

# 基于 SPI 指数的近 50 年重庆地区干旱时空分布特征

孙德亮<sup>1</sup>, 吴建峰<sup>1,2</sup>, 李威<sup>3</sup>, 曹广杰<sup>4</sup>

(1. 重庆师范大学 地理与旅游学院 GIS 应用研究重庆市高校重点实验室, 重庆 400047; 2. 贵州师范学院 地理与旅游学院, 贵州 贵阳 550018; 3. 贵州科学院 山地资源研究所, 贵州 贵阳 550004; 4. 重庆师范大学 地理与旅游学院, 重庆 400047)

**摘要:** [目的] 揭示重庆地区年和季度干旱发生的频率和强度的演变特征, 为该区应对干旱灾害, 制定针对性减灾措施提供科学依据和参考。[方法] 基于重庆地区 34 个气象观测站 1964—2011 年逐月降水数据, 采用标准化降水指数(SPI)干旱指标方法进行研究。[结果] 干旱强度频率方面, 重庆地区干旱发生的频率具有较明显的区域性和季节性; 其中年、春、夏和冬季干旱发生频率相差不大, 在 25.9%~35.1% 范围, 秋季的发生频率范围幅度较大, 介于 16.7%~40.0% 之间。干旱强度方面, 在年和季节尺度上整体呈现一定的增加趋势, 其中秋季和年度相对趋势更明显, 近 50 a 研究区年度和四季主要以轻旱和中旱为主, 整体上夏季和秋季干旱强度比另外两个季度和年度表现更强一些。[结论] 标准化降水指数(SPI)适用于重庆地区, 可以作为气候变化的监测指标; 重庆地区干旱发生的频率具有较明显的区域性和季节性。

**关键词:** 干旱; 标准化降水指数(SPI); 重庆地区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)04-0197-07

中图分类号: P4

**文献参数:** 孙德亮, 吴建峰, 李威, 等. 基于 SPI 指数的近 50 年重庆地区干旱时空分布特征[J]. 水土保持通报, 2016, 36(4): 197-203. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.04.035

## Temporal and Spatial Patterns of Droughts in Recent 50 Years of Chongqing City Based on Standardied Precipitation Index

SUN Deliang<sup>1</sup>, WU Jianfeng<sup>1,2</sup>, LI Wei<sup>3</sup>, CAO Guangjie<sup>4</sup>

(1. College of Geography Science, Key Laboratory of GIS Application, Chongqing Normal

University, Chongqing 400047, China; 2. College of Geography & Tourism, Guizhou Normal Collage,

Guiyang, Guizhou 550018, China; 3. Institute of Mountain Resource, Guizhou Academy of Sciences, Guiyang,

Guizhou 550001, China; 4. College of Geography & Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China)

**Abstract:** [Objective] The evolution of drought frequency and intensity was demonstrated yearly and quarterly in Chongqing City to provide scientific basis and reference for drought mitigation. [Methods] Standardized precipitation index(SPI) drought index method was used, and the monthly precipitation data collected from 34 meteorological stations in 1964—2011 were dealt. [Results] Frequency of drought had obvious regional and seasonal traits. The seasonal frequency of droughts varied differently. In spring, summer and winter, it had a range of 25.9%~35.1%; In fall, it had a big range from 16.7% to 40.0%. Either for yearly drought intensity or seasonal intensity, they both had an overall increasing trend, among which, annual drought intensity and the autumn one were more obvious. In the past 50 years, the study area was prevailed by intensity grades of mild drought and drought, either counted by years or by seasons. Drought occurred in summer and autumn were more severe than that in other seasons and in a whole year. [Conclusion] Standardized precipitation index(SPI) can be used as indicators for monitoring the climate change of Chongqing City. The frequency of drought in Chongqing City has obvious regional and seasonal traits.

**Keywords:** drought; standardized precipitation index(SPI); Chongqing City

收稿日期: 2015-02-02

修回日期: 2016-03-16

资助项目: 贵州省科技厅自然科学基金项目“基于遥感和 GIS 技术的喀斯特地区泥石流灾害分布预测及危险度评价”(黔科合 J 字[2011]2048 号); 国家自然科学基金项目(41271411); 重庆市自然科学基金(cstc2013jcyjA40047); 教育部人文社科基金(11YJCZH023)

第一作者: 孙德亮(1976—), 男(汉族), 山东省临沂市人, 博士, 副教授, 主要从事资源环境遥感与 GIS 研究。E-mail: 892525771@qq.com。

通讯作者: 吴建峰(1985—), 男(汉族), 重庆市人, 硕士研究生, 助教, 主要从事资源环境遥感与 GIS 研究。E-mail: wujianfeng74623@sina.com。

