

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20230155

# 近50年滇池流域汛期降水时空演变特征分析

邓丽仙<sup>1</sup>, 杨帆<sup>2</sup>, 杨洋<sup>3</sup>, 李姣<sup>4</sup>, 赵兰兰<sup>5</sup>, 胡成龙<sup>1</sup>, 李长江<sup>1</sup>

1. 云南省水文水资源局昆明分局, 云南 昆明 650106;
2. 云南省水文水资源局, 云南 昆明 650106;
3. 云南省水文水资源局德宏分局, 云南 芒市 678400;
4. 云南省水文水资源局红河分局, 云南 红河 661199;
5. 水利部信息中心, 北京 100053)

**摘要:**以滇池流域1970—2020年汛期(5—10月)降水量资料为依据,利用地理信息技术,采用Mann-Kendall检验法、小波分析等方法,分析近50年来滇池流域汛期降水年际变化的趋势性、周期性以及集中度、集中期、降水中心和旱涝发生频率等演变特征。结果表明:(1)近50年来,滇池流域汛期降水总体呈减少趋势,中部地区降水呈增加趋势,盘龙江上游的松华坝水库以上区域及南部地区降水呈减少趋势;(2)汛期降水年际变化存在31a的主周期,中部主城区降水集中度高于南部地区;(3)汛期降水的中心整体呈现向东部、南部方向偏移的态势,且移动趋势显著;(4)滇池流域旱涝频发,尤其盘龙江中段昆明主城区为旱涝多发区。该成果对滇池流域水旱灾害防御及水资源管理具有参考意义。

**关键词:**滇池流域;汛期降水;集中度;集中期;降水中心;旱涝特征

**中图分类号:**P33;TV11

**文献标识码:**A

**文章编号:**1000-0852(2024)02-0113-08

## 0 引言

滇池流域地处云南省昆明市腹地,流域内人口密集,国民经济和社会的发展程度位居全省首位。近年来,受人类活动和气候变化的共同影响,流域内旱涝灾害频发并已成为影响昆明市经济发展和人民生活的主要气象灾害之一<sup>[1]</sup>。滇池流域87.5%的降水量集中在汛期,汛期降水的多寡和分布对流域防洪、抗旱等工作产生直接影响。在全球变暖的气候变化背景下,极端天气气候事件频发和昆明城市化进程的不断加快,导致汛期降水非均匀性变化日益显著,加剧了流域内旱涝灾害的发生。

以往对于滇池流域降水特点的研究多是对变化趋势和周期<sup>[2-4]</sup>,少见对流域降水非均匀性评价的研究。因此深入分析滇池流域汛期降水的演变趋势、集

中程度、变化周期、降水中心和旱涝特征等时空演变特征,不仅有助于了解气候变化下汛期降水的演变规律,还能够为滇池流域防灾减灾、城市供水安全、滇池水环境及洪水风险治理、牛栏江—滇池补水工程运行调度提供一定参考,尤其对划分区域洪涝灾害重点防御时段具有较强的指导意义。

鉴于此,本文根据滇池流域24个雨量站1970—2020年汛期逐日实测降水量资料,计算汛期降水集中度和集中期<sup>[5]</sup>,同时借助地理信息技术进行数据处理<sup>[6]</sup>,采用小波分析、M-K检验等方法,从量值、集中度与集中期、降水中心和旱涝指数等方面研究滇池流域汛期降水的非均匀性特点和时空演变特征,以期为该流域旱涝灾害防治及水资源合理应用提供理论依据和实践参考。

收稿日期:2023-05-08

网络首发日期:2023-12-27

网络首发地址:https://kns.cnki.net/kcms2/detail/11.1814.P.20231227.1449.001.html

基金项目:国家自然科学基金项目(52179011)

作者简介:邓丽仙(1972—),女,云南宜良人,学士,高级工程师,主要从事水文情报预报及水资源评价方面工作。E-mail:denglilian123@126.com

