不均，干旱频发，其中川东部盆地和川西南山地是易旱区域，典型旱情如 2006 年 7~8 月盆地的特大伏旱过程和 2009 年 9 月~2010 年 5 月四川南部的秋冬春连旱过程。近年来，在全球变暖背景下，四川干旱的频率和强度有增加趋势。

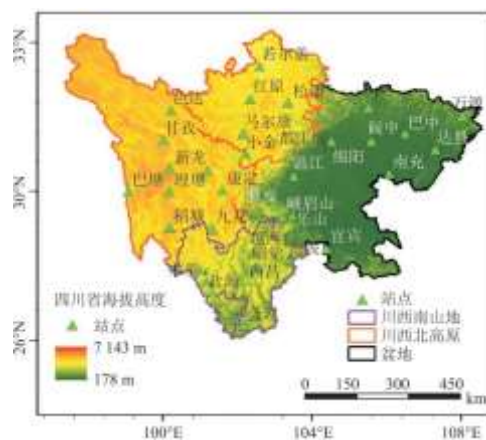


图 1 四川省海拔高度、地理分区和站点分布情况

## 1.2 数据来源

通过对原始的 42 个站点在时间尺度、数据完备性等方面进行全面筛选，主要选取了省内均匀分布的 34 个站点，具体地理位置和中心分布见图 1 所示，时间跨度为 1987~2016 年，共 30 年，10958 日。研究中使用的日降水和日平均温度数据主要来源于中国气象数据网 (<http://www.nmic.cn/>) 中的《中国地面气候资料日值数据集 V3.0》；旱情历史数据主要来源于《中国气象灾害大典(四川卷)》、《四川水旱灾害》、相关文献及统计年鉴等<sup>[16~18]</sup>。

## 1.3 研究方法

### 1.3.1 标准化降水指数 SPI

SPI 的基本原理是 McKee 等(1993, 1995)、Edwards 和 McKee(1997)及 Guttman(1998)所述的将某个给定台站的降水量进行概率密度函数拟合后的归一化处理<sup>[19]</sup>。SPI 的计算步骤可参看文献[10], 反映的干旱等级见表 1。

表 1 SPI 指数干旱等级划分

等级	类型	标准化降水指数 (SPI)
1	无旱	$-0.5 < \text{SPI}$
2	轻旱	$-1.0 < \text{SPI} \leq -0.5$
3	中旱	$-1.5 < \text{SPI} \leq -1.0$
4	重旱	$-2.0 < \text{SPI} \leq -1.5$
5	特旱	$\text{SPI} \leq -2.0$

### 1.3.2 标准化降水蒸散指数 SPEI

蒸发量是影响干旱的一个重要因素。2010 年 Vicente-Serrano 首先采用降水与蒸发的差值构建了 SPEI 指数，然后采用 3 个参数的 log-logistic 概率分布函数来描述其变化，并通过类似 SPI 的处理得出了干旱分级，使得 SPEI 反映的干旱等级与 SPI 一致。SPEI 的计算步骤及计算蒸发量采用的 Thornthwaite 经验公式可具体参阅文献[10]。

### 1.3.3 气象综合干旱指数 MCI

干旱对不同降水时段的响应是不同的，近期降水对于干旱缓解更有效。气象综合干旱指数 MCI 在考虑了以上条件的同时，根据不同地理区的差异从农业生态的角度增加了多时间尺度和季节调节参数，使得该指数能够适用于作物生长季逐日气象干旱的监测和评估。MCI 指数反映的干旱等级与 SPI 和 SPEI 一致。MCI 的具体计算公式如下：

$$MCI = Ka \times (a \times SPIW_{60} + b \times MI_{30} + c \times SPI_{90} + d \times SPI_{150}) \quad (1)$$

式中：MCI 为气象干旱综合指数；MI<sub>30</sub>为近 30d 相对湿度指数，MI 可按下式计算：

$$MI = \frac{P - PET}{PET} \quad (2)$$

式中：MI 为某时期相对湿度；P 为某时段的降水量；PET 为某时段的潜在蒸散量。

式(1)中 SPI<sub>90</sub>为近 90d 标准化降水指数；SPI<sub>150</sub>为近 150d 标准化降水指数；SPIW<sub>60</sub>为近 60d 标准化权重降水指数。标准化权重降水指数的意义在于重点考察了最近降水对旱情的影响，是对 SPI 指数的一种有效改进，具体的计算步骤可参阅文献[10]。a 为 SPIW<sub>60</sub>项的权重系数，北方及西部地区取 0.3，南方地区取 0.5；b 为 MI<sub>30</sub>项的权重系数，北方及西部地区取 0.5，南方地区取 0.6；c 为 SPI<sub>90</sub>项的权重系数，北方及西部地区取 0.3，南方地区取 0.2；d 为 SPI<sub>150</sub>项的权重系数，北方及西部地区取 0.2，南方地区取 0.1；Ka 为季节调节系数，根据不同季节各地主要农作物生长发育阶段对土壤水分的敏感程度确定，在四川省农业气候区，1 到 12 月逐月分别取 1.0, 1.0, 1.1, 1.2, 1.0, 1.2, 1.2, 1.2, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0。

