

The Analysis of Drought Characteristics Based on SPEI in Southwest China in Recent 55 Years

Qiujie Wu, Liya Jin*

Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan
Email: wqjieee@163.com, jinly@lzu.edu.cn

Received: Dec. 30th, 2018; accepted: Jan. 7th, 2019; published: Jan. 14th, 2019

Abstract

According to the observed data of temperature and precipitation from 132 meteorological stations in Southwest China from 1961 to 2015, the drought grade and region in the southwest are divided by Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) and Mann-Kendall trend test method to analyze the spatio-temporal distribution characteristics of drought. The drought is the most serious in Hengduan Mountain and Sichuan basin, followed by the Yunnan-Guizhou plateau and the Guangxi hilly. The trend of drought development in Hengduan Mountains is relatively slow, and it develops fast in Yungui Plateau. Drought occurs frequently in winter and its average duration is the shortest. The development trend of cumulative drought intensity and average drought duration has increased to the whole region in winter. The mild drought develops frequently in all regions in southwest China. The moderate and heavy drought is mainly concentrated in the western part of Hengduan Mountains and the eastern part of Sichuan basin. The extreme drought is mainly concentrated in the central part of the southwest.

Keywords

Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI), Regional Drought, Spatio-Temporal Change, Level of Drought

基于SPEI的近55年我国西南地区干旱特征分析

吴秋洁, 靳立亚*

成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都
Email: wqjieee@163.com, jinly@lzu.edu.cn

*通讯作者。

收稿日期: 2018年12月30日; 录用日期: 2019年1月7日; 发布日期: 2019年1月14日

摘要

根据西南地区132个气象观测站1961~2015年的气温、降水量等观测数据, 通过标准化蒸散指数(SPEI)和Mann-Kendall趋势检验方法将西南地区进行干旱等级和区域划分, 分析干旱的时空分布特征。结果表明: 横断山地和四川盆地干旱最为严重, 云贵高原和广西丘陵边区域次之。横断山地干旱发展趋势较为缓慢, 云贵高原干旱发展最为迅速。冬季是干旱频发季且平均持续时间最短, 累积干旱强度及平均干旱持续时间的发展趋势在冬季达到全域性增加。轻早在西南地区各区域均最易频发, 中旱和重旱主要集中在横断山地西部和四川盆地东部, 特旱主要集聚在西南地区中部。

关键词

标准化蒸散指数(SPEI), 区域干旱, 时空变化, 等级干旱

Copyright © 2019 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

1. 引言

干旱是全球范围内最常见、造成社会影响最大、经济损失最为严重的自然灾害之一。在众多极端气候事件中, 干旱发展速度较为缓慢、持续时间长、影响范围较大、所带来的危害也更为严重[1] [2] [3]。我国作为干旱频发的国家, 其西南地区旱情尤为严重, 在近几年, 干旱影响区域不断扩大, 干旱强度、持续时间、发生频次等都有明显增加趋势。近几十年, 西南地区异常严重的干旱灾害事件主要为2003年秋季西南地区干旱、2005年云南地区春季异常干旱、2006年夏季川渝地区特大干旱以及2009年秋-2010年春西南地区三个季节连旱, 干旱的发生导致河井干涸、田地干裂、农作物减产绝收, 严重危害到居民们的生存[4] [5] [6] [7] [8]。对于干旱的判定指标, 国内外常用的有标准化降水指数 SPI、综合气象干旱指数(CI 指数)、Palmer 干旱指数、降水距平百分率、相对湿度指数等, 并且基于这些指数气象学者们又研究发展出了一些其他的干旱指数: 标准化蒸散发指数 SPEI、侦测干旱指数 RDI、蒸发干旱指数 EDI、标准径流指数 SRI 等[9]-[14]。考虑各种干旱在中国不同区域的适用性, SPI 及 SPEI 指数在中国西南地区适用较优, 但 SPI 指数没有考虑气温因素, 忽略了水分平衡的影响, 干旱效果不佳。SPEI 指数兼顾了降水和蒸发这两个因素, 能很好地表征不同时间尺度的干旱情况[15]-[20]。

对于西南地区干旱的研究, 前人已经获得了诸多的研究成果, 但是对于西南地区地形以及各等级干旱的精细化的特征研究较少。张勃等指出, 四川盆地、若盖尔高原在厄尔尼诺年容易发生干旱, 云贵高原在拉尼娜年干旱发生频率较高[21]。贾艳青等认为, 近 55a 西南春季和年极端干旱程度在空间分布上呈一致的减弱趋势, 重庆、四川与贵州的交界处及四川西北部极端干旱程度明显缓解, 而夏、秋两季极端干旱表现出增强的趋势并有一定的区域性特征[22]。针对西南地区的地形特征, 本文将以月尺度 SPEI 指数作为干旱指标, 分析探讨西南地区各地形区域的干旱演变特征, 并进一步讨论各等级干旱的时空变化, 为西南地区干旱的监测及评估提供科学依据。

2. 资料与方法

2.1. 研究区概况

我国西南地区主要包括重庆市、四川省、贵州省、云南省和广西壮族自治区, 介于 91°21'~112°04'E 和 2°54'~34°19'N, 是世界上地形最为复杂的区域之一。该地区地质构造复杂, 地貌类型多样, 山地、高原、盆地、平原、丘陵均有分布, 主要地形特征为青藏高原、横断山区、云贵高原和四川盆地。因受气候因子的影响较大, 所以西南地区是典型的气候多变区, 主要以亚热带季风气候为主, 冬干夏湿、干湿分明[23]。

2.2. 资料来源及方法

2.2.1. 资料来源

本文数据源于“中国地面气候资料日值数据 V3.0”, 挑选 1960~2015 年西南地区资料序列较为完整的 132 个气象站点的观测资料, 包括逐日降水量(mm)及逐日气温数据(°C)。研究区地形及气象站点分布见图 1。

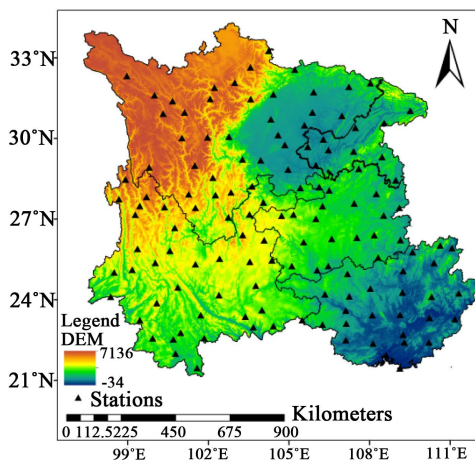


Figure 1. The topography and the location of meteorology stations in Southwest China