重庆属于气候脆弱区,气象灾害发生频繁,而干旱又是重庆主要的气象灾害之一,出现的频率高,造成的损失大,重庆一年的 4 个季节均可能出现干旱,且几乎每年都会出现不同程度的干旱,工业、农业、生态环境、人民生活等各个领域都受到干旱影响<sup>[1]</sup>。例如,2006 年重庆市遭受了百年一遇的最大面积特大旱灾,据重庆市救灾办统计,该市除秀山、酉阳、石柱为严重干旱外,其余区县为特大干旱。受灾人口突破 2 100 万人,农作物受灾面积近  $1.33 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ,其中农业经济损失 67.6 亿元<sup>[2]</sup>。因此,加强对该地区干旱状况的研究,客观评估干旱应对旱情具有重要的指导意义。干旱是由于区域内长期无降水或降水异常偏少,导致水分的供求不平衡形成的水分短缺现象<sup>[3-4]</sup>。在干旱指标研究方面,各部门或学科对干旱的定义存在差异,比较公认干旱定义包括 4 种类型:气象干旱、水文干旱、农业干旱和社会经济干旱<sup>[5]</sup>。干旱评价指标的适用性受研究区域、时间尺度等诸多因素影响<sup>[6-7]</sup>,本研究针对气象干旱角度对重庆地区干旱进行研究分析。目前研究气象干旱的指标主要有 Z 指数<sup>[8-9]</sup>、相对湿润指数<sup>[10]</sup>、帕默尔干旱指数<sup>[11-12]</sup>、标准化降水指数<sup>[13-16]</sup>、综合气象干旱指数(CI)<sup>[17]</sup>等,且利用这些指标对各地干旱的时空变化进行了研究。标准化降水指数(SPI)计算过程简单,可很好地反映区域干旱程度的时空变化,应用广泛。因此,本研究以 SPI 指数作为干旱分析指标,从气象干旱角度分析重庆地区 1964—2011 年近 50 a 的干旱频率和干旱强度,摸清研究区干旱的时空演变规律,为应对干旱灾害,制定有针对性的减灾措施提供科学依据和参考。

## 1 研究区概况

重庆市( $105^{\circ}17' - 110^{\circ}11' \text{ E}$ ,  $28^{\circ}10' - 32^{\circ}13' \text{ N}$ ),属于典型的喀斯特山地城市,该市土地面积  $8.24 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。气候湿润,年均温度约  $18^{\circ}\text{C}$ ,降水丰富,年均约 1 225 mm 左右。长江境内流程为 665 km,是三峡库区的主体部分,生态环境脆弱,人口众多,是我国典型生态脆弱区之一,也是国家优先支持的欠发达落后地区之一。地貌以山地丘陵为主,平坝面积相对稀少,主要分布在西北部和中部地区。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 研究数据

利用重庆地区 34 个气象站点 1964—2011 年逐月降水观测数据计算标准化降水指数 SPI(其中万盛站点数据为 1966—2011 年,对 SPI 结果的基本无影

响,可以忽略),34 个气象站点均匀分布在研究区范围。所有数据来自中国气象科学数据共享网(<http://cdc.cma.gov.cn>)。利用 SPI 指数所确定的干旱等级结合干旱频率公式计算出研究区所有站点各干旱等级的发生频率,再利用 ArcGIS 软件中 Kriging 插值方法得出研究区干旱的空间分布图,同时利用干旱强度公式计算研究区的干旱强度,评价干旱的严重程度。

### 2.2 研究方法

标准化降水指数能够计算 1,3,6 个月等短时间尺度,也可以计算 9,12,24 或 48 个月等长时间尺度,但不同尺度的标准化降水指数表现水分亏盈状况的侧重点具有差异性。短时间尺度的标准化降水指数代表的是区域短时间内的水分亏盈情况(可用于判断农作物生长水分供给情况、干旱监测等);而长时间尺度的标准化降水指数表征的是长时间的水分亏盈情况。标准化降水指数(SPI)是表征某时段降水量出现概率多少的指标,由 McKee 等<sup>[18]</sup>于 1993 年提出,它适合于月以上尺度相对于当地气候状况的干旱监测与评估。一定时期内的月降水量变化一般不服从正态分布,而是一种 Gamma 分布,因此计算标准化降水指数时,需将偏态概率分布的降水量进行正态标准化处理,即采用函数的标准化降水累积频率分布划分干旱等级。通过计算,得出 SPI 指数划分干旱等级情况详见表 1<sup>[19]</sup>。

表 1 SPI 指数干旱等级划分

等级	SPI 指数	干旱类型
1	$\text{SPI} < -0.5$	无旱
2	$-0.1 < \text{SPI} \leq 0.5$	轻旱
3	$-0.1 \leq \text{SPI} < -1.5$	中旱
4	$-1.5 \leq \text{SPI} < -2.0$	重旱
5	$\text{SPI} \leq -2.0$	特旱

### 2.3 干旱评价指标

为全面地评价研究区的干旱特征,从干旱发生频率和干旱发生的强度两个方面对重庆地区近 50 a 的干旱特征进行研究,其中选取干旱频率( $P_i$ )和干旱强度( $S_{ij}$ )作为办研究干旱程度评价的两个主要评价指标,其具体计算步骤及含义,参见参考文献[15],在此不再进行赘述。