基于以上 3 个指数的计算原理和方法，利用 NCL 编程语言，可以获得日期为当月底，时间尺度分别为 1 个月、3 个月、6 个月的 SPI1、SPI3、SPI6、SPEI1、SPEI3、SPEI6、和 MCI 计算结果。为了方便与 SPI、SPEI 的月尺度指数对比，文中对 MCI 指数的计算选取了每月月底作为计算日期。

### 1.3.4 均方根误差 RMSE

引入均方根误差 RMSE 作为评价适用性的一个指标，其数学表达式如下：

$$RMSE_j^i(x) = \begin{cases} 0, & x \in (True\ interval) \\ \sqrt{\frac{\sum_1^n (\min(x - y))^2}{n}}, & x \cap y = \emptyset, y \in (True\ interval) \\ i \in indexes, j \in times \end{cases} \quad (3)$$

式中：x 是指数估计值；y 是真实域(Trueinterval)，是真实旱情所对应的干旱区间；indexes 是指数类型；times 是时间尺度。可以看出：RMSE 越小则说明该指数与真实情况越接近，并且 RMSE 的值也反映了该指数与真实情况的误差级别。RMSE 的直接计算值即指代某站点在某月份下某个指数与真实值的差异。

## 2 研究结果

### 2.1 三个指数在典型站点典型干旱年份的时间监测适用性分析

选取四川三大地形分区(川东部盆地、川西北高原区、川西南山地区)中的气象站点，分析其在典型干旱年份中的 SPI、SPEI、MCI 指数变化，通过与实际灾情相对比，比较干旱时段、干旱趋势、干旱强度的符合程度，进行 RMSE 检验，得出各指数的适用性排名。

其中，易旱站点根据累积干旱频率和累积干旱事件强度为指标进行筛选；典型干旱年份根据干旱时段包含多、干旱趋势明

显、干旱强度类型多、干旱时段离现今近、可供对比的实际旱情资料丰富详实为指标进行筛选；干旱区间根据历史灾情的文字描述与干旱指数所对应描述的一致性进行选择，最后的筛选结果见下表 2。

表 2 1987~2010 年间四川典型干旱年份及其旱情描述

干旱年份	干旱描述	干旱站点	干旱区间
1993	春旱, 小旱	广元、南充、绵阳、雅安、乐山、宜宾	(-1, -1.5)
1998	重旱	巴塘	(-1.5, -2)
1998	重旱	小金	(-1.5, -2)
2000	重旱	若尔盖、小金	(-1.5, -2)
2002	较轻春旱	绵阳、广元	(-0.5, -1)
2005	重旱	九龙、巴塘、理塘	(-1.5, -2)
2003	一般性春旱	广元、南充	(-1, -1.5)
2006	春旱, 重旱	绵阳、广元	(-1.5, -2)
2006	夏旱, 重旱	绵阳、广元	(-1.5, -2)
2006	伏旱, 特旱	南充、巴中、达县	(-2, ∞)
2009~2010	轻旱, 中旱 重旱, 特旱	越西、雷波、昭觉木里、西昌、盐源、会理	(-0.5, -1) (-1, -1.5), (-1.5, -2) (-2, ∞)

通过李韵婕等<sup>[20]</sup>统计的 1960~2010 年西南地区区域性气象干旱事件的地域分布，限于篇幅，为了反映干旱指数在长周期真实旱情对比下的演变及其 RMSE 检验过程，以川西南山地的会理站为例进行具体阐述。即，首先基于历史灾情，选择 2009 秋~2010 春会理县秋冬春连旱为研究对象，详情描述见表 3，然后从干旱时段、干旱强度、干旱趋势的符合性 3 个方面进行分析，其次结合 RMSE 指标进行计算，最后从 RMSE 指标出发评价 3 个指数的适用性。

图 2~图 3 分别是会理站 2009.07~2010.06 年间不同时间尺度的 SPI、SPEI 逐月演变和 1~12 月间每月月底的 MCI 逐月演变。可以看出，在 2009~2010 年会理县秋冬春连旱的过程中，(1)SPI 指数中 SPI3 能够反映出干旱的时段，并能够与实际旱情相匹配，但不足之处在于没有能准确反映出干旱结束的月份；在干旱强度的演变上，SPI3 反映出与实际干旱发展符合的干旱强度变化的趋势，但在 11、1、2 月的干旱强度上，SPI3 反映的略强；在 RMSE 上，将估计值和最小真实值代入得  $RMSE_{SPI3} = 0.5$ ，反映出 SPI3 与真实旱情进行对比，低估或者高估一个干旱等级。SPI6 反映出了干旱的起始月份，但没有确定出干旱的结束月份；另外 SPI6 在干旱结束时段的强度上，误差较大。 $RMSE_{SPI6} = 0.63$ ，说明 SPI6 反映的误差范围与 SPI1 一致，但是误差更大。SPI1 基本反映出了干旱发生的时段，但在 4、12、11 月的干旱强度上存在一定误差， $RMSE_{SPI1} = 0.8$ ，说明 SPI1 相比 SPI3 和 SPI6，误差更大。(2)SPEI 中 SPEI3 对干旱时段的监测把握的较 SPI3 更好，表现在 5 月份干旱结束时干旱强度接近无旱；在干旱强度的监测上，SPEI3 对 12 月、1 月的干旱强度反应偏弱。 $RMSE_{SPEI3} = 0.34$ ，说明 SPEI3 估计的旱情等级准确，与真实旱情的误差小于一个等级。SPEI6 反映出了干旱演变的趋势，但在强度和干旱时段上把握的并不好。 $RMSE_{SPEI6} = 0.39$ ，说明 SPEI6 与 SPEI3 的检测效果接近；SPEI1 很好的确定了干旱时段，但是在干旱强度的反映上严重偏弱。

