

文章编号: 1108 - 2786 - ( 2016 ) 1 - 19 - 09

DOI: 10. 16089 /j. cnki. 1008 - 2786. 000096

## 云南省 1961—2012 年干旱时空变化特征

何娇楠 李运刚<sup>1\*</sup> 李雪 黄江成

( 云南大学 云南省国际河流与跨境生态安全重点实验室 ,云南 昆明 650091)

**摘 要:** 基于云南省 126 个气象站点 1961—2012 年逐月降水数据 ,采用标准化降水指数( SPI ) ,分析年度和季节干旱强度、干旱频率以及干旱影响范围的时空变化特征。结果表明: 1) 年尺度上干旱强度呈增强的趋势。春季干旱强度减弱 ,夏、秋季干旱强度增强 ,冬季变化不明显; 82% 站点的干旱强度呈增强的趋势 ,其中滇东地区增强趋势最为显著。2) 滇西北、滇中、滇东南及滇西南部分地区干旱发生频率较高 ,滇东和滇东北地区易出现极旱。春季干旱主要发生在滇西北、滇西地区; 夏季干旱主要发生在滇西、滇西南地区; 秋季干旱集中分布在滇西、滇西南、滇中和滇东北地区; 而全省大部分地区冬季干旱发生频率都较高。3) 近 30 年来干旱影响范围逐渐扩大 ,向区域性、全域性等大范围干旱扩展。从季节变化来看 ,春季和冬季干旱影响范围呈现出减小的趋势 ,夏季和秋季干旱影响范围则表现出扩大的趋势。

**关键词:** 干旱; 标准化降水指数( SPI ); 云南省

中图分类号: P467

文献标志码: A

干旱是最严重的自然灾害之一 ,具有发展速度缓慢、持续时间长、影响范围广和危害严重的特点<sup>[1-2]</sup>。作为最常见、影响最大的气象灾害 ,干旱已经对我国社会经济造成严重影响。据统计 ,1950—2013 年全国年平均受旱面积达  $0.21 \times 10^8 \text{ hm}^2$  ,粮食损失高达  $162 \times 10^8 \text{ kg}$ <sup>[3]</sup>。随着全球气候变暖 ,我国华北和东北南部以及西南地区干旱灾害更加严重<sup>[4]</sup>。西南地区是我国干旱灾害最为频发的地区之一 ,近 60 多年来西南地区的干旱灾害发展具有面积增加、频率增大的特点 ,干旱综合损失率也呈上升趋势<sup>[5]</sup>。21 世纪以来 ,西南地区干旱频率增加的趋势显著 ,干旱化趋势严重<sup>[6-7]</sup>。尤其是近年来发生历史罕见的严重干旱已经引起了广泛的关注。

云南地处低纬高原 ,受西南季风和东南季风的

交互影响 ,表现出明显的干湿季气候特征 ,干旱造成的影响十分显著。如 2009—2012 年云南遭遇了严重的连续 4 a 干旱 ,造成了巨大的社会经济损失。目前针对云南干旱的时空变化已经开展了一些研究 ,彭贵芬等基于 Thornthwaite 水分平衡干燥度指数分析了干旱特征和变化趋势<sup>[8]</sup>; 张万诚等采用综合气象干旱指数分析了极端干旱年的气候特征<sup>[9]</sup>; 周德丽等采用综合干旱气象指数分析了 1970 年以来气象干旱强度的时空变化特征<sup>[10]</sup>; 杨晓静等基于标准化降水指数分析了旱涝频率空间分布以及旱涝站次比、旱涝强度的变化趋势<sup>[11]</sup>。以上研究表明云南干旱强度呈增强的趋势 ,滇中及以东地区增强趋势最为明显。这些研究关注干旱强度变化以及从区域的角度分析干旱变化特征 ,由于云南地形差异大、

收稿日期( Received date): 2015 - 07 - 08; 改回日期( Accepted): 2015 - 09 - 02。

基金项目( Foundation item): 国家自然科学基金项目( 41301099 ,U1202232); 云南省应用基础研究计划项目( 2012FD007) 。[Supported by the projection of National Natural Science of China( 41301099 ,U1202232) and the projection of Basic Research Project of Yunnan Province ( 2012FD007) .]

作者简介( Biography): 何娇楠( 1991 - ) ,女 ,云南丽江人 ,硕士研究生 ,主要从事干旱灾害风险评估研究。[He Jiaonan( 1991 - ) ,female ,born in Lijiang ,Yunnan ,graduate student ,major in drought disaster risk assessment. ] E - mail: Hejiaonan@ 126. com

\* 通信作者( Corresponding author): 李运刚( 1983 - ) ,男 ,云南大理人 ,博士 ,副研究员 ,主要从事气候变化与水文响应研究。[Li Yungang( 1983 - ) ,male ,born in Dali ,Yunnan ,Dr & associate professor ,major in climate change and hydrological responses. ] E - mail: ygli@ ynu. edu. cn

降水区域分布不均,因此有必要利用更密集的站点数据来分析干旱强度、频率、影响范围等特征,以揭示干旱变化的时空分布格局。

目前气象干旱的指标有帕默尔干旱指数(Palmer Drought Severity Index, PDSI)、标准化降水指数(Standardized Precipitation Index, SPI)、综合气象干旱指数、Z 指数、相对湿润指数等。标准化降水指数可消除降水的时空差异,对干旱变化反映敏感,具有多时间尺度的计算特性及资料来源方便等优势,是目前应用最广泛的气象干旱指标之一<sup>[12]</sup>。近年来,国内外许多研究采用 SPI 分析气象干旱的变化特征,如 Julian 采用 SPI 分析了 1964—2011 年巴拉圭的气象干旱<sup>[13]</sup>; Hossein 等人用 12 个月时间尺度的 SPI 研究了 1966—2005 年伊朗的干旱时空分布特征<sup>[14]</sup>; Milan 使用 SPI 分析了塞尔维亚 1980—2010 年的干旱时空分布特征<sup>[15]</sup>。肖明忠以 6 个月尺度的 SPI 值表征珠江流域干旱状况,研究珠江流域干旱时间演变特征<sup>[16]</sup>。闫峰等基于 SPI 分析了河北省 50 年来的干旱时空分布特征<sup>[17]</sup>。周扬等采用 SPI 分析了内蒙古地区年、四季干旱发生频率、干旱强度和站次比的演变特点<sup>[18]</sup>。李剑锋等运用 SPI 分析了新疆地区干旱强度和干旱历时的变化趋势<sup>[19]</sup>。本文将采用 SPI 指数,分析近 50 多年来云南省干旱强度、干旱频率和影响范围的时空变化特征,为防灾减灾和水资源管理等提供依据。