通信作者:杨帆(1981—),男,云南昆明人,硕士,高级工程师,研究方向为水文及干旱预测预报。E-mail:42071766@qq.com

## 1 基础资料与研究方法

### 1.1 流域概况

滇池位于昆明市西南部,是云贵高原上面积最大的天然淡水构造断陷湖,滇池流域地处长江干流金沙江右岸一级支流普渡河上游,汇水面积2 920 km<sup>2</sup>,流域范围涉及昆明市六区一县(五华区、官渡区、盘龙区、西山区、晋宁区、呈贡区及嵩明县),53个乡镇,其中滇池水面面积309 km<sup>2</sup>。滇池流域水系呈非对称发育,河流众多,主要有盘龙江、宝象河、柴河、东大河、洛龙河、捞鱼河、晋宁大河等35条河流呈向心状汇入滇池<sup>[7]</sup>。

滇池流域地处低纬高海拔区,受大气环流和季风影响,干湿季分明,降水量年内分配不均,多年平均年降水量933.3 mm,汛期(5—10月)多年平均降水量816.8 mm,占年降水总量的87.5%,主汛期(6—9月)多年平均降水量657.8 mm,占70.5%。汛期最大降水量的年份1986年,其值为1 086.7 mm,最小的年份为2011年,其值为470.3 mm。汛期降水量年际变化大,丰、枯悬殊,最大降水量为最小降水量的2.31倍,最大降水为多年均值的1.33倍,最小降水量仅为多年均值的58%。滇池流域河道沟渠众多且坡降缓,降雨时空分布不均,自古以来备受旱涝之患。近年来,随着经济建设的发展和城市化步伐的加快,旱涝灾害发生频率也在不断增加。

### 1.2 基础资料

选取滇池流域建站时间超50年的24个雨量站1970—2020年汛期逐日降水量数据为本次研究的基础资料,站点分布如图1所示。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 集中度与集中期

张录军等<sup>[8]</sup>提出的降水集中度(PCD)和集中期(PCP)的概念,可以较好地反映降水的时空分布特征,已经广泛运用于区域降水非均匀性评价,近年来许多学者利用此方法研究降水的年内非均匀分配特征,取得较多的研究成果<sup>[9-11]</sup>。其原理是将降水看作一个矢量,利用向量分析的原理来定义区域降水量时间分配的参数,以此定量地描述某一研究时段的降水集中程度和集中时段。集中度(PCD)能反映降水在研究时段内各天的集中程度,取值区间为0~1,值越大说明汛期降水的集中程度越高,越小则分布均匀;集中期(PCP)就是向量合成后所指的角度,反映了最大日降水量出现的时间,指示出降水合成后的总体效应。相比一般统计方法,集中度和集中期能够更好地反映滇池流域