RMSE<sub>SPEI1</sub>SPEI=0.79, 说明 SPEI1 的误差范围在一个干旱等级, 监测效果与 SPI1 类似。(3)MCI 指数基本反映出干旱发展的趋势, 但在个别月份监测过强。RMSEMCI=0.59, 监测结果处于 SPI6 与 SPI3 之间, 误差范围为一个干旱等级。

表 3 会理县在 2009~2010 年的旱情描述

类型	干旱强度	干旱时段	旱情描述
秋冬春连旱	重旱-特旱	2009-09~2010-04	2009 年 9 月川西南山地东北部无旱, 10 月四川南部有轻旱, 11 月四川南部存在重旱, 12 月干旱持续发展; 2010 年 1 月四川南部仍有重度气象干旱, 2 月四川南部维持重旱, 3 月旱情持续发展, 四川南部有重旱, 局地有特旱, 4 月西南旱区出现多次降水, 旱情缓解, 但四川南部仍有中度气象干旱

2.2 三个指数在三大地理分区中不同尺度的适用性分析

会理站的分析结果进一步证明 RMSE 是合理的, 因为无论是干旱时段(干旱起始和结束)、干旱强度还是干旱趋势(干旱演变), 它们的误差均包含在 RMSE 中。因此对各个地理分区下站点对应的所有干旱过程(表 2)都做了 RMSE 检验, 平均后结果如图 4~图 7, 可以看出不同区域的指数适用性确实存在明显差异, 具体来说: (1)监测最准确的指数不同: 盆地是 MCI, 高原是 SPI6, 山地是 SPEI3。(2)监测精度不同: 局部上看盆地的 RMSE 最小值为 0.33, 误差范围小于一个干旱等级, 而高原和山地的 RMSE 最小值为 0.5 和 0.66, 误差范围为一个干旱等级; 整体上则是盆地优于山地优于高原。(3)监测不稳定性不同: 盆地和高原的 RMSE 的上分位数和下分位数之间的差小于 0.2, 说明各个指数的表现相差不大, 稳定性高; 山地的则为 0.3, 几乎是盆地和高原的 2 倍, 说明山地各指数之间的表现相差很大, 稳定性差, 也反映出山地存在着最优指数。