图 1. 西南地区地形示意及气象站点分布图

2.2.2. 标准化降水蒸散指数(SPEI)

标准化降水指数 SPI 与标准化降水蒸散指数 SPEI 所使用的计算方法较为一致, 但是 SPEI 指数的计算方法更为完善, 用降水与潜在蒸散之差来替换 SPI 计算中的单一降水异常, 能更好地反映干旱特征[24]。SPEI 指数干旱等级标准按照 SPI 指数干旱等级标准划分, 具体内容见表 1 (正文所有干旱强度均以正值表示)。

Table 1. The drought classification standard of SPEI

表 1. SPEI 指数干旱等级划分标准

SPEI 数值	干旱等级
$-1 < \text{SPEI} < -0.5$	轻旱
$-1.5 < \text{SPEI} < -1$	中旱
$-2 < \text{SPEI} < -1.5$	重旱
$\text{SPEI} \leq -2$	特旱

采用 Thornthwaite 方法计算潜在蒸散量

$$PET = 16K \left(\frac{10T}{I} \right)^m \quad (1)$$

式中: K 为根据纬度计算的修正系数; T 为月平均气温; I 为年总加热指数; m 是由 I 决定的系数。

降水与潜在蒸散量的插值

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

式中, D_i 为降水与蒸散量的差值, P_i 为月降水量, PET_i 为月蒸散量。

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

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

式中, 参数 α 、 β 、 γ 分别为尺度参数、形状参数和位置参数, 分别采用线性矩的方法拟合获得:

$$\alpha = \frac{(w_0 - 2w_1)\beta}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\Gamma\left(1 - \frac{1}{\beta}\right)} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{2w_1 - w_0}{6w_1 - w_0 - 6w_2} \quad (5)$$

$$\gamma = w_0 - \alpha \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \Gamma\left(1 - \frac{1}{\beta}\right) \quad (6)$$

$$w_s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(1 - \frac{i - 0.35}{N} \right)^s D_i \quad (7)$$

式中, $\Gamma(\beta)$ 为 Gamma 函数, N 为参与计算的月份数。

对累积概率密度进行标准化处理

$$P = 1 - F(x) \quad (8)$$

当累积概率 $P \leq 0.5$ 时,

$$\begin{cases} W = \sqrt{-2 \ln P} \\ SPEI = W - \frac{c_0 + c_1 W + c_2 W^2}{1 - d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3} \end{cases} \quad (9)$$

当累积概率 $P > 0.5$ 时,

$$\begin{cases} W = \sqrt{-2 \ln(1 - P)} \\ SPEI = \frac{c_0 + c_1 W + c_2 W^2}{1 - d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3} - W \end{cases} \quad (10)$$

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

2.2.3. 干旱评估指标定义

1) 干旱强度(S_{ij}): 干旱强度可用来表征干旱严重程度, 单站某一时间段内的累积干旱强度可表示为:

$$S_{ij} = \sum_{j=1}^m |SPEI_j|, \text{ 平均干旱强度可表示为: } S_{ij} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m |SPEI_j|。$$

式中, m 表示发生干旱的月数。

2) 干旱频次(F_i): 干旱频次是指干旱事件发生次数, 当连续 1 个月或 1 个月以上月份发生干旱, 即当 $SPEI_i \leq -0.5$ 且 $SPEI_{i+1} > -0.5$ 时, 这个连续过程记为一次干旱事件。

式中: i 表示月数。

3) 干旱站次比(S_j): 用某区域发生干旱站数所占比例来表征该区域干旱影响范围, 可表示为:

$$F_j = \frac{m}{M} \times 100\%$$

式中: m 表示某区域干旱发生站数, M 表示该区域总的气象站数。

2.2.4. Mann-Kendall 趋势检验法

Mann-Kendall 方法是一种非参数统计检验方法, 也称为无分布检验。在计算过程中不需要样本遵从一定的分布, 也不受少数异常值的干扰, 计算简单, 是目前国内外常用的趋势诊断方法之一。当趋势系数小于 0 时, 表示在时间变化上呈下降趋势; 当趋势系数大于 0 时, 表示在时间变化上呈上升趋势。

3. 结果分析

3.1. 西南地区各区域干旱空间分布特征

根据每年西南地区干旱发生频率较高且密集划分干旱区域, 正好与西南地区地形较为吻合, 因此将西南地区分为四个干旱区域: 横断山地区域、四川盆地区域、云贵高原区域、广西丘陵区域。整体来看, 西南地区不同区域其干旱情况都有所差异, 其累积干旱强度、平均干旱强度、干旱发生频次和平均干旱持续时间的分布特征都具有有一致性。从累积干旱强度来看, 横断山地和四川盆地区域干旱程度都较为严重, 分别有 77% 和 72% 的区域站点累积 SPEI 值大于 200; 而云贵高原西部及南部地区和广西丘陵西部及中部地区干旱程度较弱(图 2(a))。西南地区整体干旱程度达到中旱等级, 横断山地区域仅 23% 的站点达到轻旱等级, 无重旱及其以上级别干旱发生; 四川盆地、云贵高原和广西丘陵地区达到轻旱等级的站次比分别为 3.4%、6.5%、和 14.8%, 达到重旱及其以上干旱级别站次比分别为 17.2%、26% 和 22% (图 2(b))。从累积干旱发生频次以及平均干旱持续时间来看, 四川盆地西部及中南边缘处、云贵高原西部及南部和广西丘陵中部及西部地区干旱发生次数较少, 其余地区均为干旱频发区域。各区域平均干旱发生频率分别为 30%、25.6%、22.2% 和 24.6%, 可见横断山地是干旱发生最为频繁区域, 四川盆地次之, 广西丘陵干旱发生频率较低, 云贵高原最不易发生干旱; 干旱持续时间分布特征与干旱频次相反, 干旱发生频次较少区域其对应的平均干旱持续时间较长, 反之, 平均干旱持续时间较短(图 2(c)、图 2(d))。

从趋势系数空间分布分析各区域干旱发展趋势, 图 2(e)~(h) 表明: 横断山地区域累积干旱强度和平均干旱强度有减小趋势, 四川盆地、云贵高原和广西丘陵呈上升趋势。干旱发生频次变化趋势在横断山地北部、四川盆地西北边缘、云贵高原西南地区有明显增加。横断山地、四川盆地西北部及云贵高原西北部干旱持续时间呈增长趋势。