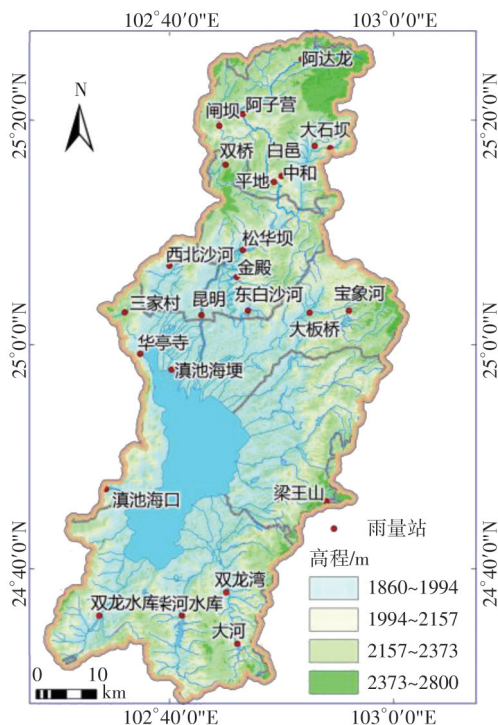


图1 滇池流域雨量站点分布

Fig.1 Distribution of rainfall stations in Dianchi basin

汛期降水的时空分布特征,从降水这一气象要素的角度解释滇池流域频繁出现旱涝灾害的原因。

以滇池流域24站汛期(5月1日—10月31日)逐日降水资料计算汛期降水集中度和集中期,计算方法见公式(1)。过程如下:①每日降水量依据各自特定的角度,计算出水平分量和垂直分量;②分别进行水平分量累加和垂直分量累加;③2个分量累加值计算矢量模,矢量模与汛期降水量的比值为汛期降水量的集中度;④计算出来的PCP为弧度值,将其作为自变量对其进行对应日期的换算。

$$\begin{cases} R_{xi} = \sum_{j=1}^n r_{ij} \sin \theta_j \\ R_{yi} = \sum_{j=1}^n r_{ij} \cos \theta_j \\ PCD = \sqrt{R_{xi}^2 + R_{yi}^2} / R_i \\ PCP = \arctan(R_{xi} / R_{yi}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $R_{xi}$ 为降水量垂直分量的累计值; $R_{yi}$ 为降水量水平分量的累计值; $R_i$ 为雨量站点第*i*年汛期降水总量;*i*为年份(*i*=1970, 1971, ..., 2020);*j*为时序,即5月1日—10月31日的时序总长(*j*=1, 2, ..., 184); $r_{ij}$ 为对应年份每日降水量; $\theta_j$ 为每日对应的方位角,即将184天看作是一个圆周,每一天对应的角即为方位角, $\theta_j$ 取值范围为 $[-\pi, \pi]$ 。

1.3.2 非参数 Mann-Kendall 检验

非参数 Mann-Kendall 检验法因具有较好的检测分析效果,常应用于一定时间尺度下降水和气温等气候要素的变化趋势检验<sup>[12-14]</sup>。步骤为:分别构造顺序和逆序时间序列的秩序列 $S_k$ ,计算标准正态分布顺序统计量 $UF_k$ 和逆序统计量 $UB_k$ ,取信度 $\alpha=0.05$ ,查 $U_{0.05}=\pm 1.96$ 。将 $UF_k$ 和 $UB_k$ 曲线与 $\pm 1.96$ 两条直线绘制在一张图上,若 $UF_k$ 或 $UB_k$ 的值大于0,表明序列呈现上升趋势,小于0则呈现下降趋势,当它们超过临界直线时,表明上升或下降趋势显著。超过临界线的范围确定为出现突变的时间区域。如果 $UF_k$ 和 $UB_k$ 两条曲线出现交点,且交点在临界线之间,则交点对应的时刻便是突变开始的时间<sup>[15-16]</sup>。

1.3.3 Morlet 小波分析

小波变换是在傅里叶变换的基础上发展起来的,是空间(时间)和频率的局部变换。小波分析能明显地揭示隐藏在时间序列中存在的多种变化周期,能够反映系统随时间尺度变化的趋势,且能对系统未来的演变趋势进行定性的预测,现已广泛运用到水文学分析过程中<sup>[17-19]</sup>。小波的种类很多,本文采用 morlet 小波进行分析。

1.3.4 标准化降水指数(SPI)

标准化降水指数(SPI)是由 T.B.McKee 等人 1993 年首次提出的研究不同时间尺度与干旱发生频率及持续时间之间关系的一种方法<sup>[20]</sup>,它采用 $\Gamma$ 分布概率来描述降水量的变化,将偏态概率分布的降水量进行正态标准化处理,最终用标准化降水累积频率分布来划分旱涝等级。计算公式参考文献<sup>[21]</sup>,等级指标见表 1。

表 1 SPI 指数旱涝等级划分  
Table 1 Classification of drought and flood grades for SPI index

旱涝等级	特旱	重旱	中旱	轻旱	正常	轻涝	中涝	重涝	特涝
SPI 值	$\leq -2.0$	$(-2.0, -1.5]$	$(-1.5, -1.0]$	$(-1.0, -0.5]$	$(-0.5, 0.5)$	$[0.5, 1.0)$	$[1.0, 1.5)$	$[1.5, 2.0)$	$\geq 2.0$