## 3 结果分析

### 3.1 重庆地区年度干旱特征

基于重庆市 38 个气象站近 50 a 来 SPI3 指数所得到的各站点干旱频率,干旱(含轻旱及其以上)发生

的频率在 27.2%~32.4%之间,平均值约为 30.3%。根据所计算的干旱发生频率,使用 ArcGIS 10.1 中克里金方法(Kriging)得到研究区干旱频率分布图如图 1 所示。由图 1 可以看出,重庆市大部分地区干旱发生频率较高,其中研究区中部区域如丰都、涪陵、武隆和东南绝大部分地区干旱发生的频率相对较高,干旱频率都高于 31.5%;研究区东北部如云阳、巫溪、奉节等干旱发生频率相对较低,干旱频率在 28.2%以下。中旱发生频率在 13.5%~17.9%之间,平均值在 15.4%左右,其中发生频率较高的地区主要集中

在渝东北的城口、巫溪和渝东南大部分区域,渝东北的万州、云阳区域和渝西荣昌、大足等地中旱发生频率相对较低(图 1)。重旱发生频率 5.2%~9.6%之间,平均干旱频率约为 7.3%,其中研究区东北部发生频率高于研究区的其他区域(图 1)。特旱发生频率较低,介于 0.1%~5.2%之间,平均频率 1.9%,主要发生在研究区东北部的奉节县、中部的石柱县和西部的部分地区。综上分析来看,干旱、中旱、发生频率较高的集中在研究区的东南部区域,重旱、特旱在研究区东北部部分区域和西部少部区域更为常见。