可以看出, 近 55 年西南地区各区域干旱情况都较为复杂, 累积干旱强度较为严重且干旱发生频次较多地区均位于横断山地、四川盆地中部及东部、云贵高原中北部和广西丘陵西北部、南部及东部区域, 且平均干旱强度较小、平均持续时间较短。各气象站点在四川盆地、云贵高原和广西丘陵区域干旱强度有增加趋势, 干旱频次及平均持续时间显著增加的地区大多在横断山地和四川盆地北部以及云贵高原西部。

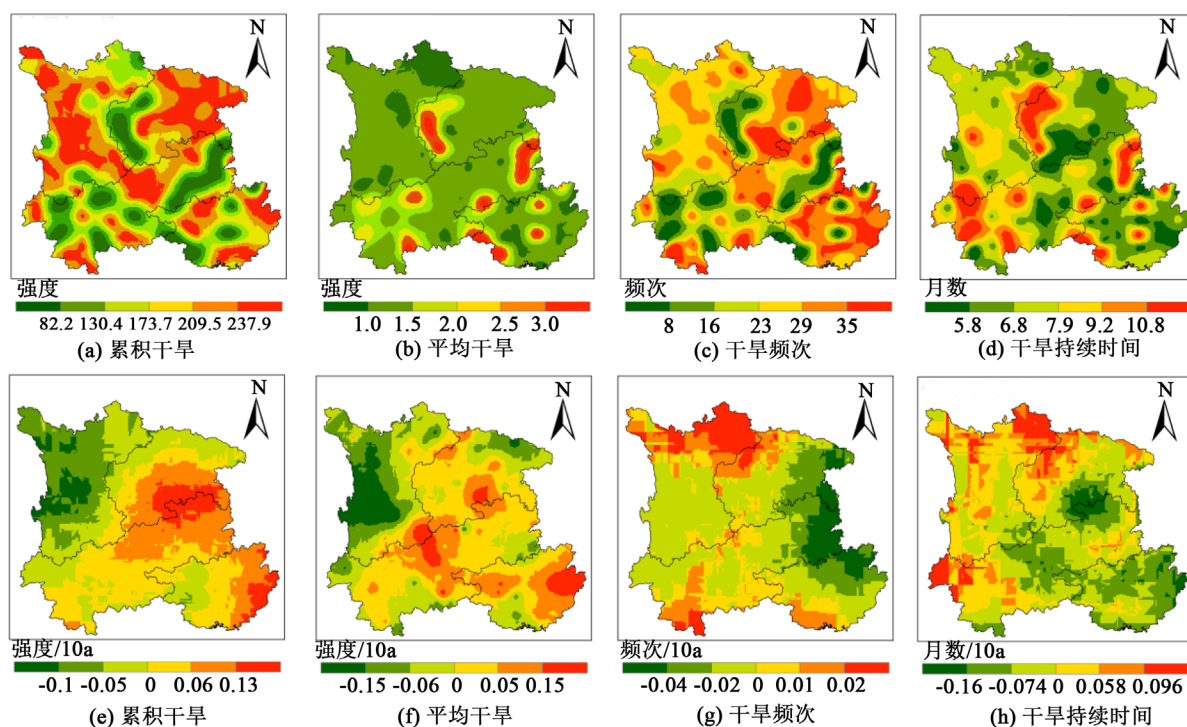


Figure 2. The spatial distribution of accumulated drought intensity, average drought intensity, occurrence frequency, average duration and spacial trends in the southwest regions

图 2. 西南各区域累积干旱强度、平均干旱强度、干旱发生频次、干旱过程和平均持续时间以及年变化趋势系数空间分布

3.2. 区域性干旱时间演变特征

3.2.1. 年际变化特征

从年际变化趋势来看, 各区域累积干旱强度、平均干旱强度、干旱发生频次和平均干旱持续时间都有不同程度的增加趋势。横断山地区域累积干旱强度、平均干旱强度和平均干旱持续时间整体增长趋势较为缓慢, 干旱发生频次无明显变化趋势(图 3(a)~(d)); 四川盆地区域累积干旱强度、平均干旱强度和干旱发生频次有显著增长趋势, 年际倾向率分别为 13/10a、0.06/10a、1.7 次/10a, 平均干旱持续时间增长缓慢(图 3(e)~(h)); 云贵高原区域各统计变量均处于上升趋势, 变化速率分别为 25.3/10a、0.05/10a、2.6 次/10a 和 0.3 月/10a(图 3(i)~(l)); 广西丘陵区域累积干旱强度、平均干旱强度、干旱发生频次变化速率和平均干旱持续时间分别为 7.7/10a、0.03/10a、1.4 次/10a、0.1 月/10a(图 3(m)~(p))。5 年滑动平均曲线表明: 横断山地累积干旱强度、平均干旱强度和平均干旱持续时间变化具有年代际特征, 各统计变量在 70 年代、80 年代和 90 年代中期及 2010 年均达到最大值, 平均持续时间波动减小且上升缓慢; 四川盆地横断山地累积干旱强度、平均干旱强度和干旱发生频次在 1986 年达到最低值, 分别为 23.3、0.2、8.8 次, 90 年代至今平均持续时间波动呈减小趋势; 云贵高原累积干旱强度和平均干旱强度在 80 年代和 90 年代中期达到最大值, 平均持续时间自 80 年代波动较大且于 21 世纪初呈直线上升趋势; 广西丘陵各统计变量波动较大, 且在 1991 年和 2011 年达到最大值。

对比分析发现, 西南地区各区域干旱程度变化趋势的幅度有明显差异。就干旱强度而言, 云贵高原增加趋势最为迅速, 四川盆地次之, 广西丘陵增加速率略慢, 横断山地增长最为缓慢; 就干旱发生频次而言, 横断山地增长速率最为缓慢, 变化趋势并不明显; 就平均干旱持续时间来说, 四川盆地和广西丘陵增加趋势较慢。