## 1 数据来源与方法

### 1.1 数据来源

本文所使用的降水资料为云南省气象局提供的云南省 126 个气象站 1961—2012 年的逐月降水数据。为了保证数据的完整性和一致性,剔除数据时间序列较短的曲靖站和泸水站以及受站点搬迁影响的元阳站和西盟站。分析所用的 122 个气象站点海拔为 139~3 319 m, 85% 的站点海拔高于 1 500 m, 其中滇中和滇东地区台站较为密集,滇西北和滇西南站点相对稀疏(图 1)。云南省 1953—2013 年旱灾受灾面积、成灾面积和绝收面积数据来源于中华人民共和国农业部种植业管理司。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 标准化降水指数

SPI 是美国学者 McKee 于 1993 年提出的<sup>[20]</sup>,其计算公式为:

$$SPI = S \frac{t - (c_2 t + c_1) t + c_0}{[(d_3 t + d_2) t + d_1] t + 1.0} \quad (1)$$

式中  $t = \sqrt{\ln \frac{1}{G(x)^2}}$ ,  $G(x)$  为与  $\Gamma$  函数相关的降水分布概率;  $x$  为降水样本值,  $S$  是概率密度正负系数;  $c_0, c_1, c_2$  和  $d_1, d_2, d_3$  是  $\Gamma$  样本函数转化为累积频率简化近似求解公式的计算参数,具体取值为:  $c_0 = 2.515\ 517$ ,  $c_1 = 0.802\ 853$ ,  $c_2 = 0.010\ 328$ ,  $d_1 = 1.432\ 788$ ,  $d_2 = 0.189\ 269$ ,  $d_3 = 0.001\ 308$ 。当  $G(x) > 0.5$  时,  $S = 1$ ; 当  $G(x) \leq 0.5$  时,  $S = -1$ 。  $G(x)$  由  $\Gamma$  函数概率密度积分公式求得,公式为:

$$G(x) = \frac{2}{\beta^\gamma \Gamma(\gamma)} \int_0^x x^{\gamma-1} e^{-x/\beta} dx, x > 0 \quad (2)$$

式中  $\gamma, \beta$  分别为  $\Gamma$  分布函数的形状和尺度参数。

SPI 可以用于不同时间尺度的干旱变化研究,分别计算云 β 南省 122 个站点 3 月、12 月时间尺度的 SPI-3、SPI-12,来分析四季、年的干旱时空分布特征。根据 SPI 值将干旱分为不同等级,  $-1.49 < SPI < -1.00$  为中旱,  $-1.99 < SPI < -1.50$  为重旱,  $SPI < -2.00$  为极旱。

#### 1.2.2 干旱评估指标

1) 干旱强度 ( $S$ )。  $S$  用来评价干旱严重程度,表示某站点在一段时间内的干旱强度<sup>[16]</sup>。用 SPI 值反映, SPI 值为负值表示干旱,其绝对值越大,干旱强度越严重。分别计算 122 站的 SPI 值来反映各站点的干旱强度,利用泰森多边形法求得云南省平均降水量并计算 SPI 值反映云南省干旱强度的变化。

2) 干旱频率 ( $P_i$ )。根据不同程度干旱发生的年数计算相应等级的干旱发生频率,计算公式为<sup>[11]</sup>:

$$P_i = (n/N) \times 100\% \quad (3)$$

式中  $n$  为某站点发生干旱的年数;  $N$  为降水资料年数; 下标  $i$  为某站点。为了便于分析比较,将中旱(含中旱)以上发生年份记为干旱年份,计算结果对应干旱频率;将重旱(含重旱)以上发生年份记为重旱年份,结果对应重旱频率;将极旱(含极旱)发生年份记为极旱年份,结果对应极旱频率。基于 1961—2012 年各站点 SPI 值,分别计算各站点不同等级的干旱频率,在 ArcGIS10.0 软件中利用反距离权重插值法绘制干旱频率分布图。

3) 干旱站次比 ( $P_j$ )。  $P_j$  是用某一区域内干旱发生站点数占全部站点数的比例来评价干旱影响范围的大小,表达公式为<sup>[11]</sup>:

$$P_j = (m/M) \times 100\% \quad (4)$$

式中  $m$  表示发生干旱的站点数,  $M$  表示研究区域内总气象站点数, 下标  $j$  表示不同年份代号。干旱站次比表示一定区域内干旱发生范围的大小, 也间接反映干旱影响范围的严重程度。当  $P_j \geq 50\%$  时, 表示研究区内有一半以上的站点发生干旱, 为全域性干旱; 当  $33\% \leq P_j < 50\%$  时为区域性干旱; 当  $25\% \leq P_j < 33\%$  时为部分区域性干旱; 当  $10\% \leq P_j < 25\%$  时为局域性干旱;  $P_j < 10\%$  时无明显干旱发生。

### 1.2.3 Mann-Kendall 趋势检验法

采用世界气象组织建议使用的非参数 Mann-K

Kendall 趋势检验分析法(简称 M-K 法)研究标准降水指数的变化趋势。M-K 趋势检验法通过统计量  $Z$  值来确定变化趋势。当显著性水平为 0.05 时,  $Z > 1.96$  表示观测序列呈显著上升的趋势;  $Z < -1.96$  表示观测序列呈显著下降的趋势<sup>[16]</sup>。由于 Sen 式斜率能避免时间序列数据缺失及数据分布形态对分析结果的影响, 并剔除异常值对时间序列的干扰<sup>[21]</sup>。因此本文采用 Sen 式斜率计算云南省各站点的标准降水指数变化趋势的幅度。

## 2 结果分析

### 2.1 干旱强度的时空变化特征

#### 2.1.1 年干旱强度变化

图(2)为云南省干旱强度变化趋势及空间变化格局。由[图2(a)]可知, 1961—2012年共9 a发生干旱, 干旱频率为17.3%。其中, 1969年、1980年、1988年、1989年和1992年发生中旱, 2003年和2012年发生重旱, 2009年和2011年发生极旱。从5 a滑动平均曲线可以看出, 2000年以后 SPI 值急剧下降, 说明干旱化的趋势增强。另外, 2000年以来4 a发生干旱, 干旱等级都是重旱和极旱, 表明近10年来干旱发生频率、强度均呈增加的趋势。1961—2012年间, SPI 值呈下降的趋势[变化率为  $-0.15/(10 \text{ a})$ ], 虽然没有通过0.05的显著性水平检验, 但也反映出云南省干旱强度增强的趋势。