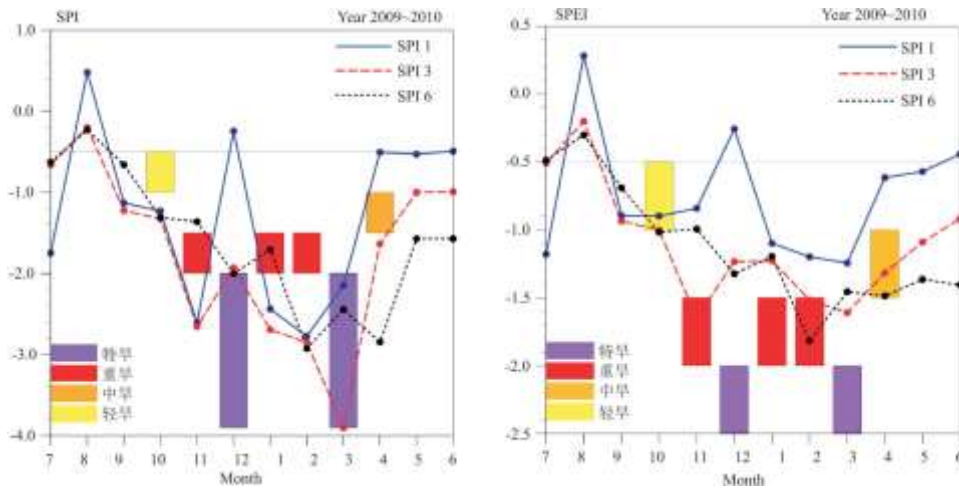


图 2 2009 年 7 月~2010 年 6 月会理站 SPI(左图)和 SPEI(右图)的不同尺度逐月演变图

注: 矩形代表实际干旱区间, 它的颜色反映了干旱等级。

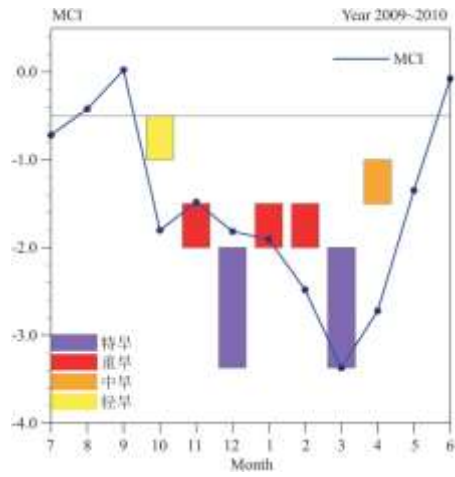


图3 2009年7月~2010年6月会理站MCI每月月底的逐月演变图

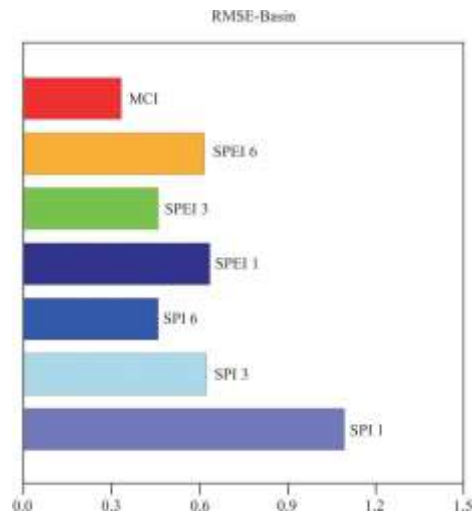


图4 川东部盆地 RMSE 检验结果

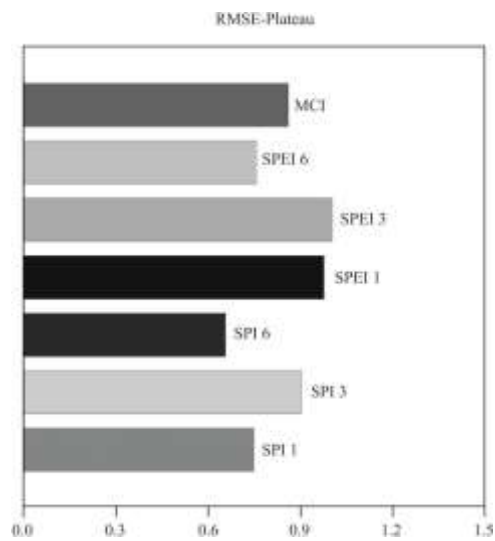


图 5 川西北高原 RMSE 检验结果

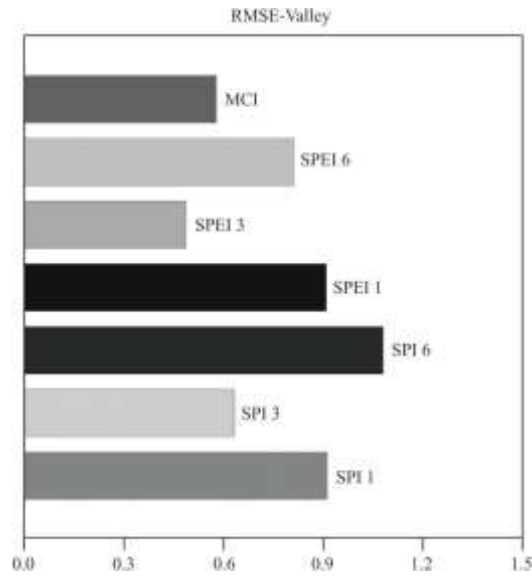


图 6 川西南山地 RMSE 检测结果

根据各区域的 RMSE 分布进行排名后可得三大地理分区中 SPI、SPEI、MCI 指数不同尺度下的总排名，见表 4 所示。

可以看出，RMSE 反映的各区域最佳指数类型不同的原因主要是受气候和地形的影响。表 5 列出了四川各地理分区的气候特征。对于川东部盆地和川西南山地，它们的共同点是都受季风气候影响，这使得它们的降水变率大，导致长周期的重旱、特旱容易发生，反映在指数上则是长周期指数(MCI, SPEI3, SPI6)占优势，这种指数的时间尺度上是否与干旱周期一致还不能确定。另一方面，它们的不同点是气候特色。多云雾使得盆地对蒸发量的变化不敏感，而纬度较低、干热的川西南山地则恰恰相反，两者的差异使得前者适用于对蒸发不敏感的 MCI, 后者适用于依赖蒸发的 SPEI。综上所述，这就解释了为什么盆地的最佳指数是 MCI, 而川西南山地的最佳指数是 SPEI3。而对于川西北高原，高山高寒的气候使得降水具有长期的稳定性，蒸发量很少，反映在指数上则是不依赖于蒸发量的 SPI 指数(SPI1, SPI6)。

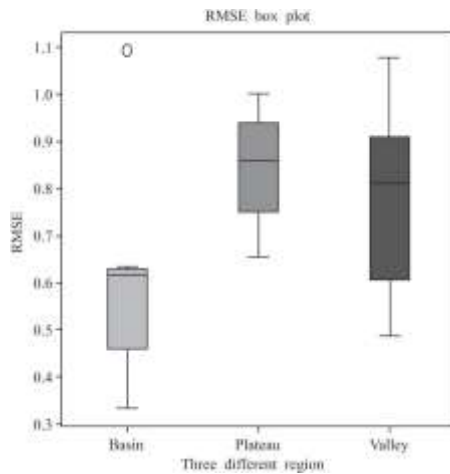


图 7 三个区域内所有指数的 RMSE 箱线图



表 4 SPI、SPEI、MCI 指数在各地理分区的 RMSE 排名

站点	MCI	SPI1	SPI3	SPI6	SPEI1	SPEI3	SPEI6
川东部盆地	1	7	5	2	6	3	4
川西南山地	2	6	3	7	5	1	4
川西北高原	5	1	6	2	4	7	3
单项排名	2.6	4.6	4.6	3.6	5	3.6	3.6
综合排名	2.6		4.2			4	