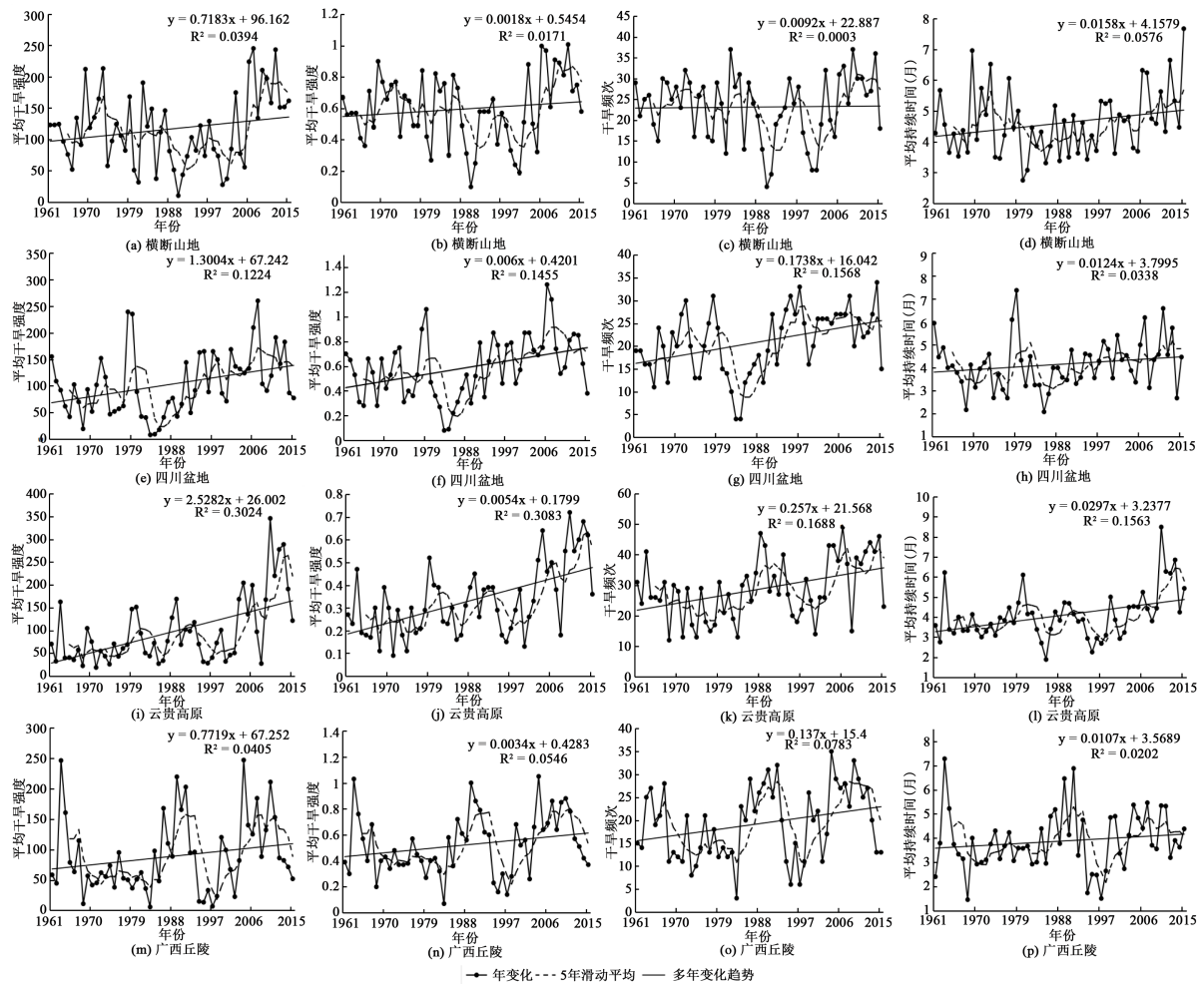


Figure 3. The annually change of accumulative drought intensity, average drought intensity, frequency and duration of drought in Hengduan Mountains, Sichuan Basin, Yungui Plateau and Guangxi hilly

图 3. 横断山地、四川盆地、云贵高原和广西丘陵累积干旱强度、平均干旱强度、干旱发生频次和平均持续时间逐年变化

3.2.2. 年代际变化特征

西南地区各区域年代际干旱变化特征如表 2 所示, 各区域干旱程度在 2000 年之后最为严重, 干旱强度、频次及平均持续时间均达到最大值。横断山地整体干旱情况在 20 世纪 60 年代和 70 年代较为严重, 随后在 80 年代和 90 年代有所缓解, 干旱强度和干旱发生频次在 90 年代最小, 平均干旱持续时间在 80 年代最短; 四川盆地干旱程度具有年代际波动特征, 20 世纪 60 年代和 80 年代干旱情况较为轻缓, 70 年代和 90 年代干旱程度加重, 在 80 年代干旱发展程度最轻微; 云贵高原和广西丘陵地区干旱情况在各年代具有重 - 轻 - 重 - 轻 - 重的反复变化特征, 两区域干旱程度均在 70 年代有所缓解。

将各年代西南地区各区域干旱情况进行比较发现, 20 世纪 60 年代和 70 年代横断山地整体干旱强度最强且平均持续时间最长, 云贵高原干旱强度最弱且平均持续时间最短; 四川盆地干旱发生最为频繁, 广西丘陵干旱发生频次最少。在 80 年代, 广西丘陵干旱强度相比其他三个区域是最强的, 平均干旱发生频次在云贵高原达到最大值, 横断山地平均干旱持续时间最长。在 20 世纪 90 年代, 四川盆地整体平均干旱强度及干旱发生频次最为严重, 干旱持续时间在横断山地最长。2000 之后, 云贵高原干旱强度及频次均达到最大值, 干旱最长持续时间依然发生在横断山地。

Table 2. The decadal change of average drought intensity, the drought frequency and the average duration of drought in each region of southwest China in 1961-2015**表 2.** 1961~2015 年西南地区各区域平均干旱强度、干旱发生频次和干旱平均持续时间年代际变化

年代	横断山地				四川盆地				云贵高原				广西丘陵			
	干旱强度	平均强度	干旱频次	持续月数	干旱强度	平均强度	干旱频次	持续月数	干旱强度	平均强度	干旱频次	持续月数	干旱强度	平均强度	干旱频次	持续月数
1961~1970	38.36	0.03	5.43	6.82	27.52	0.04	6.14	4.08	24.17	0.02	5.91	3.91	32.45	0.04	4.67	5.9
1971~1980	39.97	0.04	5.10	7.29	39.78	0.04	7.48	4.46	19.26	0.02	4.39	4.08	20.78	0.04	4.07	4.5
1981~1990	30.95	0.04	4.80	6.03	14.28	0.03	4.21	3.49	25.95	0.02	6.48	3.77	37.10	0.04	5.37	6.3
1991~2000	27.06	0.03	4.13	6.65	40.51	0.04	8.48	4.28	21.92	0.02	5.59	3.53	26.09	0.04	4.63	5.64
2001~2015	76.84	0.04	7.63	8.82	74.49	0.04	13.17	4.53	81.50	0.03	11.91	5.14	64.61	0.04	8.81	6.44