云南省122个站点 SPI-12 值的 M-K 趋势分析结果如[图2(b)]所示。云南省82%站点的 SPI

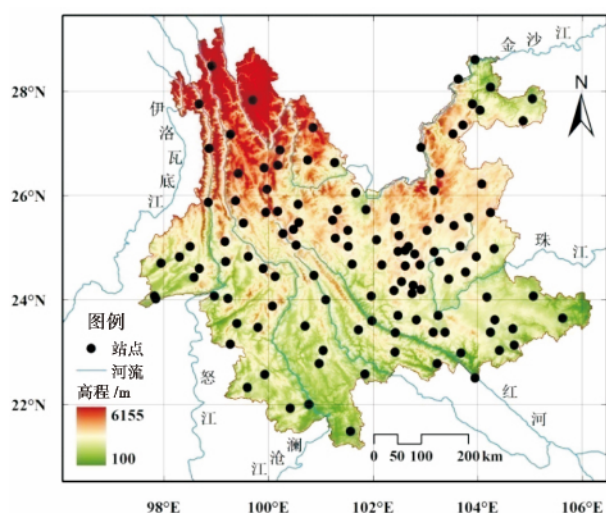


图1 云南省气象站点分布图

Fig. 1 Location of meteorological stations in Yunnan Province

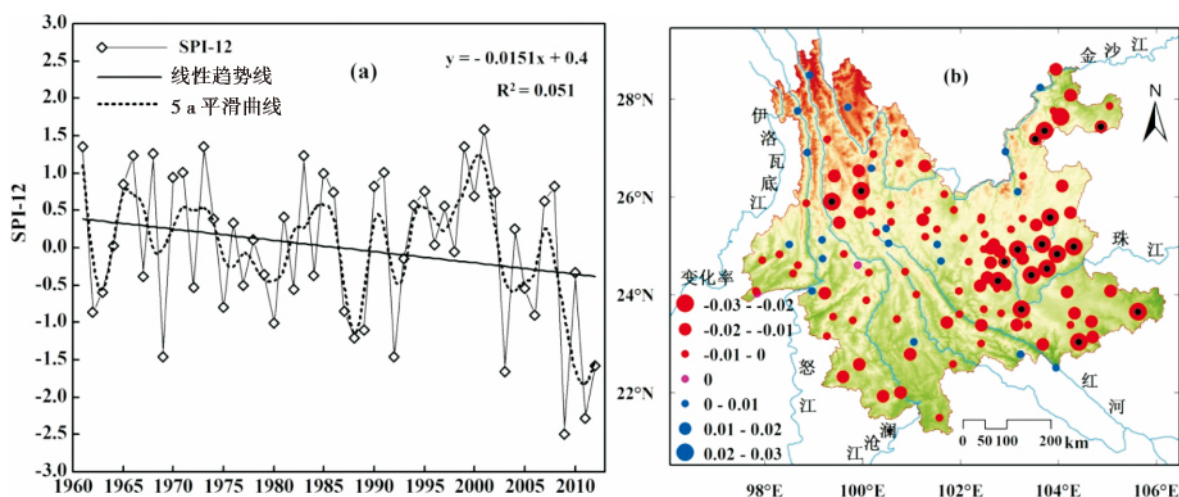


图2 年干旱强度变化趋势及空间变化格局

Fig. 2 Trend and spatial distribution of annual drought intensity

值呈下降的趋势,其中 14% 的站点通过 0.05 的显著性水平检验。除了滇西北的站点以外,大部分地区的 SPI 值呈下降的趋势。SPI 值显著下降的站点主要分布在滇东地区,其他站点零星分布在滇东南、滇东北和滇西。以上结果表明云南省大部分站点年干旱强度存在增强的趋势,其中滇东地区站点的增强趋势最为显著。

### 2.1.2 季节干旱强度变化

以 SPI-3 为基础,分析云南省季节干旱强度的变化趋势(图 3)。春季 SPI 值变化趋势如[图 3(a)]所示。1961—2012 年间,春季共 9 a 发生干旱,干旱频率为 17.3%。1966 年、1980 年、1982 年、1992 年和 1995 年发生中旱,1979 年和 1987 年发生重旱,1963 年和 1969 年发生极旱。1990 年以前干旱频率和强度较大,1990 年以后,干旱频率和强度减小。最近 50 多年来,春季 SPI 值呈不显著的上升趋势[变化率为  $0.16/(10\text{ a})$ ],反映出春季变湿润的趋势。

[图 3(b)]为夏季 SPI 值变化趋势。1961—2012 年,夏季共 8 a 发生干旱,干旱频率为 15.4%。1975 年、1988 年、2003 年、2006 年和 2009 年发生中

旱,1989 年发生重旱,1992 年和 2011 年发生极旱。夏季 SPI 值呈下降的趋势[变化率为  $-0.21/(10\text{ a})$ ],且通过了  $\alpha=0.05$  的显著性水平检验,表明夏季干旱强度显著增强。

[图 3(c)]为秋季 SPI 值变化趋势。1961—2012 年,秋季共 7 a 发生干旱,干旱频率为 13.5%。其中 2012 年发生中旱,1962 年、1969 年、2002 年和 2003 年发生重旱,1998 年和 2009 年发生极旱。由图可知,1995 年以后 SPI 负值较小,说明干旱频率和强度增大。最近 50 多年来,秋季 SPI 值呈不显著的下降趋势[变化率为  $-0.12/(10\text{ a})$ ],表明秋季有变干的趋势,且干旱强度增强。

冬季 SPI 值变化趋势如[图 3(d)]所示。1961—2012 年,冬季共 8 a 发生干旱,干旱频率为 15.4%。其中,1989 年和 2009 年发生中旱,1969 年、1979 年和 1986 年发生重旱,1963 年、1974 年和 2010 年发生极旱。1960—1990 年是干旱的高发期,干旱强度较大;1990—2008 年期间干旱发生频率较低;2009 年和 2010 年分别为中旱和极旱。最近 50 多年来,冬季 SPI 值变化趋势不明显[变化率为  $0.014/(10\text{ a})$ ]。