表 5 四川各地理分区气候特征

	气候类型	气候特色	地形	蒸发量
川东部盆地	亚热带季风型	多云雾	盆地	三者中中等
川西南山地	亚热带季风型	干热河谷	山地	三者中最大
川西北高原	高山型	高寒	高原	三者中最小

### 2.3 三个指数在典型干旱事件过程中的空间监测适用性分析

利用 ArcGIS 软件首先做不同时间尺度的平均 SPI、SPEI、MCI 指数在典型干旱事件过程中的空间插值，然后将空间分析结果与实际旱情进行对比，通过比较干旱强度和干旱范围的符合程度，结合王素萍等人提出的适用性评分标准(表 6)进行打分，最后可得 3 个指数在空间监测上的适用性排名。

表 6 干旱指数监测效果的评分标准<sup>[11]</sup>

	监测结果	监测效果	评分/分
	漏监测	差	0
监测到旱情	程度和范围均有偏差	较差	1
	程度和范围有 1 项符合	一般	2
	程度和范围均符合	较好	3

典型干旱过程根据干旱时段多、干旱范围广和干旱强度类型等多指标进行筛选。表 7 为选取的 4 次干旱过程旱情的具体描述。

表 7 四川省 4 次典型干旱过程旱情描述

类型	干旱强度	干旱范围	旱情描述
春旱	轻旱-中旱	南充、绵阳、遂宁、乐山、宜宾、雅安等大部分地区	春旱。入旱以来，盆地气温回升快、日照多、雨量明显偏少，127 个县(市)不足 1mm,其中广元、南充、广安、绵阳、德阳、成都、雅安、遂宁、内江、乐山、宜宾、自贡等 14 个市近 90 个县(市)受旱较重.在 1961 年以来的 33 年中，1993 年春旱属小旱级，排序为第 28 名 <sup>[18]</sup>
春旱	中旱	成都、德阳、广元、南充等大部分地区、泸州、广安部分地区	2003 年春季，盆地区发生一般性春旱，其主要特点是：开始时间早、范围大、持续时间长.春旱分布在成都、德阳、广元、南充、遂宁、资阳、绵阳、雅安、眉山、内江、巴中大部，泸州、广安两市的个别县 <sup>[18]</sup>
伏旱	重旱-特旱	宜宾、南充、巴中大部分地区	2006 年四川盆地伏旱，四川省东部被高温天气笼罩，广安、遂宁、内江、泸州、资阳五市和宜宾、自贡、南充三市大部、达州市及三台、巴中共 45 县(市)7~8 月日极端最高气温均突破 40℃,特别是四川省东部和中部地区，温度平均偏高 3℃~4℃ <sup>[14]</sup> .盆地东部，南部为特旱，川西北高原南部为重旱，北部为中旱或者轻旱，川西南山地为中旱或者轻旱
秋旱 冬旱 春旱	轻旱-中旱 -重旱-特旱	四川南部	2009 年 9 月川西南山地东北部无旱，10 月四川南部有轻旱，11 月四川南部存在重旱，12 月干旱持续发展.2010 年 1 月四川南部仍有重度气象干旱，2 月四川南部维持重旱，3 月旱情持续发展，四川南部有重旱，局地有特旱，4 月西南旱区出现多次降水，旱情缓解，但四川南部仍有中度气象干旱 <sup>[11]</sup>

限于篇幅，以上 4 次干旱过程中选取 2006 年 7~8 月发生在川东部盆地的严重伏旱过程为例，通过分析干旱强度和干旱范围的符合性来评价 3 个指数在空间监测上的适用性。

图 8 显示的是 2006 年伏旱期间(7~8 月)SPI 月平均干旱指数分布。可以看出，SPI1 反映四川几乎全部地区都出现了旱情，其中盆地大部、川西北高原、川西南山地旱情特别严重，表现为巴中、南充、宜宾、乐山、雷波、会理干旱等级为特旱；SPI3 反映的情况与 SPI1 比较类似，但在盆地东部和川西北高原局部反应的旱情有所减弱，表现为巴中变为重旱、甘孜变为中旱；SPI6 延续了 SPI3 的趋势，巴中和甘孜的旱情进一步减弱，变为中旱、无旱。综上可知，将以上不同时间尺度表现的旱情与实际旱情对比可以得出空间监测效果得分排名为：SPI3(2.75 分)>SPI1(2 分)>SPI6(1.75 分)。

图 9 显示的是 2006 年伏旱期间(7~8 月)SPEI 月平均干旱指数分布。可以看出，SPEI1 反映出四川大部均出现了旱情，旱情大部分为中旱，旱情较为严重的地方集中在盆地东部、盆地南部、川西北高原南部 3 个地区，表现为巴中、南充、宜宾、九龙出现了重旱；SPEI3 相比 SPEI1 不同之处在于盆地西部和东部旱情减弱，表现为巴中变为无旱、绵阳变为轻旱；另外在川西北高原北部旱情有所加强，表现为松潘、若尔盖变为中旱。SPEI6 则增强了盆地的旱情，表现为绵阳、巴中变为中旱；SPEI12 反映了旱情主要集中在盆地西部、盆地南部，大部分地区干旱等级为中旱，部分地区为重旱(例如绵阳、宜宾旱情为重旱)。综上可