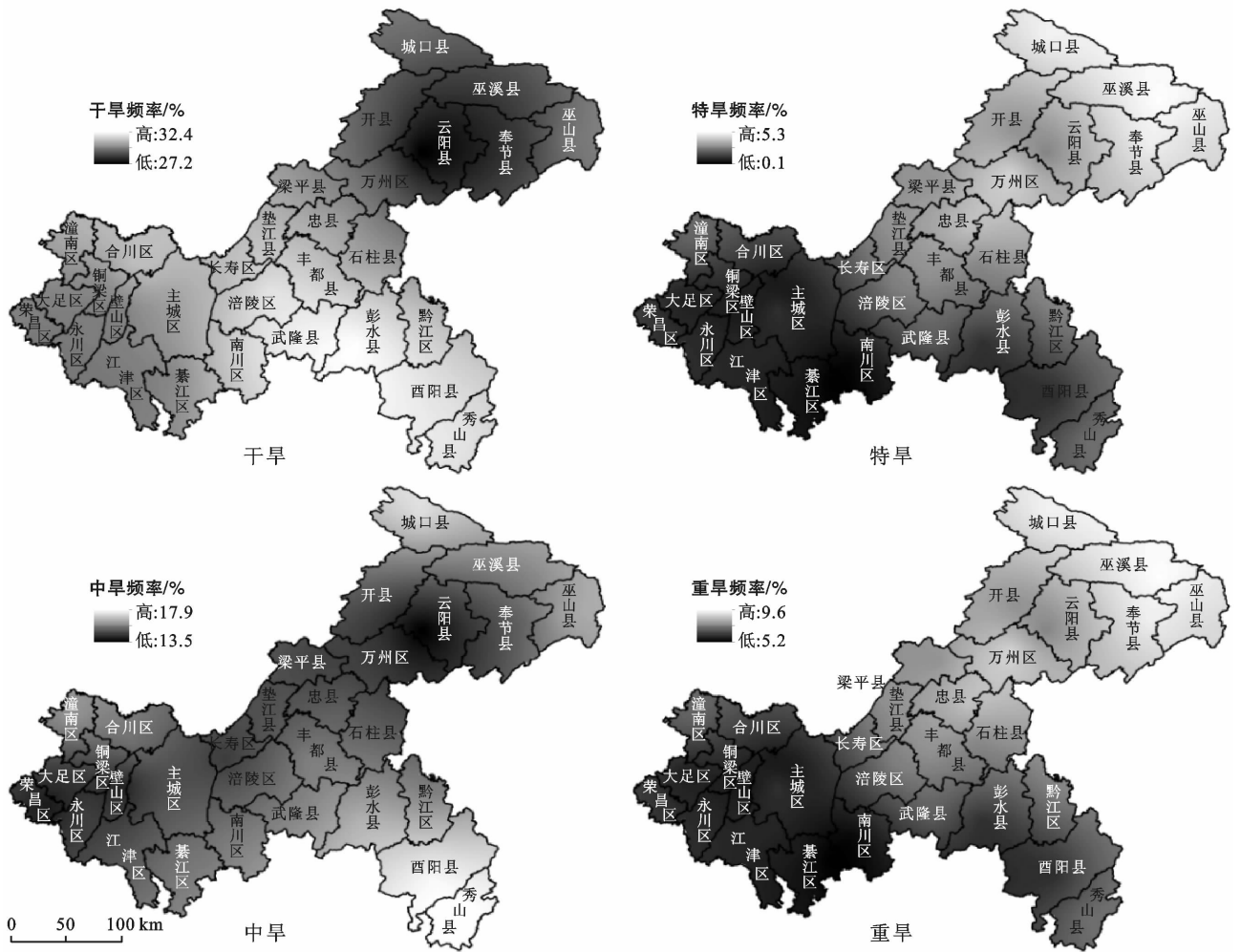


图 1 重庆地区年度干旱频率分布

从干旱强度来看(图 2),近 50 a 来重庆市的干旱强度介于 0~1.59 之间,平均干旱强度约为 0.93;从趋势线来看,干旱强度整体上呈现上升趋势,但趋势不明显。从曲线图可以得到,研究区近 50 a 里干旱主要是轻旱和中旱,其中有 21 a 的干旱强度大于 1.0,只有两年干旱强度小于 0.5,表明近约 1/2 年份为中旱;1998,2001,2006 和 2011 年干旱强度值大于 1.5,达到了重旱程度,其中 2006 年干旱强度值最大,

为近 50 a 来最严重的一次干旱,这与实际干旱情况和其他学者<sup>[2,20]</sup>研究结论吻合。

### 3.2 重庆地区季节性干旱特征

3.2.1 春季干旱特征 重庆地区春季干旱频率在 26.9%~33.1%之间,平均值约为 30.6%。春季干旱发生频率数值与年度干旱发生频率值相差不大,但在空间分布上存在差异。干旱发生频率相对较大的主要集中在研究区东南部、西部偏南区域和东北部的

开县、巫溪、巫山区域,发生频率都在 30% 以上。中旱发生频率范围为 15.1%~16.5%,平均值在 15.9% 左右,从数字上看,发生频率相差不大,说明整个研究区中旱发生频率相当。研究区重旱发生频率介于 2.6%~10.0% 之间,平均发生频率约为 6.0%,从重旱发生频率空间分布图来看,重旱发生频率较高的主要集中在研究区西部区域、中部的垫江、丰都、武隆区域和东北部的城口区域,发生频率都高于 6.3%。重庆地区春季特旱发生频率在 0.1%~4.2% 范围内,平均值为 2.0%,从发生频率分布可以看出,特旱主要发生研究区的中部,也零星分布在研究区东北部的巫山和西部的潼南区域,但总体上特旱发生频率都