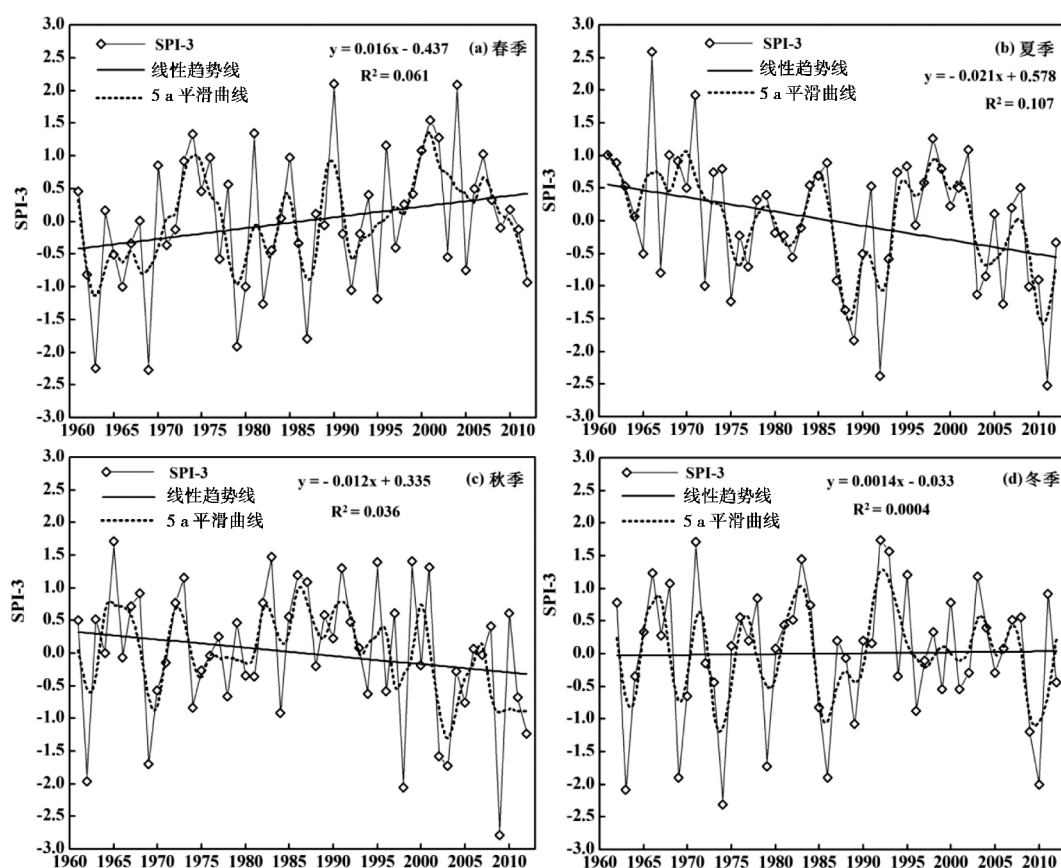


图 3 云南省季节干旱强度变化趋势

Fig. 3 Seasonal trends of drought intensity in Yunnan Province



## 2.2 干旱发生频率时空分布特征

### 2.2.1 年干旱频率空间分布特征

图(4)为云南省不同等级干旱频率空间分布图。由[图4(a)]可知,干旱频率(包括中旱、重旱和极旱)在9.6%~23.5%之间,频率较高的地区主要分布在滇西北的丽江,滇中的楚雄、玉溪,滇东南的红河及滇西南的部分地区;中旱发生频率在1.9%~23.5%之间,其空间分布特征基本与干旱频率一致[图4(b)];重旱发生频率较高的地区主要分布在滇西北的迪庆,滇西的大理、保山,滇中的玉溪,滇东南的红河[图4(c)];极旱发生频率较高的地区集中分布在滇东和滇东北地区[图4(d)]。

### 2.2.2 季节干旱频率空间分布特征

以SPI-3为基础,分析云南省1961—2012年不同季节干旱频率的空间特征(图5)。由[图5(a)]可知,春季干旱发生的频率在7.6%~23.5%之间,滇西北、滇西地区春季干旱发生频率较高,滇中的楚雄、昆明和滇东的曲靖春旱频率较低;夏季干旱

发生频率在9.6%~21.5%之间,除了滇西北的迪庆、滇西南的临沧和滇东南的红河东部干旱频率较低外,其余地区干旱发生频率均较高[图5(b)];秋季干旱发生频率在9.6%~25.5%之间,频率较高的地区集中分布在滇西、滇西南、滇中和滇东北[图5(c)]。由[图5(d)]可知,除了滇西北、滇东南和滇东北的部分地区外,全省大部分地区冬季干旱发生频率都较高。

### 2.3 干旱影响范围年际变化特征

云南省1961—2012年干旱站次比的时间变化如图6所示。由图可知,在年尺度上,干旱站次比在0~72.13%之间变化。近52年来,2a发生全域性干旱(2009年、2011年);区域性干旱5a(1965年、1988年、1992年、2003年和2012年);部分区域性干旱6a(1962年、1963年、1972年、1977年、1980年和1989年);局域性干旱12a(1967年、1975年、1979年、1981年、1982年、1984年、1987年、1993年、1994年、2005年、2006年、2010年)。从以上结果可以发现,区域性干旱主要发生在20世纪80年