知，将以上不同时间尺度表现的旱情与实际旱情对比可以得出监测效果得分排名为：SPEI6(2分)>SPEI12(1.4分)>SPEI1(1.75分)=SPEI3(1.75分)。

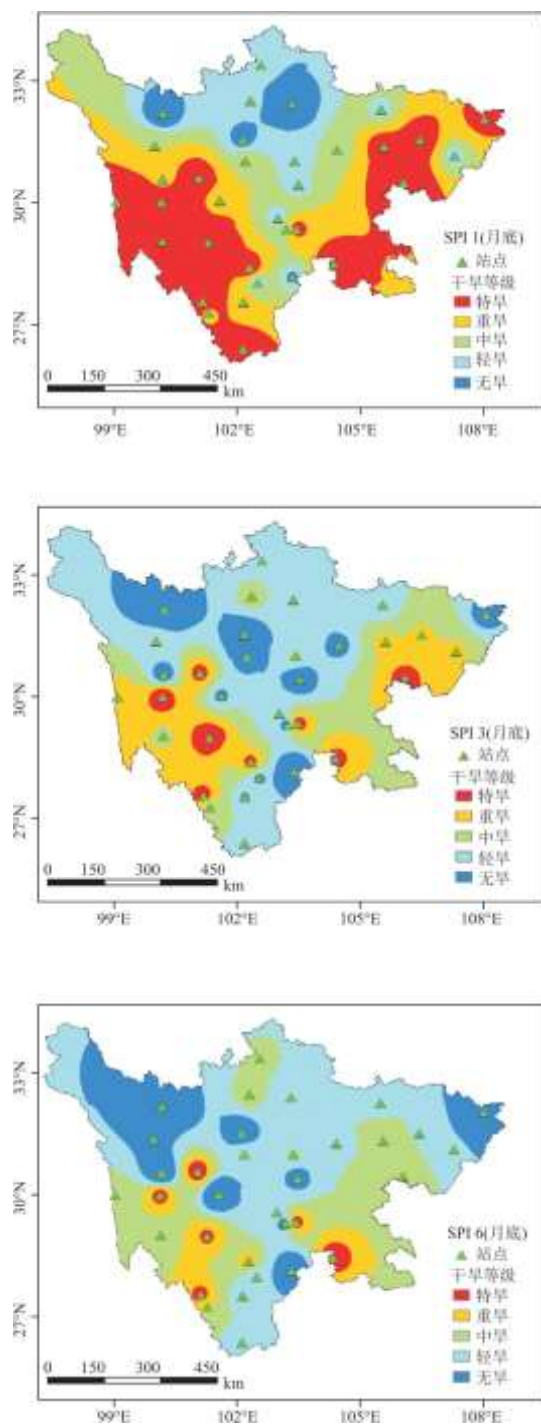


图 8 2006 年 7~8 月 SPI1、SPI3 和 SPI6 指数的平均空间分布

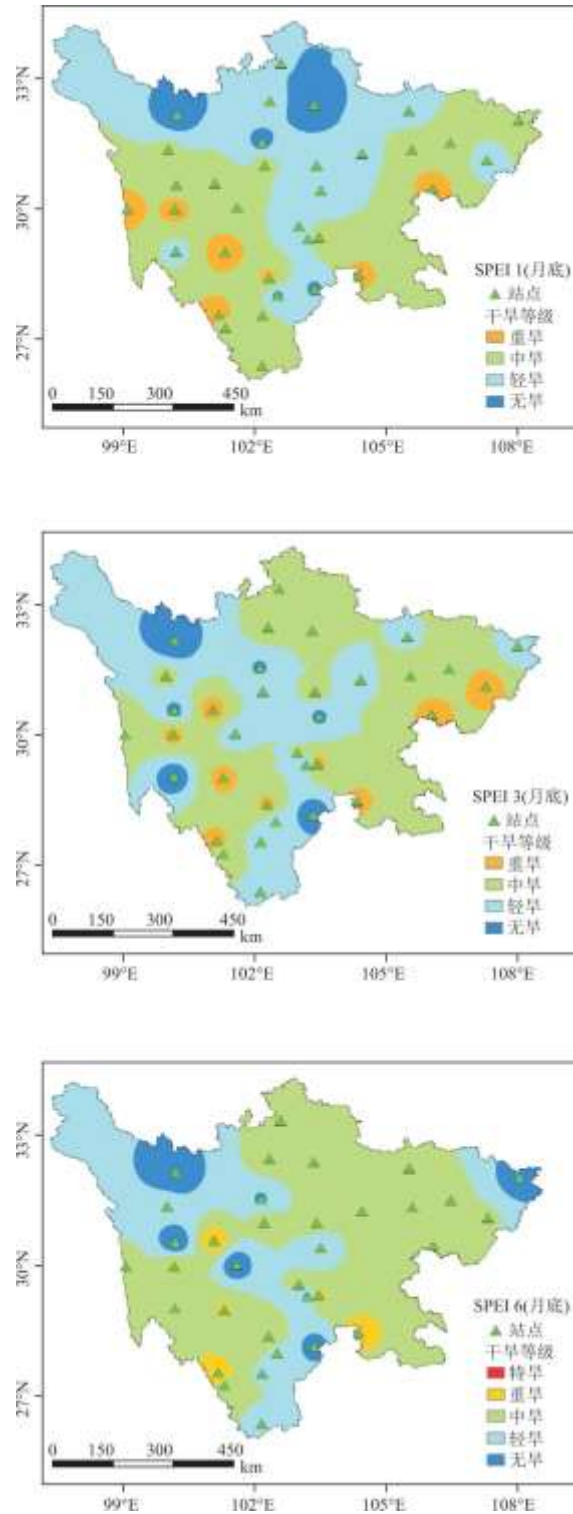


图 9 2006 年 7~8 月 SPEI1、SPEI3 和 SPEI6 指数的平均空间分布

图 10 显示的是 2006 年伏旱期间 (7 月 31 日和 8 月 31 日) MCI 日平均干旱指数分布。可以看出, MCI 反映四川大部均出现旱情, 干旱等级在重旱以上的位于川西北高原北部和盆地东南部, 表现为若尔盖、宜宾、乐山、南充、雷波为特旱。盆地西部、东部和川西北高原南部旱情较弱, 表现为绵阳、巴中为中旱, 甘孜为无旱。综上可知, 将 MCI 表现的旱情与实际旱情对比可以

得出监测效果得分为 2 分。

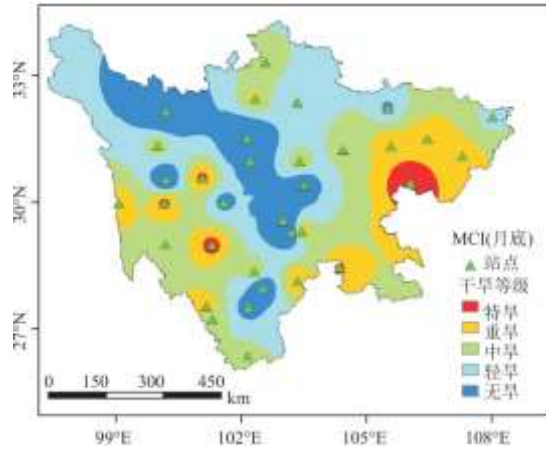


图 10 2006 年 7~8 月 MCI 指数的平均空间分布

对其他 3 次干旱过程也做了类似分析，最后可得 3 个指数在 4 次干旱事件过程中基于不同时间尺度的空间监测效果单项和综合评分，结果见表 8。

表 8 SPI、SPEI 和 MCI 在 4 次干旱过程不同时间尺度的监测效果得分

干旱过程	SPI1	SPI3	SPI6	SPEI1	SPEI3	SPEI6	MCI
1994 年 7~8 月	1.5	1.75	1.8	1.75	1.75	1.2	2.75
2000 年 5~6 月	1.8	1.8	1.2	1.5	2	1.5	2.5
2006 年 7~8 月	2	2.75	1.75	1.75	1.75	2	2