不大。可见,春季各干旱类型空间分布存在差异性,春季各干旱类型频率空间分布如图 3 所示。

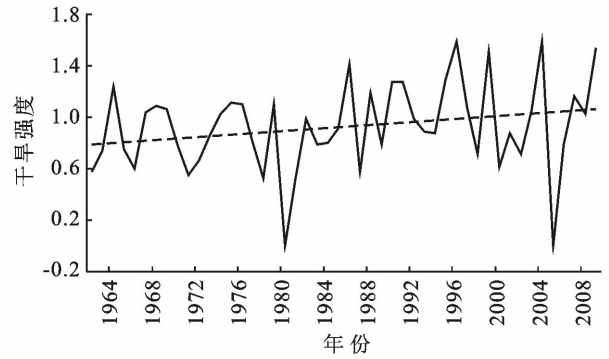


图 2 重庆地区 1964—2011 年干旱强度变化

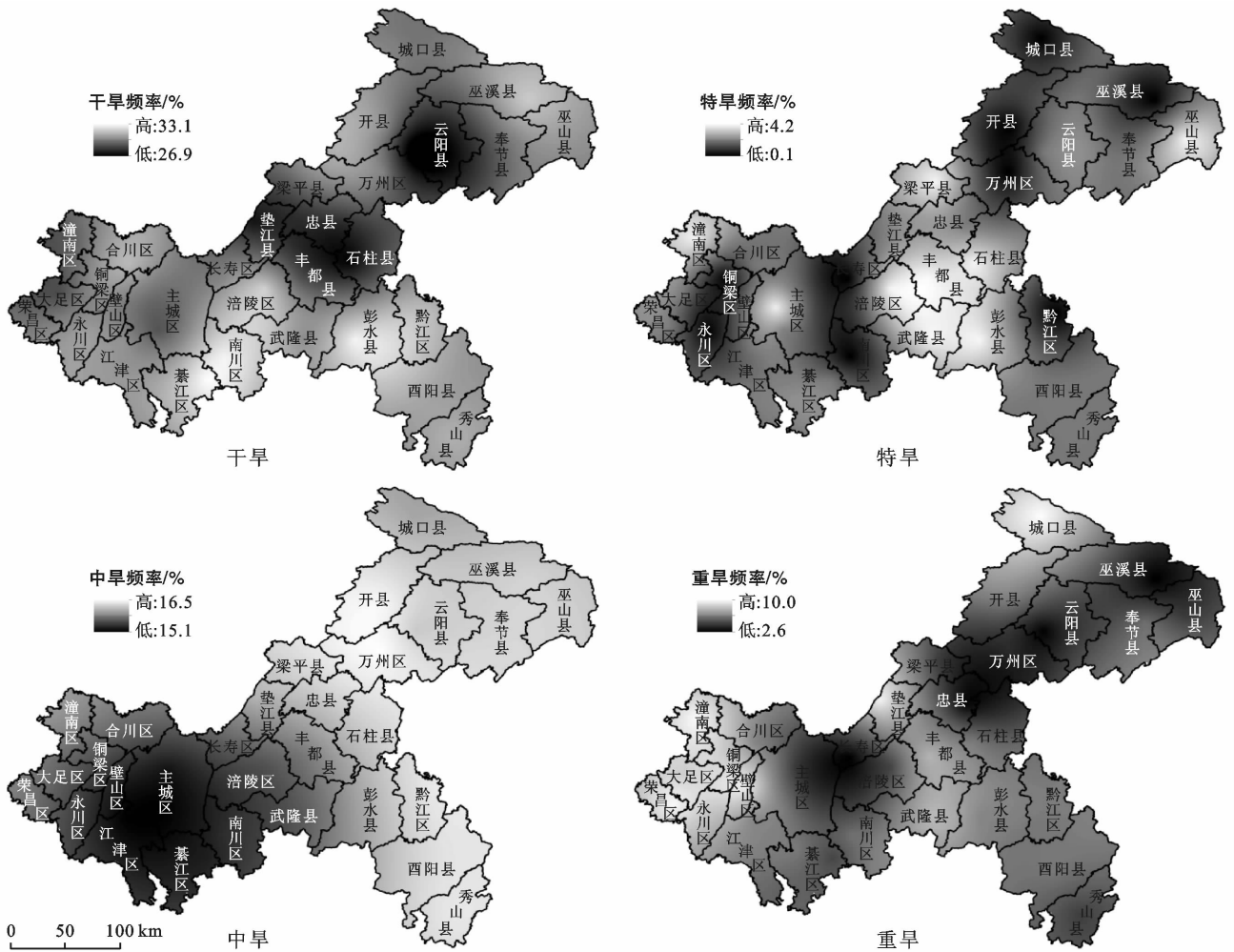


图 3 重庆地区春旱频率分布

从干旱强度图(图 4)可以看出,重庆地区春季的干旱强度在 0~1.68 之间,干旱类型包括重旱、中旱、轻旱、无旱。根据干旱等级划分和趋势图可以得出,整体上,干旱强度有极小的增加态势;研究区在 1969 年和 1994 年的春季发生过重旱,在 1968,1973,1976,

1977,1990 和 2002 年的春季基本未发生干旱,除此之外,研究区近 50 年内,春季中有 15 a 发生了中旱,有 25 a 发生轻旱。综上可知,研究区在近 50 a 的春季,除了有 6 a 未发生干旱以外,其他年份都在不同程度上受到干旱的影响。