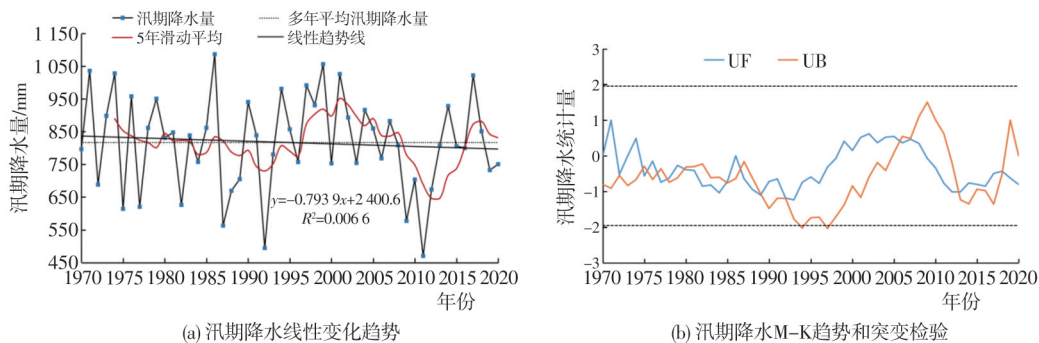


图 2 1970—2020 年滇池流域汛期降水年际变化  
Fig.2 Interannual variation of flood precipitation in the Dianchi basin from 1970 to 2020

2 时空演变特征分析

2.1 汛期降水量趋势性和周期性分析

由滇池流域逐年汛期面雨量年际变化过程线可以看出(图 2),近 50 年来汛期降水总体呈减少趋势( $-0.79 \text{ mm/a}$ ),大致经历了正常~偏枯~偏丰~偏枯~正常 5 个阶段;20 世纪 70 年代至 80 年代中期相对平稳,1987—1992 处于相对减少期,1993—2001 年整体呈现增加的态势,其中,1997—2001 年进入丰水期,2002—2013 年呈持续减少趋势,2009—2013 年出现连续枯水期,2014 年后逐渐趋于平均。采用 M-K 趋势和突变检验, $UF$ 和 $UB$ 有多个交点,但均在 95% 置信区间内,变化不显著。

采用最小二乘法建立汛期降水与时间序列的回归方程,得到各站点逐年汛期降水量的线性变化趋势值,通过空间插值将其布置在滇池流域上(见图 3)。从而看出,滇池流域中部区域汛期降水量呈增加趋势,而北部盘龙江上游松华坝水库以上区域、南部晋宁区、安宁市大部则呈减少趋势。其变化规律与昆明主城区分布于滇池流域中部,城市热岛效应影响导致城市暴雨频发的实际相符<sup>[22]</sup>。

采用 Matlab 软件对滇池流域 1970—2020 年的汛期降水量序列进行小波分析,绘制小波系数实部等值线、小波方差和四种尺度下实部变换过程线(见图 4~图 6)。

从图 4 可看出 1970—2020 年滇池流域汛期降水量在时间序列上的周期变化过程,黄色区域为降水偏多期,蓝色区域为降水偏少区。汛期降水在时间序列中



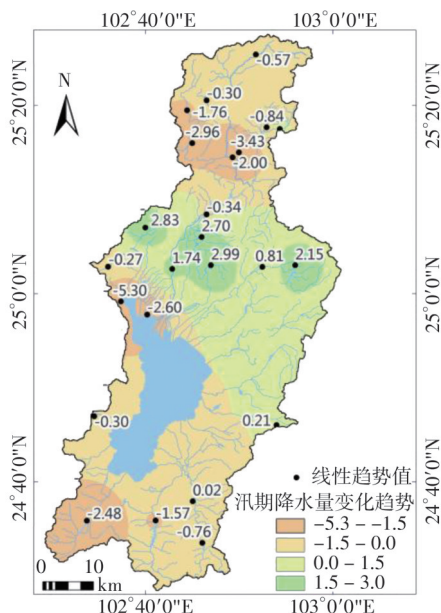


图3 1970—2020年滇池流域汛期降水量变化趋势分布  
Fig.3 Trend distribution of flood precipitation in Dianchi basin from 1970 to 2020