2010 年 1~4 月	1.5	2.5	1.8	2	2.75	1.75	2.5
单项得分	1.7	2.2	1.6	1.8	2.1	1.6	2.4
综合得分		1.8			1.8		2.4

可以看出，从单项得分来说，SPI3、MCI、SPI1 为得分前 3 名，且差距较小；SPEI3、SPI6 得分相同，并列第 4 名。以上得分普遍在 2 分左右，说明这些指数在干旱强度和干旱范围上至少有一项符合，具有较好的适用性。从综合得分来看 MCI 表现最好，SPI 次之，SPEI 最差。综述可得 3 个指数在不同时间尺度下反映的空间监测效果适用性排名为 MCI>SPI3>SPEI3>SPEI1>SPI1>SPEI6=SPEI6。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

本文利用四川省 34 个气象站点 1987~2016 年间日降水和日平均气温数据，通过 NCL 编程语言，分别选取三大地形分区中

的可用站点,首先在不同时间尺度上对3个指数在典型干旱年份进行了分析,然后利用 ArcGIS 软件对不同时间尺度的平均 SPI、SPEI、MCI 指数在典型干旱事件过程中进行空间插值,最后从 RMSE 和评分法将结果与《中国气象灾害大典(四川卷)》、《四川水旱灾害》及相关文献及统计年鉴中的实际旱情进行时空监测效果和适用性排名,主要得出以下结论:

(1)总体上,时间序列分析与空间插值分析得出的结果是基本一致的。从3个指数的整体表现来看,MCI最好,SPEI和SPI类似;从3个指数不同时间尺度分类表现来看,适用性排名前三位为MCI、SPI3、SPEI3。

(2)从气候和地形分区来看,以川东部盆地为代表的亚热带季风气候,在干旱监测上适合用MCI,其监测误差范围小于一个干旱等级;以攀西地区(川西南山地)为代表的干热河谷气候,在干旱监测上适合用SPEI3,其监测误差为一个干旱等级;以川西北高原为代表的高原气候,在干旱监测上适合用SPI6、SPI1,其监测误差为一个干旱等级。