总体来说,西南地区各区域干旱程度随年代际变化均有出现一强一弱的反复变化特征,并在2000年以后演变成近55年最严重。在各个年代,横断山地区域干旱情况尤为严重,四川盆地次之,广西丘陵旱情略微缓和,云贵高原干旱程度最为轻微。

3.2.3. 季节变化特征

西南地区季节性干旱情况分布如图4所示,整体上看,各季节累积及平均干旱强度和干旱发生频次分布特征较为一致。在各季节,横断山地、四川盆地中部及东部、云贵高原中北部和广西丘陵西北部、东部及南部地区累积干旱程度较为严重,干旱发生较为频繁;平均干旱强度在四川盆地西部、云贵高原西部及南部、广西丘陵西部及中部均有达到重旱及其以上等级干旱。从季节变化角度分析,各区域累积干旱强度和平均干旱强度的季节变化趋于稳定。累积干旱较强区域对应干旱发生频次较多,干旱事件在冬季最易发生,夏季其次。西南地区各区域干旱持续时间的变化随季节演变有明显差异,各区域干旱过程在冬季最为短暂,在秋季最为漫长。

分析时间变化趋势(图5)发现,西南地区整体累积干旱强度的增加趋势范围随季节变化不断扩大,累积干旱强度变化趋势在冬季达到全域性增加,其中横断山地和四川盆地增加趋势最为显著(图5(a)、图5(e)、图5(i)、图5(m))。平均干旱强度在各区域均有明显的增加趋势,并随季节变化范围不断减小。直至冬季,四川盆地、云贵高原和广西丘陵区域平均干旱强度变化趋势发展为全域性减小,横断山地的增加趋势从其北部向南移动(图5(b)、图5(f)、图5(j)、图5(n))。西南地区干旱发生频次变化趋势在冬春季节表现为全域性减小,四川盆地、云贵高原和广西丘陵在夏季和秋季出现区域性干旱频次增加趋势(图5(c)、图5(g)、图5(k)、图5(o))。春季平均干旱持续时间在横断山地东北部、四川大范围地区以及云贵高原东北部呈增加趋势,并随季节变化区是增加范围逐渐扩大,在冬季形成西南地区全域性增加趋势(图5(d)、图5(h)、图5(l)、图5(p))。

由此发现,各季节累积及平均干旱强度和干旱发生频次分布具有一致性,横断山地及四川盆地大范围地区累积干旱程度较为严重,干旱发生频次较为频繁区域平均干旱强度较小。干旱强度的季节变化趋于稳定,干旱过程在冬季最易发生,且冬季平均干旱持续时间最短。

3.3. 各等级干旱时空变化特征

根据表1划分的干旱等级标准,计算各等级干旱空间分布(图6)。由图6可见,轻旱与中旱累积干旱强度分布在空间上具有一致性,横断山地强度最为严重、广西丘陵次之、四川盆地较弱、云贵高原最小;重旱累积强度较强区域主要集中在横断山地和四川盆地,云贵高原和广西丘陵强度较弱;特旱等级干旱强度大值区主要在西南地区中部,其中包括四川盆地西部、云贵高原和广西丘陵北部(图6(a)、图6(e)、