存在着3~4 a、7~8 a、14~17 a、28~32 a等4类尺度周期变化规律。

小波方差图(图5)中有四个较为明显的峰值,它们依次对应着4 a、7 a、15 a以及31 a等四个时间尺度。其中,最大峰值对应的时间尺度是31 a,说明31 a的周期震荡最强,为流域汛期降水量变化的第一主周期;第二峰值对应的时间尺度是15 a,为第二主周期;第三、第四峰值对应的时间尺度分别为4 a和7 a,它们分别为第三和第四主周期。上述4个周期的波动控制着流域汛期降水在整个时间域内的变化特征。

4个周期中以28~32 a尺度上周期变化最为显著,中心时间尺度为准31 a,8 a以下的小尺度周期变化则不明显。在31 a尺度上出现2个偏大中心(发生时间为1974年、2005年)和3个偏小中心(发生时间为1984年、1992年以及2011年),经历了大-小交替的准2次振荡,

即汛期降水量经历了2个丰枯转换期。在14~17 a时间尺度上周期变化也较为显著,存在准4次振荡,即汛期降水在此尺度下经历了4个周期的丰-枯变化;同时还可以看出,2019年后出现蓝色区域,其等值线尚未闭合,这说明2019年以后的一段时间,汛期降水量仍将偏少。

图6显示了小波系数实部在不同尺度(4 a、7 a、15 a、31 a)下的变换过程,变换系数为0对应丰枯突变点,正值代表汛期降水量偏多,负值则偏少。可以看出,4 a、7 a尺度下丰枯突变点较多,汛期降水量偏多和偏少两种情况交替出现且较频繁。15 a尺度下丰枯年突变点为1977年、1994年和2019年。31 a尺度下,丰枯突变点为1989年、1998年、2019年。

## 2.2 汛期降水集中度和集中期时空特点

对滇池流域逐年汛期降水集中度(PCD)和集中期(PCP)进行统计,图7为1970—2020年汛期降水集中度和集中期年际变化曲线,可以看到流域多年平均集中度为0.31,最大值为0.55(1998年),最小值为0.11(1992年)。历年集中度呈波动型变化,1983—1992年为下降阶段,1992—1998年持续上升,1999—2003年小幅波动,集中度小于均值,降水相对均匀;2005—2018年集中度年际波动幅度大,降水分布均匀年份与不均匀年份交替出现。实际上,这期间,滇池流域旱涝灾害频繁,2009—2013年滇池流域发生连续5年有资料记录以来最长的枯水年组,而“20060708”“20080701”“20130719”“20170720”则发生了强降水导致的严重洪涝灾害,这也说明了,滇池流域汛期降水集中度的变化与旱涝灾害有着密切的相关关系,一般来说,汛期降水时间分配不均匀时旱涝灾害极易发生。滇池流域汛期降水集中度线性变化趋势的变化率为 $-0.006/100$  a,呈弱减小趋势,说明汛期降水分布不均匀性将减小,但这一变化趋势经M-K检验不显著。