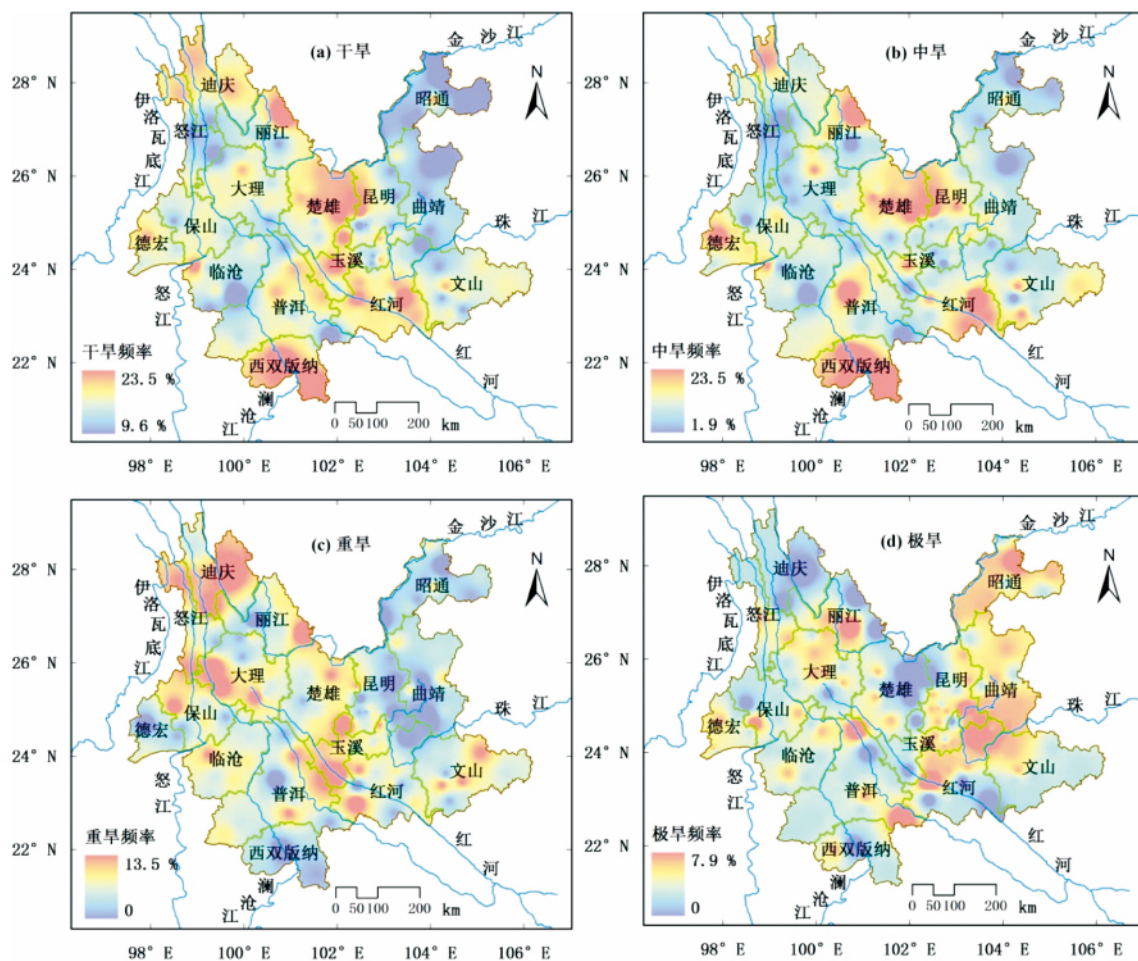


图4 云南省干旱频率分布图

Fig. 4 Spatial distribution of drought frequency in Yunnan Province

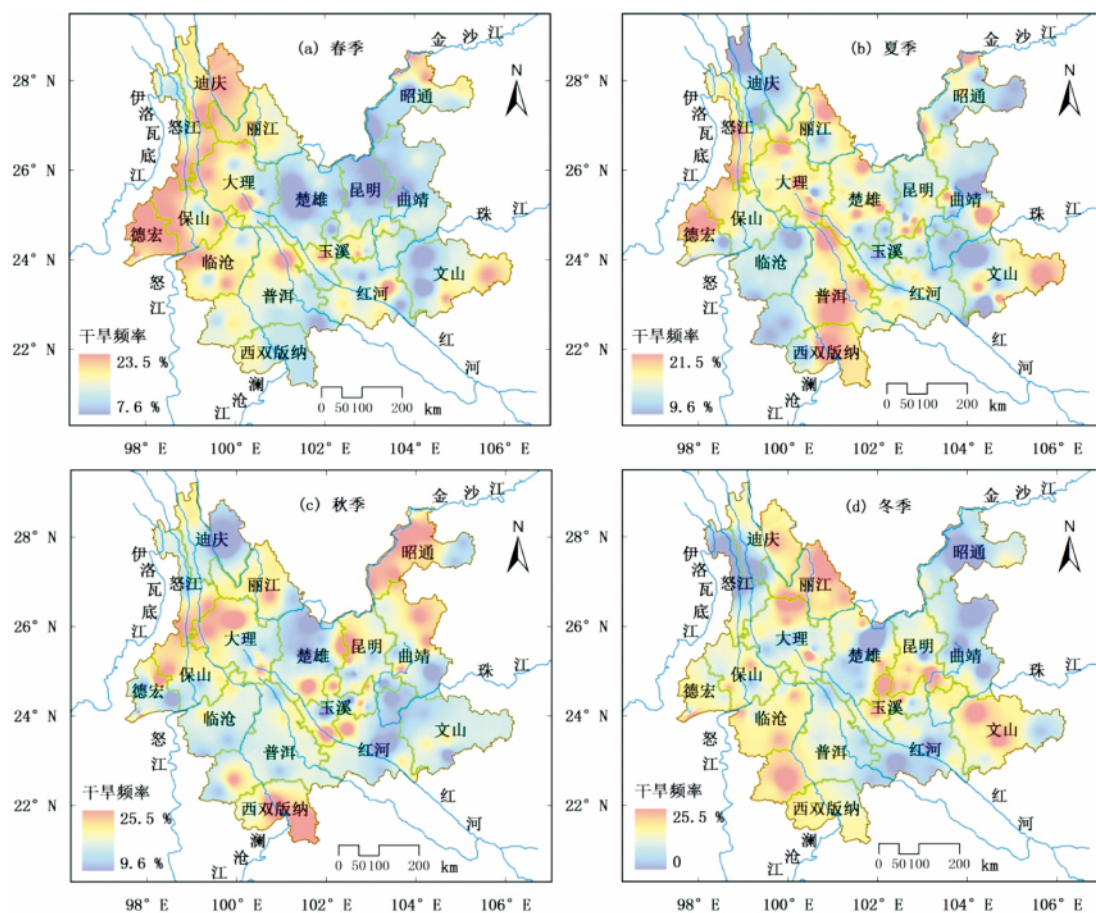


图5 云南省季节干旱频率分布图

Fig. 5 Seasonal spatial distribution of drought frequency in Yunnan Province

代中期之后,而全域性干旱则发生在 21 世纪以来,说明近 30 年以来云南省干旱发生范围逐渐扩大,向区域性、全域性等大范围干旱扩展。

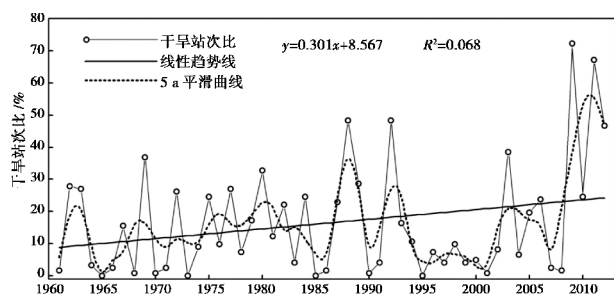


图6 云南省年干旱站次比变化趋势图

Fig. 6 Trend of annual drought stations proportion in Yunnan Province

从站次比的季节变化来看,春季和冬季的站次比呈现出下降的趋势[图 7(a)、7(d)],而夏季和秋季的站次比表现出上升的趋势[图 7(b)、7(c)],这与干旱强度的季节变化基本一致。春季发生全域性干旱 4 a(1963 年、1969 年、1979 年和 1987 年),区