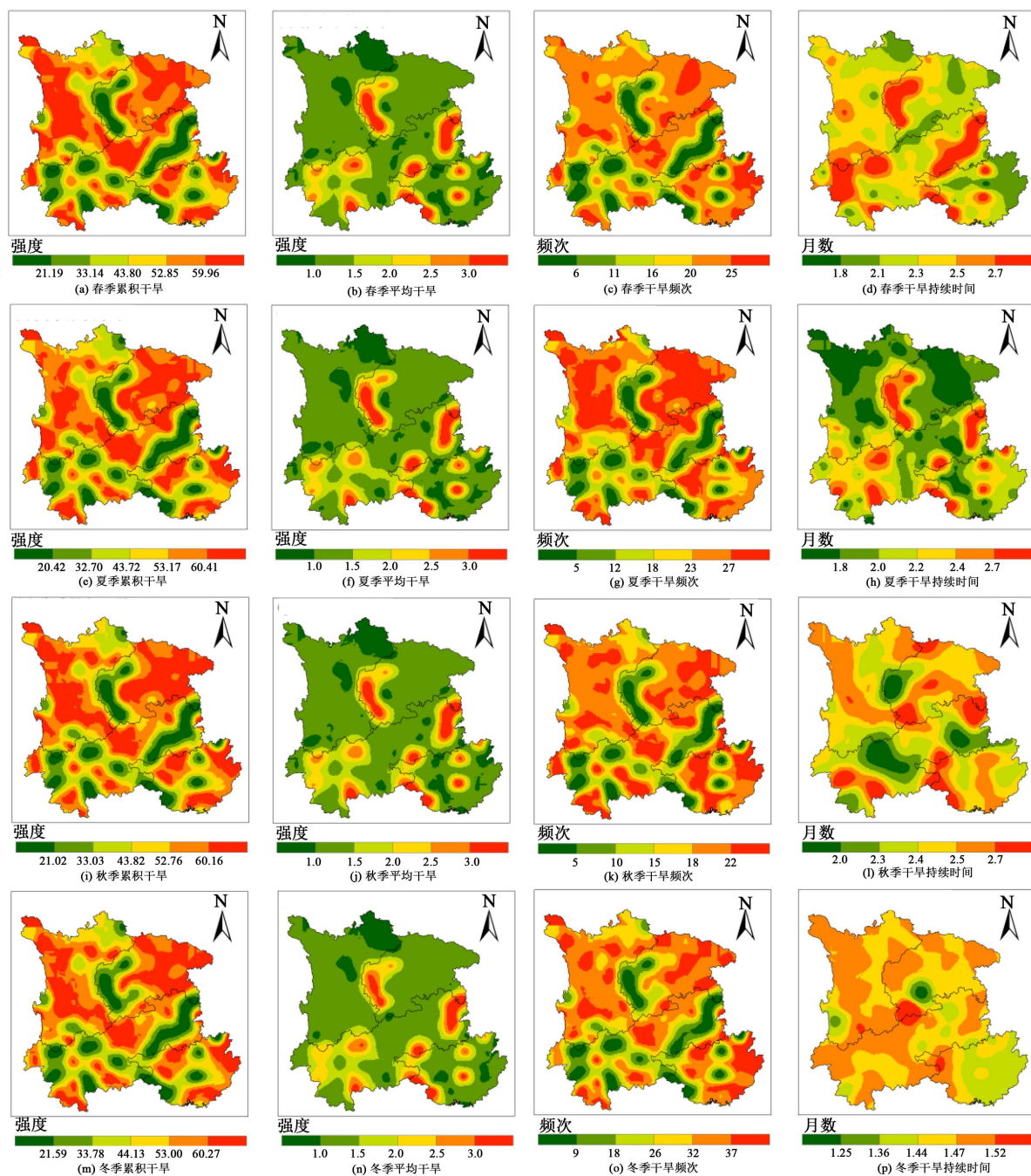


Figure 4. The seasonal spatial distribution of accumulated drought intensity, average drought intensity, drought frequency and average drought duration

图 4. 各季节累积干旱强度、平均干旱强度、干旱发生频次和平均干旱持续时间空间分布

图 6(i)、图 6(m))。轻旱、中旱和重旱发生频次空间分布情况与累积干旱相同，干旱强度越强区域干旱发生频次越高；特旱高频次发生区域主要分布在四川盆地东部(图 6(b)、图 6(f)、图 6(g)、图 6(h))。轻旱和中旱最长持续干旱时间均集中在云贵高原西北部，重旱最长持续时间分别集中在四川盆地和云贵高原东部，特旱最长持续时间零星分布在四川盆地与横断山地交界处中部、云贵高原西部和东南部、广西丘陵中部和西南部(图 6(c)、图 6(f)、图 6(g)、图 6(h))。

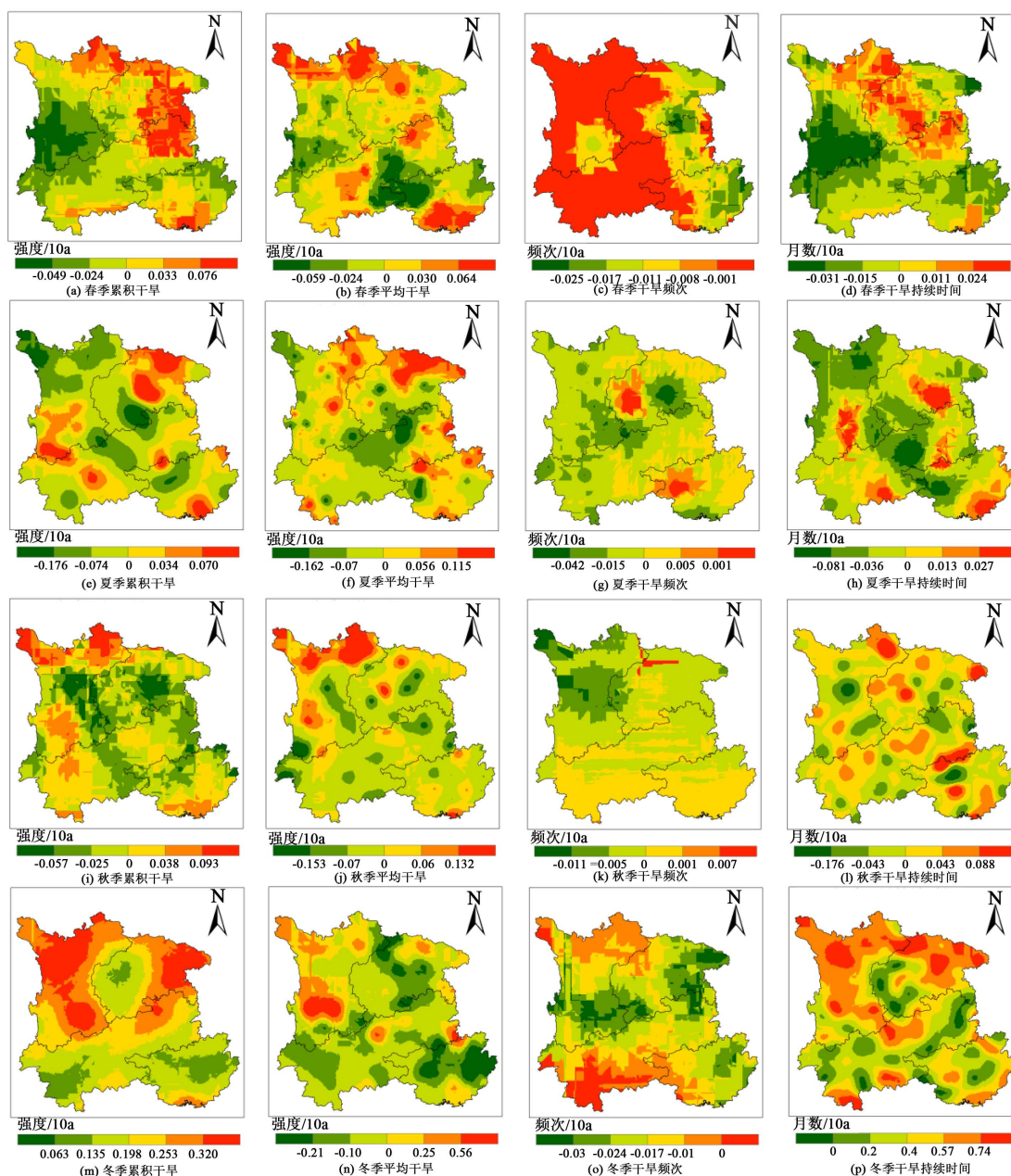


Figure 5. The seasonal development trend of spatial distribution of cumulative drought intensity, average drought intensity, drought frequency and average drought duration

图 5. 各季节累积干旱强度、平均干旱强度、干旱发生频次和平均干旱持续时间趋势系数空间分布

分析得知, 横断山地、四川盆地、云贵高原中北部和广西丘陵是轻旱最易发生区域, 但平均轻旱持续时间并不长。中旱最易发生在横断山地西部、四川盆地东部。重旱主要在横断山地中部、四川盆地中部及东部频繁发生。四川盆地西部、云贵高原及广西丘陵北部是特旱发生的主要集聚地, 并且在云贵高原西部及东部地区特旱平均持续时间最长。年代际季节变化表明(表 3), 各等级干旱程度的四季变化在 2000 年后均发展严峻。轻旱等级干旱强度在夏季随年代际变化呈上升趋势; 中旱等级干旱的持续时间在夏季随年代际变化逐渐增长; 重旱等级干旱在秋季和夏季最易发生; 特旱的发生频率在秋季随年代际变化逐渐减少。