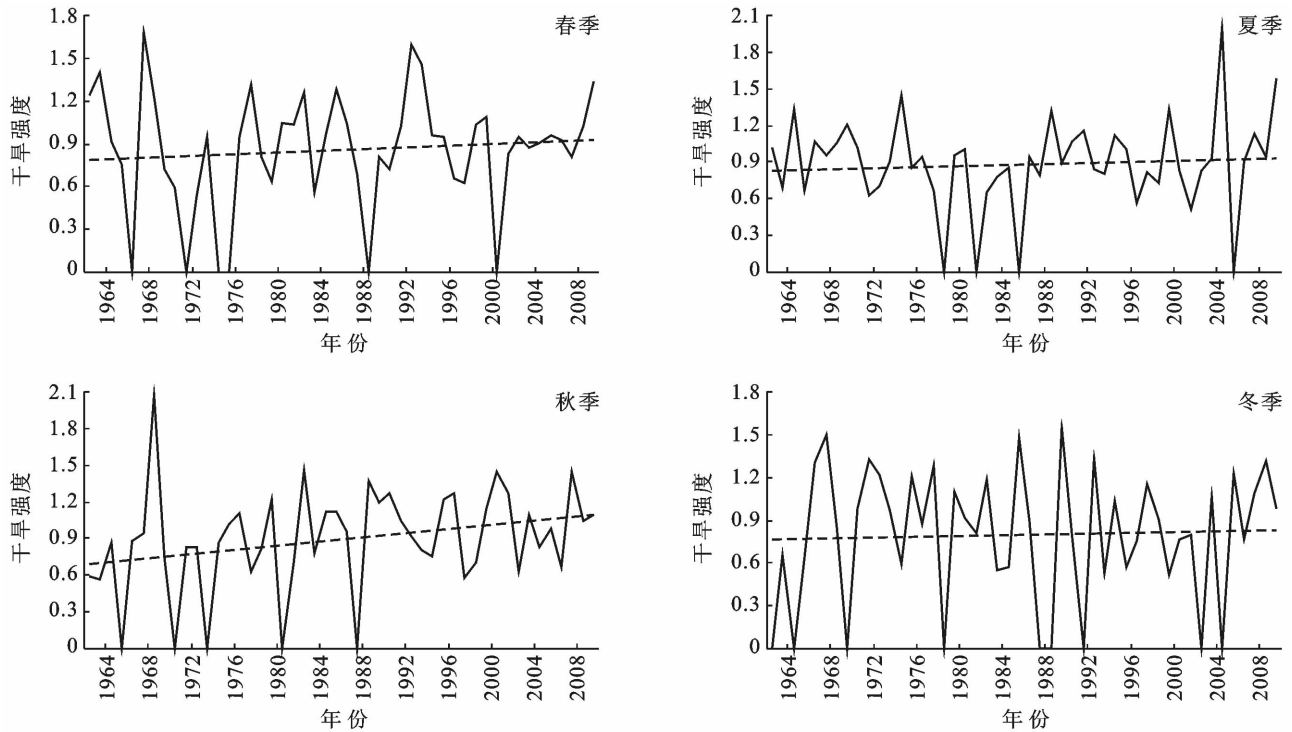


图 4 重庆地区 1964—2011 年四季干旱强度变化

3.2.2 夏季干旱特征 研究区夏季干旱频率范围介于 25.9%~35.0%之间,平均干旱频率约为 29.9%,干旱频率范围略大于春季干旱频率,平均值略小于春季;在空间分布上,发生频率相对较高的分布在研究区的西部区域、东北部的城口和东南部的秀山、酉阳,发生频率都在 30%以上。重庆地区夏季中旱发生频率在 8.7%~20.9%,平均值为 14.9%左右,其中高于平均发生频率的区域主要分布在研究区的偏南部、东南方的秀山和东北部的城口区域;研究区夏季重旱发生频率与春季相比,频率范围有所增加,数值介于 5.4%~7.5%之间,平均值略大于春季和年度的重旱频率,数值达 6.5%。重庆地区夏季特旱发生频率空间分布与春季特旱发生频率分布有较大部分重复区域,但范围要大于春季,并且夏季范围也主要集中在研究区的中部区域,数值在 1.6%~3.5%之间,平均频率为 2.7%左右(由于版面限制,图省略)。分析研究区夏季的干旱强度,夏季干旱强度在 0~2.0 之间波动(图 4),与春季干旱强度相比,夏季达到了特级干旱程度,从图中也可以看出,干旱强度的趋势虽然呈现略微的增加趋势,但变化不明显;特旱发生在 2006 年(与实际吻合),干旱强度达到 2.0;在 2011 年,重庆市的夏季也发生了重度干旱;在 1980,1983,1987 和 2007 年几乎未出现干旱现象;1964,1966,1968,1970—1972,1976,1982,1990,1992,1993,1996,1997,2001 和 2009 年共 15 a 受到中度干旱,其

中 1970—1972 年连续 3 a 遭受中度干旱影响;剩下 28 a 研究区均受到轻度干旱困扰,数值介于 0.5~1.0 之间。

3.2.3 秋季干旱特征 研究区的秋季干旱频率范围是 4 个季度中范围最广的,其最大干旱频率达到 40.0%,干旱频率范围为 16.7%~40.0%,平均值为 31.6%;空间分布上,除了东北部的云阳、奉节、巫山、巫溪和西南部部分区域外,其他区域干旱频率都达到 30%。中旱发生频率也居 4 个季度之首,频率值介于 10.4%~22.9%之间,平均值超过 17%;其中高于平均值的区域分布在研究区东南部、中部偏南大部分区域以及东北部局部区域。重旱发生频率相对较高区域主要分布在研究区中部偏南地区、重庆西部的潼南、铜梁和东北部的城口、巫山区域,重旱频率平均值约为 5.9%,范围在 2.1%~10.4%之间。特旱发生频率也要高于另外 3 个季度,最高频率达到 6.2%,主要集中在东北部的奉节局部区域,其次相对较高的频率集中在研究区中部部分区域和西部局部区域,频率数值在 3.0%~6.2%之间,整个研究区的特旱频率范围在 0%~6.2%之间(由于版面限制,此处图省略)。从重庆地区秋季干旱强度来看(图 4),近 50 a 研究区的干旱强度在 0~2.1 之间,从无旱到特旱都发生过,从趋势图来看,与其他季节比较,干旱强度增加趋势更明显一些。干旱强度最强发生在 1970 年,干旱强度值达到 2.1 的特旱强度;研究区在秋季未遭

遇重旱袭击;重庆地区发生中旱强度有 19 a, 占到 40%;1967, 1972, 1975, 1982 和 1989 年未受到明显干旱的影响。整体上, 研究区在近 50 a 秋季中, 还是以轻旱和中旱为住, 也存在极端干旱年份。