域性干旱 3 a(1982 年、1992 年和 1995 年),大多集中于 20 世纪 60—90 年代。夏季发生全域性干旱 3 a(1989 年、1992 年和 2011 年),区域性干旱 3 a(1988 年、2003 年和 2010 年),大多集中于 20 世纪 80 年代中期以后。秋季发生全域性干旱 3 a(1962 年、1998 年和 2009 年),区域性干旱 5 a(1969 年、1981 年、2002 年、2003 年和 2012 年),多集中于 20 世纪 80 年代以后。冬季发生全域性干旱 7 a(1963 年、1969 年、1974 年、1979 年、1986 年、1989 年和 2010 年),区域性干旱 2 a(1996 年和 2009 年),大多集中于 20 世纪 60—90 年代。

#### 2.4 干旱灾害变化特征

图 8 为 1953—2013 年云南省干旱受灾面积、成灾面积、绝收面积的变化情况。由于 1980 年以前部分年份统计数据缺失,因此仅分析 1980—2013 年旱灾变化情况。云南省 1980—2013 年多年平均受灾面积为  $71.04 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,成灾面积为  $35.6 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,绝收面积为  $8.99 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。其中以 2005 年和 2010 年旱灾最为严重,2005 年受灾、成灾、绝收面积

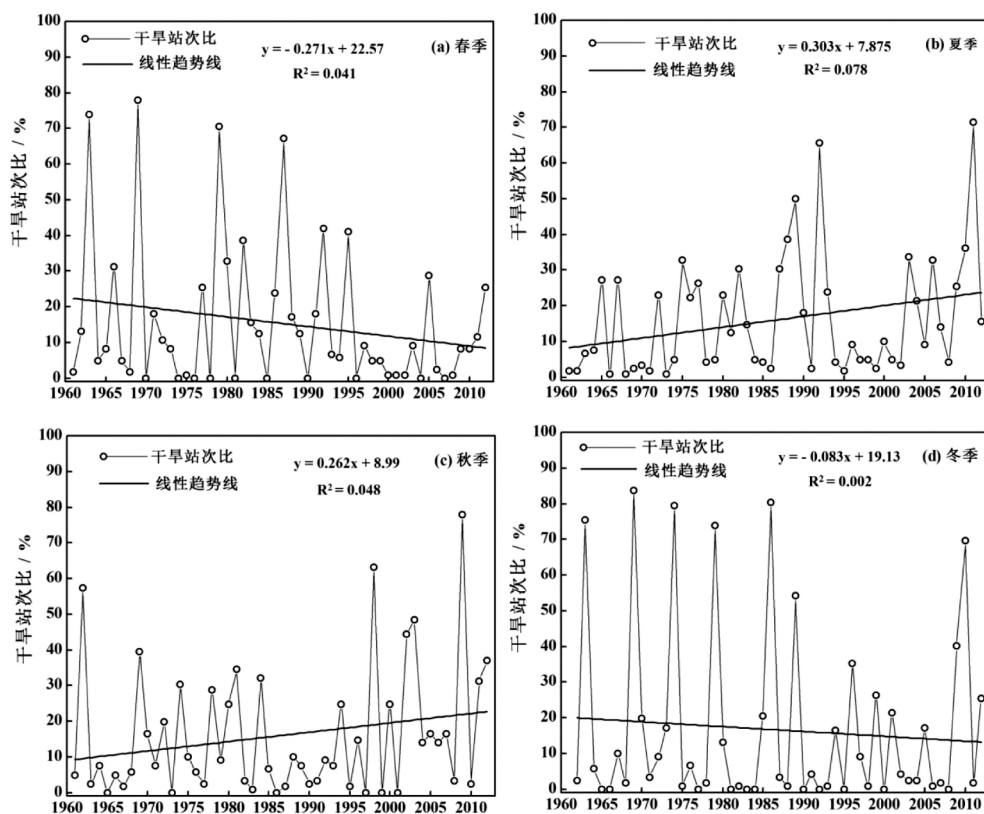


图 7 云南省干旱站次比季节变化趋势图

Fig. 7 Seasonal trends of drought stations proportion in Yunnan Province

分别高达  $205.34 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 、 $119.2 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 、 $23.8 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ; 2010 年受灾、成灾、绝收面积分别高达  $295.72 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 、 $205.09 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 、 $88.17 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。从年代际变化来看, 20 世纪 80 年代和 90 年代受灾面积、成灾面积和绝收面积增加较为缓慢, 而 2000 年以后大幅度增加。综上所述, 近 30 多年来, 云南省旱灾面积整体上呈增加趋势, 尤其是近 10 年来增加明显, 表明云南省干旱灾害发展具有面积增大、频率增加的趋势。

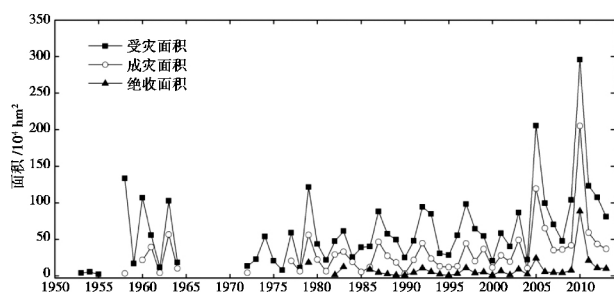


图 8 1953—2013 年云南省干旱受灾面积、成灾面积、绝收面积变化趋势图

Fig. 8 Trends of drought-included areas, drought-affected areas and no harvest areas in Yunnan Province 1953—2013

### 3 结论

利用云南省 122 个气象站点 1961—2012 年逐月降水资料, 计算不同时间尺度的标准化降水指数, 从干旱强度、干旱频率和干旱影响范围 3 个方面分析近 52 年来云南省年、季节尺度干旱的时空变化特征, 得到以下认识:

近 52 年来云南省干旱强度总体上表现出增强的趋势, 尤其是 2000 年以后干旱发生的频率、强度均明显增加。从季节变化来看, 春季干旱强度减弱, 夏、秋两季干旱强度增强, 冬季干旱强度变化不明显。从空间变化来看, 云南省 82% 站点的干旱强度呈增加的趋势, 其中以滇东地区的增强趋势最为显著。已有研究认为西南地区气象干旱是降水量显著减少所致<sup>[4-5, 22]</sup>。最近 50 多年来云南平均降水量趋于减少, 春冬两季增加而夏秋两季减少, 滇东地区降水量明显减少<sup>[23-25]</sup>; 而且云南大部分地区连续最大无雨日数呈增加的趋势, 降水量大于 10 mm 的日数呈减少趋势<sup>[26]</sup>。可见, 云南省降水量减少是干旱强度变化的主要原因。

云南省干旱频率具有明显的区域性和季节性。滇西北、滇中、滇东南地区干旱频率比较高,滇东和滇东北地区容易出现极旱。一般认为滇西和滇西北的东部及金沙江流域是云南省的传统干旱区,研究表明近年来旱区有向滇中、滇东地区扩展的趋势<sup>[9-10]</sup>。值得注意的是,滇西南地区降水相对丰富,然而中旱发生频率较高,这一方面与降水量减少有关;另一方面与标准化降水指数的特点有关,研究表明湿润地区易发生中度等级以上的干旱<sup>[19]</sup>。从季节变化来看,春季干旱频率较高,夏冬两季次之,秋季最小。春季干旱主要发生在滇西北、滇西地区;夏季干旱主要发生在滇西、滇西南地区;秋季干旱集中分布在滇西、滇西南、滇中和滇东北;而全省大部分地区冬季干旱发生频率都比较高。

从干旱影响范围来看,区域性干旱主要发生在20世纪80年代中期之后,而全域性干旱则发生在2000年以来,说明近30年以来云南省干旱发生范围逐渐扩大,向区域性、全域性等大范围干旱扩展。从季节变化来看,春季和冬季的干旱影响范围呈现出减小的趋势;夏季和秋季的干旱影响范围则表现出扩大的趋势。

20世纪80年代以来,云南省各年代干旱受灾面积、成灾面积和绝收面积呈增加的趋势,尤其是近10年来增加趋势明显,这与本文干旱强度、影响范围变化等分析结果一致,表明云南省干旱灾害呈现出加重的趋势。

本文采用的标准化降水指数计算简单、数据容易获取,基本能够反映干旱的长期变化特征。然而它只考虑了降水因素,未考虑气温、蒸发等因素的影响,本身还存在一些不足。仅利用SPI指数还不能全面反映云南省干旱变化的所有特点,因此有必要结合其他干旱指标对干旱演变特征进行深入研究。

## 参考文献 (References)

- [1] Mishra A K, Singh V P. A review of drought concepts [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 391(1): 202–216
- [2] 杜华明, 延军平. 西秦岭地区气候变化特征与干旱灾害趋势 [J]. *山地学报*, 2014, 32(1): 58–65 [Du Huaming, Yan Junping. Characteristics of climatic change and trend of aridity in West Qinling [J]. *Mountain Research*, 2014, 32(1): 58–65]
- [3] 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(2013) [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014. [The State Flood Control and Drought Relief Headquarters, The ministry of Water Resources of the People's Republic of China. *China floods and droughts communiqué* (2013) [M]. Beijing: China Water Conservancy Press, 2014.]
- [4] 黄荣辉, 刘永, 王林, 等. 2009年秋至2010年春我国西南地区严重干旱的成因分析 [J]. *大气科学*, 2012, 36(3): 443–457 [Huang Ronghui, Liu Yong, Wang Lin, et al. Analyses of the causes of severe drought occurring in Southwest China from the fall of 2009 to the spring of 2010 [J]. *China Journal of Atmospheric Sciences*, 2012, 36(3): 443–457]
- [5] 韩兰英, 张强, 姚玉璧, 等. 近60年中国西南地区干旱灾害规律与成因 [J]. *地理学报*, 2014, 69(5): 632–638 [Han Lanying, Zhang Qiang, Yao Yubi, et al. Characteristics and origins of drought disasters in Southwest China in nearly 60 years [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(5): 632–638]
- [6] 熊光洁, 张博凯, 李崇银, 等. 基于SPEI的中国西南地区1961—2012年干旱变化特征分析 [J]. *气候变化研究进展*, 2013, 9(3): 192–198 [Xiong Guangjie, Zhang Bokai, Li Chongyin, et al. Characteristics of drought variations in southwest China in 1961–2012 based on SPEI [J]. *Progressus Inquisitiones De Mutatione Climatis*, 2013, 9(3): 192–198]
- [7] 贺晋云, 张明军, 王鹏, 等. 近50年西南地区极端干旱气候变化特征 [J]. *地理学报*, 2011, 66(9): 1179–1188 [He Jinyun, Zhang Mingjun, Wang Peng, et al. Climate characteristics of the extreme drought events in southwest China during recent 50 years [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(9): 1179–1188]
- [8] 彭贵芬, 刘瑜, 张一平. 云南干旱的气候特征及变化趋势研究 [J]. *灾害学*, 2009, 24(4): 40–44 [Peng Guifeng, Liu Yu, Zhang Yiping. Research on characteristics of drought and climatic trend in Yunnan Province [J]. *Journal of Catastrophology*, 2009, 24(4): 40–44]
- [9] 张万诚, 郑建萌, 任菊章. 云南北端气候干旱的特征分析 [J]. *灾害学*, 2013, 28(1): 59–63 [Zhang Wancheng, Zhang Jianmeng, Ren Juzhang. Climate characteristics of extreme drought events in Yunnan [J]. *Journal of Catastrophology*, 2013, 28(1): 59–63]
- [10] 周德丽, 袁红明, 周建琴. 1970年代以来云南气象干旱的时空变化分析 [J]. *贵州气象*, 2014, 38(2): 34–37 [Zhou Deli, Yan Hongming, Zhou Jianqin. Analysis of the characteristics of meteorological drought in Yunnan Province Since 1970 [J]. *Journal of Guizhou Meteorology*, 2014, 38(2): 34–37]
- [11] 杨晓静, 左德鹏, 徐宗学. 基于标准化降水指数的云南省近55年旱涝演变特征 [J]. *资源科学*, 2014, 36(3): 474–479 [Yang Xiaojing, Zuo Depeng, Xu Zongxue. Characteristics of droughts and floods analyzed using the standardized precipitation index in Yunnan Province During the Past 55 Years [J]. *Resources Science*, 2014, 36(3): 474–479]
- [12] 王跃峰, 陈兴伟, 陈莹. 基于多时间尺度SPI的闽江流域干湿变化与洪旱事件识别 [J]. *山地学报*, 2014, 32(1): 52–56 [Wang Yuefeng, Chen Xingwei, Chen Ying. Based on multiple time scales of SPI dry/wet conditions variation and identification of flood and drought events in Minjiang River of Fujian [J]. *Mountain Research*, 2014, 32(1): 52–56]
- [13] Julian Baez Benitez, Roger Monte Domecq. Analysis of meteorological drought episodes in Paraguay [J]. *Climatic Change*, 2014, 127: 15–25
- [14] Hossein Tabari, Hira Abghari, Hosseinzadeh Talaei. Temporal trends and spatial characteristics of drought and rainfall in arid and semiarid regions of Iran [J]. *Hydrological Processes*, 2012, 26:



- 3351–3361
- [15] Milan Gocic, Slavisa Trajkovic. Analysis of precipitation and drought data in Serbia over the period 1980–2010[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 494: 32–42
- [16] 肖明忠,张强,陈晓宏. 基于多变量概率分析的珠江流域干旱特征研究[J]. *地理学报*, 2012, 67(1): 83–91 [Xiao Ming-zhong, Zhang Qiang, Chen Xiaohong. Spatial-temporal patterns of drought risk across the Pearl River Basin[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(1): 83–91]
- [17] 闫峰,王艳姣,吴波. 近50年河北省干旱时空分布特征[J]. *地理研究*, 2010, 29(3): 423–428 [Yan Feng, Wang Yanjiao, Wu Bo. Spatial and temporal distributions of drought in Hebei Province over the past 50 years[J]. *Geographical Research*, 2010, 29(3): 423–428]
- [18] 周扬,李宁,吉中会. 基于SPI指数的1981–2010年内蒙古地区干旱时空分布特征[J]. *自然资源学报*, 2013, 28(10): 1694–1704 [Zhou Yang, Li ning, Ji Zhonghui. Temporal and spatial patterns of drought based on standard precipitation index (SPI) in Inner Mongolia during 1981–2010[J]. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(10): 1694–1704]
- [19] 李剑锋,张强,陈晓宏,等. 基于标准降水指标的新疆干旱特征演变[J]. *应用气象学报*, 2012, 23(3): 322–330 [Li Jian-feng, Zhang Qiang, Chen Xiaohong, et al. SPI-based drought variations in Xinjiang, China[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2012, 23(3): 322–330]
- [20] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales [R]. California: Eighth Conference on Applied Climatology. American Meteorological Society. Boston, 1993: 179–184
- [21] 李运刚,胡金明,何大明,等. 1960–2007年红河流域强降水事件频次和强度变化及其影响[J]. *地理研究*, 2013, 32(1): 64–71 [Li Yungang, Hu Jinming, He Daming, et al. Variability of frequency and intensity of heavy rainfall events and its impacts in the Red River Basin during 1960–2007[J]. *Geographical Research*, 2013, 32(1): 64–71]
- [22] 尹晗,李耀辉. 我国西南干旱研究最新进展综述[J]. *干旱气象*, 2013, 31(1): 182–193 [Yin Han, Li YaoHui. Summary of advance on drought study in southwest China[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2013, 31(1): 182–193]
- [23] 陶云,张万诚,段长春,等. 云南2009–2012年4年连旱的气候成因研究[J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2014, 36(6): 866–874 [Tao Yun, Zhang Wancheng, Duan Changchun, et al. Climatic causes of continuous drought over Yunnan Province from 2009 to 2012[J]. *Journal of Yunnan University*, 2014, 36(6): 866–874]
- [24] 陶云,何群. 云南降水量时空分布特征对气候变暖的相应[J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2008, 30(6): 587–595 [Tao Yun, He Qun. The temporal and spatial distribution of precipitation over Yunnan Province and its response to global warming[J]. *Journal of Yunnan University*, 2008, 30(6): 587–595]
- [25] 刘瑜,赵尔旭,黄玮,等. 云南近46年降水与气温变化趋势的特征分析[J]. *灾害学*, 2010, 25(1): 39–44 [Liu Yu, Zhao Erxu, Huang Wei, et al. Characteristic analysis of precipitation and temperature trend in Yunnan Province in recent 46 Years[J]. *Journal of Catastrophology*, 2010, 25(1): 39–44]
- [26] Li Yungang, He Daming, Hu Jinming, et al. Variability of extreme precipitation over Yunnan Province, China 1960–2012[J]. *International Journal of Climatology*, 2015, 35(2): 245–258

## Temporal and Spatial Characteristics of Droughts over Yunnan Province During 1961—2012

HE Jiaonan, LI Yungang, LI Xue, HUANG Jiangcheng

(Yunnan Key Laboratory of International Rivers and Transboundary Eco-security, Yunnan University, Kunming 650091, China)

**Abstract:** This study investigated spatial and temporal variations of droughts over Yunnan Province of China during 1961–2012. On the basis of dataset from 126 meteorological stations covering the region, the standardized precipitation index derived from monthly precipitation was computed and analyzed. Our results indicated that the drought intensity increased in annual scale but different trends are observed in seasonal scale. The drought intensity showed an increasing trend in summer and autumn; however, it exhibited a decreasing trend in spring. The trend of drought intensity in winter was not obvious. A notable feature for drought intensity was that approximately 82% of the stations had increasing trend, and these stations mainly distributed in eastern Yunnan. The drought frequency in the northwestern, central, southeastern and southwestern regions was relatively high. The eastern and northeastern regions were prone to experience extremely drought. The spring drought mostly occurred in the northwestern and western regions, summer drought occurred in western and southwestern regions. The autumn drought mostly taken place in western, southwestern, central and northeastern regions. Most regions were experienced winter drought. The influence area of drought was significant increase in the past 30 years. At seasonal scale, the influence areas of drought present a decreasing trend in spring and winter, in contrast, an increasing trend were found in summer and autumn.

**Key words:** drought; the standardized precipitation index (SPI); Yunnan Province