(3)从指数的监测误差来看,SPI、SPEI、MCI指数在川东部盆地的监测误差最小,川西南山地次之,川西北高原最大。

### 3.2 讨论

虽然干旱指数在监测干旱时确实表现优异,但是在某些方面仍然存在问题。例如MCI指数在某些干旱过程中反映偏重,这与王春学等人的结论相似<sup>[21]</sup>,SPEI指数在大多数干旱过程反映偏弱,长时间尺度的SPI和SPEI指数在干旱监测的表现很差。通过进一步深入思考,认为引起这些问题出现的原因可能是:(1)气象站不能代表一个区域,尤其是在夏季局地性降水强的时段,往往出现气象站还在干旱,但周边早已结束干旱的情况,这就造成干旱指数与旱情描述的不准确。(2)干旱的结束不容易被衡量。在长时间的干旱中,结束干旱的往往是一场暴雨,但从长时间角度来看,干旱仍然存在,而在干旱记载中往往以此作为干旱结束的标志,这就造成干旱指数估计过强。(3)蒸发量的计算。在经典的Thornthwaite公式下,蒸发量仅仅是温度的函数,这就忽略了下垫面情况、相对湿度、风等其他因素,造成干旱指数的不准确。(4)MCI中季节条件参数,没有进行细化,把西部地区归为一类,忽略了更小范围的地区差异,特别是针对四川多样的气候类型,从而造成干旱指数的不准确。(5)受历史旱情记载有限影响,如川西南山地和川西北高原的旱情记载极为有限,使得研究的历史旱情样本数较少,分析结果还不够全面。另外,由于本文的研究主要针对历史时期的典型干旱过程和干旱年份,借助RMSE指标和评分法对多时间尺度指数所反映的干旱强度、干旱范围等与实际旱情的符合度进行重点研究,没有对气候平均角度下的适用性进行分析,因而对以上一些存在问题可以根据数据资料的完备性在后续更待进一步进行深入的分析与探讨。

### 参考文献:

[1]许凯.我国干旱变化规律及典型引黄灌区干旱预报方法研究[D].北京:清华大学,2015.

[2]VICENTE-SERRANO S M,BEGUERIA S,LOPEZ-MORENO J I,et al.Performance of drought indices for ecological, agricultural, and hydrological applications[J]. Earth Interactions, 2012, 16(10):1-27.

[3]SURENDRAN U,KUMAR V,RAMASUBRAMONIAM S,et al.Development of drought indices for semi-arid region using drought indices calculator (DrinC)-a case study from Madurai district,a semi-arid region in India[J].Water Resources Management, 2017, 31(11):3593-3605.

[4]杨庆,李明星,郑子彦,等.7种气象干旱指数的中国区域适应性[J].中国科学:地球科学,2017,47(3):337-353.

[5]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,(4):523-529.

- 
- [6]沈国强, 郑海峰, 雷振锋. SPEI 指数在中国东北地区干旱研究中的适用性分析[J]. 生态学报, 2017, 37(11):3787-3795.
- [7]熊光洁, 王式功, 李崇银, 等. 三种干旱指数对西南地区适用性分析[J]. 高原气象, 2014, 33(3):686-697..
- [8]黄荣辉, 顾雷, 陈际龙, 等. 东亚季风系统的时空变化及其对我国气候异常影响的最近研究进展[J]. 大气科学, 2008, (4):691-719.
- [9]祁倩. 改进的综合气象干旱指数在保山市的适用性分析[J]. 贵州气象, 2017, 41(6):31-35.
- [10]气象干旱等级(GB/T 20481-2017)[S]. 北京: 中国标准出版社.
- [11]王素萍, 王劲松, 张强, 等. 几种干旱指标对西南和华南区域月尺度干旱监测的适用性评价[J]. 高原气象, 2015, 34(6):1616-1624.
- [12]李红梅, 李林, 李万志. 气象干旱监测指标在青海高原的适用性分析[J]. 干旱区研究, 2018, 35(1):114-121.
- [13]杨玮, 谢五三, 王胜, 等. 气象干旱综合监测指数在安徽省的适用性分析[J]. 气象科技, 2018, 46(5):988-998.
- [14]潘妮, 卫仁娟, 詹存, 等. 干旱指数在四川省的适用性分析[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(4):71-78.
- [15]杨淑群. 2006 年灾害性天气预报技术论文集[C]//2006 年四川极端高温干旱分析. 中国气象局国家气象中心与预测减灾司: 中国气象学会, 2006:7.
- [16]四川省水利电力厅. 四川水旱灾害[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [17]四川省人民政府救灾办公室. 四川减灾年鉴[M]. 成都: 四川减灾委员会, 2007.
- [18]詹兆渝, 温克刚. 中国气象灾害大典(四川卷)[M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [19]世界气象组织. 标准化降水指数用户指南[Z]. WMO-No. 1090, 2012.
- [20]李韵婕, 任福民, 李忆平, 等. 1960-2010 年中国西南地区区域性气象干旱事件的特征分析[J]. 气象学报, 2014, 72(2):266-276.
- [21]王春学, 张顺谦, 陈文秀, 等. 气象干旱综合指数 MCI 在四川省的适用性分析及修订[J]. 中国农学通报, 2019, 35(9):115-121.