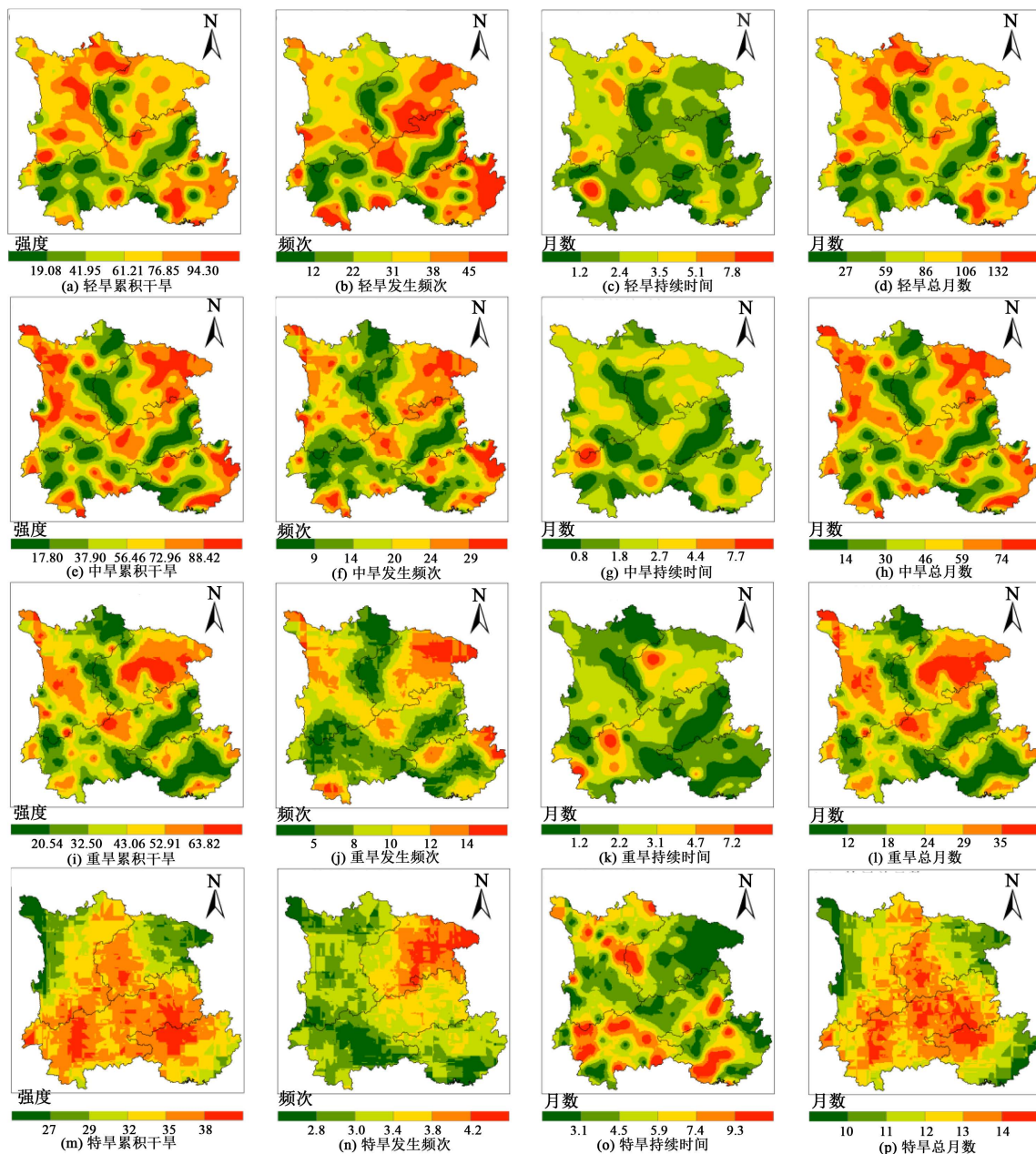


Figure 6. The spatial distribution of drought intensity, drought frequency, drought duration and drought months in each grade

图 6. 各等级干旱累积干旱强度、干旱发生频次、干旱持续时间及干旱总月数空间分布

4. 结论

本文根据西南地区 132 个气象观测站观测数据, 通过标准化蒸散指数(SPEI)和 Mann-Kendall 趋势检验方法对西南地区进行区域划分以及干旱时空特征分析, 结果表明:

1) 西南地区累积干旱强度、平均干旱强度、干旱发生频次和平均干旱持续时间在空间分布上趋于一致, 横断山地、四川盆地中部和西部、云贵高原中北部、广西丘陵边缘区域是干旱情况最为严重区域。云贵高原干旱发展趋势最为迅速, 横断山地干旱程度增加趋势较为缓慢, 各区域干旱情况在近十几年最为严重。

Table 3. The decadal and seasonal characteristics of each grade of drought
表 3. 各等级干旱年代际季节特征