3.2.4 冬季干旱特征 研究区冬季干旱发生频率与其他 3 个季节和年干旱频率相当, 数值介于 31.6%~35.1%之间, 平均值约为 33.6%;空间分布上, 研究区东北部和东南部干旱发生频率高于研究区的其他区域, 呈现出从西部向东北部和东南部增加趋势。重庆地区冬季中旱频率范围为 15.6%~19.2%, 出现东北(西阳、万州)向西南(江津)倾斜沿线区域中旱发生频率相对较小, 其他区域空间分布差别不大, 整个区域中旱频率平均值为 17.7%。冬季重旱频率介于 5.5%~10.5%的范围, 冬季重旱发生频率呈现出西部大于东部沿线区域, 平均频率约大于 2%, 重旱发生频率相对较大区域集中在研究区的中部及中部偏南地区。研究区冬季特旱发生频率整体上出现西部高于东北部, 最高值出现在研究区东南部区域, 特旱频率范围在 2.3%~5.3%之间, 平均值为 3.6%。可见, 冬季发生干旱整体上是西部区域发生频率高于东部区域。从冬季干旱强度来分析(图 4), 近 50 a 研究区冬季干旱强度范围在 0~1.6 之间, 干旱类型从无旱到重旱, 从趋势线来看, 干旱趋势几乎未发生变化。研究区在冬季发生过两次重旱, 分别出现 1969 和 1991 年, 干旱强度值分别为 1.5, 1.6;近 50 a 有 9 a 未遭遇干旱影响, 分别是 1964, 1966, 1971, 1980, 1989, 1990, 1993, 2004 和 2006 年, 比例占到 19%。近 50 a 中有 15 a 遭受中旱影响, 所占比例为 32%。有 22 a 遭遇轻旱影响, 干旱强度范围在 0.5~1.0 之间, 比例占到 47%, 接近 1/2 的比例。综上可得, 研究区冬季干旱强度排序依次为轻旱、中旱、无旱和重旱, 其中轻旱接近 50%的比例。

综上所述, 重庆地区干旱发生的频率具有较明显的区域性和季节性, 其中年度、春、夏和冬季干旱发生频率相差不大, 在 25.9%~35.1%范围之内, 秋季的发生频率范围幅度较大, 介于 16.7%~40.0%之间, 说明秋季干旱发生频率波动性更大。干旱强度趋势变化来看, 在年尺度和季节尺度上整体上都呈现一定的增加趋势, 其中秋季和年度相对趋势更明显;干旱强度类型上, 近 50 a 研究区年度和四季主要以轻旱和中旱为主, 其中季度中重旱和特旱发生次数更多, 整体上夏季和秋季干旱强度比另外两个季度和年度表现更强一些。

## 4 讨论与结论

依据重庆地区 34 个气象观测站 1964—2011 年

逐月降水数据, 采用标准化降水指数(SPI)作为干旱指标, 分析重庆地区年和季度干旱发生的频率和干旱强度的演变特征。结果表明, 标准化降水指数(SPI)作为一种干旱重建指标, 适用于重庆地区, 也可以作为气候变化的监测指标。重庆地区干旱发生的频率具有较明显的区域性和季节性;干旱强度趋势变化来看, 在年尺度和季节尺度上整体上都呈现一定的增加趋势, 其中秋季和年度相对趋势更明显。

(1) 年度干旱(含轻旱及其以上)发生的频率在 27.2%~32.4%之间, 平均值约为 30.3%, 干旱、中旱、发生频率较高区域主要集中在研究区的东南部, 重旱、特旱在研究区的东北部部分区域和西部少部分地区更常见。从干旱强度来看, 近 50 a 来重庆市的干旱强度介于 0~1.59 之间, 平均干旱强度约为 0.93, 干旱强度整体上呈现上升趋势, 但趋势不明显。

(2) 季节上, 春旱(含轻旱及其以上)频率在 26.9%~33.1%之间, 平均值约为 30.6%, 各干旱类型空间分布存在差异性;从干旱强度图来看, 研究区春季的干旱强度在 0~1.68 之间, 干旱强度有极小的增加态势, 除了有 6 a 春季未发生干旱以外, 其他年份都在不同程度上受到干旱的影响。夏季干旱频率范围介于 25.9%~35.0%之间, 平均干旱频率约为 29.9%, 干旱频率范围略大于春季干旱频率, 平均值略小于春季;夏季的干旱强度, 夏季干旱强度在 0~2.0 之间波动, 与春季干旱强度相比, 夏季达到了特级干旱程度, 夏季干旱强度的趋势虽然呈现略微的增加趋势, 但变化不明显。秋季干旱频率范围是 4 个季度中范围最广的, 其最大干旱频率达到 40.0%, 干旱频率范围为 16.7%~40.0%, 平均值为 31.6%;干旱强度来看, 近 50 a 研究区的干旱强度在 0~2.1 之间, 从无旱到特旱都发生过, 从趋势图来看, 与其他季节比较, 干旱强度增加趋势更明显一些。冬季干旱发生频率与其他 3 个季节和年干旱频率相当, 数值介于 31.6%~35.1%之间, 平均值约为 33.6%, 冬季干旱整体上是西部区域发生频率高于东部区域。干旱强度来分析, 近 50 a 研究区冬季干旱强度范围在 0~1.6 之间, 干旱类型从无旱到重旱, 从趋势线来看, 干旱趋势几乎未发生变化。

基于标准化降水指数(SPI)评价重庆地区干旱发生的频率和强度具有重要的影响, 评价结果能够为该地区制定气候变化措施提供一定科学参考。然而, 研究中存在一些不足, 本研究仅以重庆地区的降水量为基础, 分析该地区干旱发生的频率和强度, 而未考虑土壤水分、连续无降水日、植被、地形等诸多因素对干

旱的影响。因此,结合实际区域的情况,进一步考虑综合植被、土壤相对湿度、连续无雨日、降雨日数、地形等指标对重庆地区的干旱演变特征进行深入全面地研究。

#### [参 考 文 献]

- [1] 高阳华,冉荣生,唐云辉,等.重庆市干旱的分类与指标[J].贵州气象,2001,25(6):16-18,30.
- [2] 郭跃,王建华.重庆市特大旱灾的自然与社会机制分析[J].环境科学与技术,2007,30(8):47-50.
- [3] 李克让.中国干旱灾害研究及减灾对策[M].河南郑州:河南科学技术出版社,1999.
- [4] 任尚义.干旱概念的探讨[J].干旱地区农业研究,1991,9(1):78-80.
- [5] Dawmh G. Understanding the drought phenomenon: The role of definitions[J]. Water International, 1985,10(3):111-120.
- [6] 李维京,赵振国,李想,等.中国北方干旱的气候特征及其成因的初步研究[J].干旱气象,2003,21(4):1-5.
- [7] 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58年演变特征[J].农业工程学报,2010,26(7):50-59.
- [8] 王莺,赵福年,姚玉璧,等.基于Z指数的石羊河流域干旱特征分析[J].灾害学,2013,28(2):100-106.
- [9] 杨晓华,杨小利.基于Z指数的陇东黄土高原干旱特征分析[J].干旱地区农业研究,2010,28(3):248-253.
- [10] 马柱国,符淙斌.中国北方干旱区地表湿润状况的趋势分析[J].气象学报,2001,59(6):737-746.
- [11] 王越,江志红,张强,等.用Palmer湿润指数作西北地

区东部冬小麦旱涝评估[J].应用气象学报,2008,19(3):342-349.

- [12] 姚玉璧,董安祥,王毅荣,等.基于帕默尔干旱指数的中国春季区域干旱特征比较研究[J].干旱区地理,2007,30(1):22-29.
- [13] Hayes M J, Svoboda M D, Wilhite D A, et al. Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2010,80(3):429-438.
- [14] 翟禄新,冯起.基于SPI的西北地区气候干湿变化[J].自然资源学报,2011,26(5):847-857.
- [15] 周扬,李宁,吉中会,等.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):1694-1706.
- [16] 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58年演变特征[J].农业工程学报,2010,26(7):50-59.
- [17] 包云轩,孟翠丽,申双和,等.基于CI指数的江苏省近50年干旱的时空分布规律[J].地理学报,2011,66(5):599-608.
- [18] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C]// Proceedings of the 8th conference of applied climatology. California Anaheim: American Meteorological Society, 1993.
- [19] 国家气候中心. GB/T20481-2006 气象干旱等级[S].北京:中国标准出版社,2006.
- [20] 吴建峰.基于TRMM和MODIS卫星数据的重庆市干旱监测模型构建[D].重庆:重庆师范大学,2015.

(上接第196页)

- [4] Kang Le, Han Xingguo, Zhang Zhibin, et al. Grassland ecosystems in China: Review of current knowledge and research advancement[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 2007, 362(1482): 997-1008.
- [5] 方精云,杨元合,马文红,等.中国草地生态系统碳库及其变化[J].中国科学:生命科学,2010,40(7):566-576.
- [6] 朴世龙,方精云,贺金生,等.中国草地植被生物量及其空间分布格局[J].植物生态学报,2004,28(4):491-498.
- [7] Jian Ni. Estimating net primary productivity of grasslands from field biomass measurements[J]. Plant Ecology, 2004, 174(2): 217-234.
- [8] 王妮,彭书时,方精云.中国北方天然草地的生物量分配及其对气候的响应[J].干旱区研究,2008,25(1):90-97.
- [9] 许鹏,安沙舟.荒漠草地生态优化的调控原则和总体模式[J].植物生态学报,1996,20(5):389-396.
- [10] 张杰,张强,何金梅,等.荒漠草原牧草生物量的遥感估

算及空间分布[J].生态学报,2007,27(6):2294-2301.

- [11] 马文红,杨元合,贺金生,等.内蒙古温带草地生物量及其与环境因子的关系[J].中国科学:生命科学,2008,38(1):84-92.
- [12] 刘金荣,张芬琴,谢晓蓉.试论河西走廊干旱荒漠化草地生态危机与畜牧业可持续发展[J].干旱地区农业研究,2002,20(3):114-116.
- [13] 崔夺,李玉霖,王新源,等.北方荒漠及荒漠化地区草地上生物量空间分布特征[J].中国沙漠,2011,31(4):808-813.
- [14] Yang Yuanhe, Fang Jingyun, Ji Chengjun, et al. Above-and belowground biomass allocation in Tibetan grassland[J]. Journal of Vegetation Science, 2009,20(1):177-184.
- [15] 安尼瓦尔·买买提,杨元合,郭兆迪,等.新疆草地植被的地上生物量[J].北京大学学报:自然科学版,2006,42(4):521-526.