年代	干旱等级	春季				夏季				秋季				冬季			
		强度	频次	持续时间	总月数	强度	频次	持续时间	总月数	强度	频次	持续时间	总月数	强度	频次	持续时间	总月数
1961~1970	轻旱	357.67	320	1.56	500	301.23	312	1.35	421	345.08	283	1.72	487	375.79	374	1.39	519
	中旱	321.33	176	1.51	266	331.53	189	1.43	271	319.74	147	1.78	261	332.61	197	1.38	272
	重旱	168.74	66	1.52	100	194.32	89	1.29	115	239.54	78	1.79	140	228.5	98	1.38	135
	特旱	73.45	14	1.86	26	134.97	36	1.53	55	115.71	26	1.73	45	87.58	21	1.48	31
1971~1980	轻旱	301.24	272	1.53	416	344.9	345	1.39	481	340.59	264	1.77	467	322.55	318	1.38	440
	中旱	298.3	161	1.52	244	279.86	167	1.37	228	303.17	144	1.72	248	281.4	163	1.4	229
	重旱	183.28	66	1.62	107	224.81	90	1.47	132	181.73	57	1.84	105	153.76	68	1.32	90
	特旱	138.54	25	2.08	52	141.91	30	1.73	52	156.66	31	1.9	59	153.11	42	1.38	58
1981~1990	轻旱	326.52	286	1.57	450	341.57	347	1.39	484	369.09	284	1.81	513	364.63	369	1.35	499
	中旱	275.84	145	1.58	229	272.97	166	1.35	224	282.45	142	1.64	233	254.29	164	1.29	211
	重旱	102.66	41	1.49	61	106.68	52	1.23	64	120.74	41	1.76	72	145.36	67	1.28	86
	特旱	145.77	24	2.21	53	128.95	22	2.09	46	141.9	24	2.21	53	145.88	38	1.42	54
1991~2000	轻旱	351.99	300	1.59	478	368	381	1.34	509	330.64	251	1.87	469	347.85	358	1.34	481
	中旱	303.91	166	1.51	250	321.2	203	1.3	264	265.5	122	1.79	218	291.94	181	1.33	241
	重旱	217.73	82	1.56	128	173.19	87	1.16	101	179.24	60	1.77	106	157.68	69	1.33	92
	特旱	114.98	27	1.78	48	102.67	32	1.31	42	86.34	19	1.79	34	75.41	21	1.43	30
2001~2015	轻旱	678.49	592	1.57	932	630.85	634	1.36	864	681.47	487	1.91	928	656.16	659	1.37	900
	中旱	647.83	357	1.49	531	736.65	460	1.3	599	678.23	314	1.75	551	668.54	400	1.37	547
	重旱	597.42	209	1.66	346	550	248	1.3	323	590.99	189	1.82	344	626.39	258	1.41	363
	特旱	584.61	116	1.98	230	541.88	119	1.78	212	530.82	103	2.02	208	550.16	154	1.41	217

2) 各季节累积及平均干旱强度和干旱发生频次分布具有一致性, 横断山地及四川盆地大范围地区累积干旱程度较为严重, 干旱发生频次较为频繁区域平均干旱强度较小。干旱强度的季节变化趋于稳定, 干旱过程在冬季最易发生, 且冬季平均干旱持续时间最短。

3) 西南地区整体累积干旱及平均干旱持续时间增加趋势范围随季节变化不断扩大在冬季形成全域性趋势增加的形势。平均干旱强度趋势减小范围随季节变化不断扩大。干旱发生频次增加趋势在夏季和秋季开始扩大空间范围。

4) 横断山地、四川盆地、云贵高原中北部和广西丘陵是轻旱最易发生区域。中旱最易发生在横断山地西部、四川盆地东部。重旱主要在横断山地中部、四川盆地中部及东部频繁发生。四川盆地西部、云贵高原及广西丘陵北部是特旱发生的主要集聚地, 并且在云贵高原西部及东部地区特旱平均持续时间最长。各等级干旱情况在近十几年最为严峻, 轻旱等级干旱强度及中旱等级干旱平均持续时间在夏季随年代际变化呈上升趋势, 秋季特旱发生频率随年代际变化减少。

致 谢

本文在选题以及研究过程中在靳立亚教授的悉心指导下得以完成, 靳老师严谨的科学态度和精益求精的钻研精神深深地感染着我, 在此向靳老师学致以诚挚的感谢!

参考文献

- [1] 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.
- [2] 李韵婕, 任福民, 李忆平, 王朋岭, 晏红明. 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.
- [3] 祁海霞, 智协飞, 白永清. 中国干旱发生频率的年代际变化特征及趋势分析[J]. 大气科学学报, 2011, 34(4): 447-455.
- [4] 黄荣辉, 刘永, 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.
- [5] 王林, 陈文. 近百年西南地区干旱的多时间尺度演变特征[J]. 气象科技进展, 2012, 2(4): 21-26.
- [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.
- [7] 杨金虎, 张强, 王劲松, 等. 近60a来中国西南春季持续性干旱异常特征分析[J]. 干旱区地理, 2015, 38(2): 215-222.
- [8] 张冬冬, 鲁帆, 严登华, 等. 云南省干旱时空演变规律及季节连旱的概率特征分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014, 22(4): 705-717.
- [9] 王允, 刘普幸, 曹立国, 等. 基于SPI的近53a宁夏干旱时空演变特征研究[J]. 水土保持通报, 2014, 34(1): 296-302.
- [10] 王莺, 李耀辉, 胡田田. 基于SPI指数的甘肃省河东地区干旱时空特征分析[J]. 中国沙漠, 2014, 34(1): 244-253.
- [11] 黄晚华, 杨晓光, 李茂松, 等. 基于标准化降水指数的中国南方季节性干旱近58a演变特征[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 50-59.
- [12] Wang, J., Feng, J., Yang, L., *et al.* (2009) Runoff-Denoted Drought Index and Its Relationship to the Yields of Spring Wheat in the Arid Area of Hexi Corridor, Northwest China. *Agricultural Water Management*, **96**, 666-676. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.10.008>
- [13] Taskiris, G. and Vangelis, H. (2005) Establishing a Drought Index Incorporating Evapotranspiration. *European Water*, **9**, 3-11.
- [14] Shukla, S. and Wood, A.W. (2008) Use of a Standardized Runoff Index for Characterizing Hydrologic Drought. *Geophysical Research Letters*, **35**, L02405. <https://doi.org/10.1029/2007GL032487>
- [15] 沈彦军, 李红军, 雷玉平. 干旱指数应用研究综述[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(4): 128-133.
- [16] 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.
- [17] 杨庆, 李明星, 郑子彦, 马柱国. 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.
- [18] 洪兴骏, 郭生练, 周研来. 标准化降水指数SPI分布函数的适用性研究[J]. 水资源研究, 2013(2): 33-41.
- [19] 赵济. 中国自然地理[M]. 第4版. 北京: 高等教育出版社, 1997.
- [20] 李伟光, 易雪, 侯美亭, 等. 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, 2015, 20(5): 643-649.
- [21] 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, 29(6): 1003-1016.
- [22] 贾艳青, 张勃. 基于日SPEI的近55a西南地区极端干旱事件时空演变特征[J]. 地理科学, 2018, 38(3): 474-483.
- [23] 王明田, 王翔, 黄晚华, 张玉芳, 马均. 基于相对湿度指数的西南地区季节性干旱时空分布特征[J]. 农业工程学报, 2012, 28(19): 85-92.
- [24] 王林, 陈文. 标准化降水蒸散指数在中国干旱监测的适用性分析[J]. 高原气象, 2014, 33(2): 423-431.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2168-5711，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：ccrl@hanspub.org