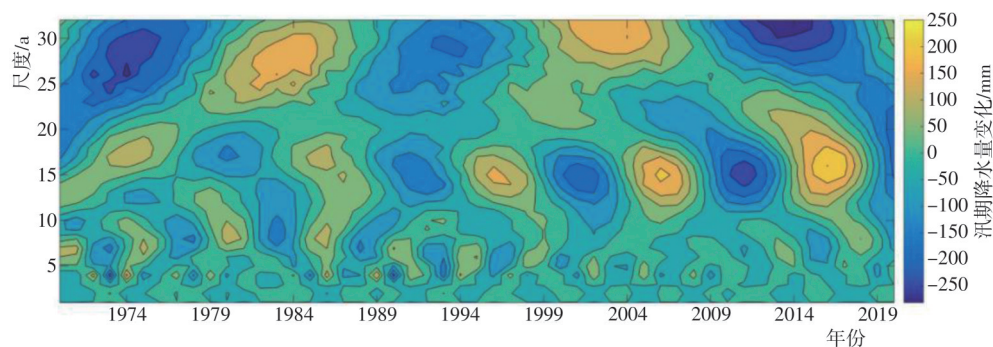


图4 1970—2020年滇池流域汛期降水量小波系数实部等值线  
Fig.4 Real part contours of wavelet coefficients of flood precipitation in Dianchi basin from 1970 to 2020

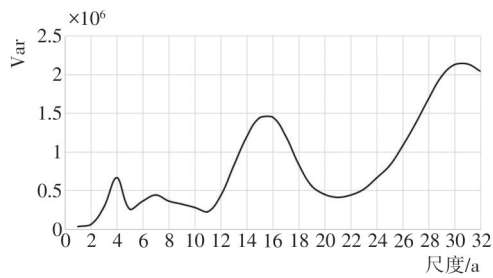


图5 1970–2020年滇池流域汛期降水过程小波方差  
Fig.5 Wavelet variance of precipitation process in the flood season of Dianchi basin from 1970 to 2020

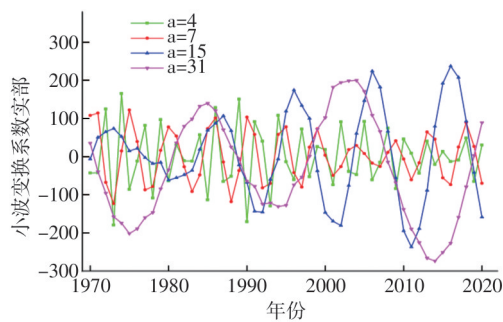


图6 不同尺度下实部变换过程  
Fig.6 Real part transformation process at different scales

从历年集中期的年际变化看,滇池流域汛期降水主要集中在7月上旬至8月中旬,7月8日—8月16日之间,历年均值为7月24日。最早出现在1998年7月8日,最晚出现在1987年8月16日,二者相差39天。*PCP* 总体呈弱增加趋势,线性趋势值为0.19天/10 a,说

明滇池流域每10 a集中期推迟了0.19天,经M-K检验,趋势没有通过0.05置信水平的显著性检验,说明变化不显著。

从图8中可以看出:①滇池流域*PCD*和*PCP*空间分布存在显著的地带性分布特征,集中度从南向北方向逐渐增大,总体上呈纬向分布,高值点位于主城区盘龙江中段(*PCD*为0.33,*PCP*为7月20日),低值点在大河、双龙、滇池海埂一带(*PCD*低于0.30,*PCP*为7月22左右);②流域中部和东北部处于相对多雨地带,是集中度高值区,这也是该片区区域常因强降水形成暴雨洪涝灾害的主要原因。

2.3 汛期降水中心变化特点

采用GIS空间统计工具处理逐年汛期降水数据,得到滇池流域逐年汛期降水的中心。结果表明,滇池流域汛期降水中心位于流域中部盘龙江中下游,松华坝水库以下至滇池河口的中段,主城区中东部,五华区、盘龙区与官渡区交界地带(见图9)。各中心点经纬度分别平均后,地理坐标为25°2′52″N,102°45′23″E。将逐年汛期降水的中心的经度和纬度分别点绘成经向、纬向变化曲线,可以看出,经向有增大趋势,纬向有减少趋势,即滇池流域汛期降水的中心有向东和向南偏移的趋势。采用Mann-Kendall分别对经度和纬度进行序列突变检验,统计量分别为4.75和-3.28,二者均通过了95%的显著性检验,说明汛期降

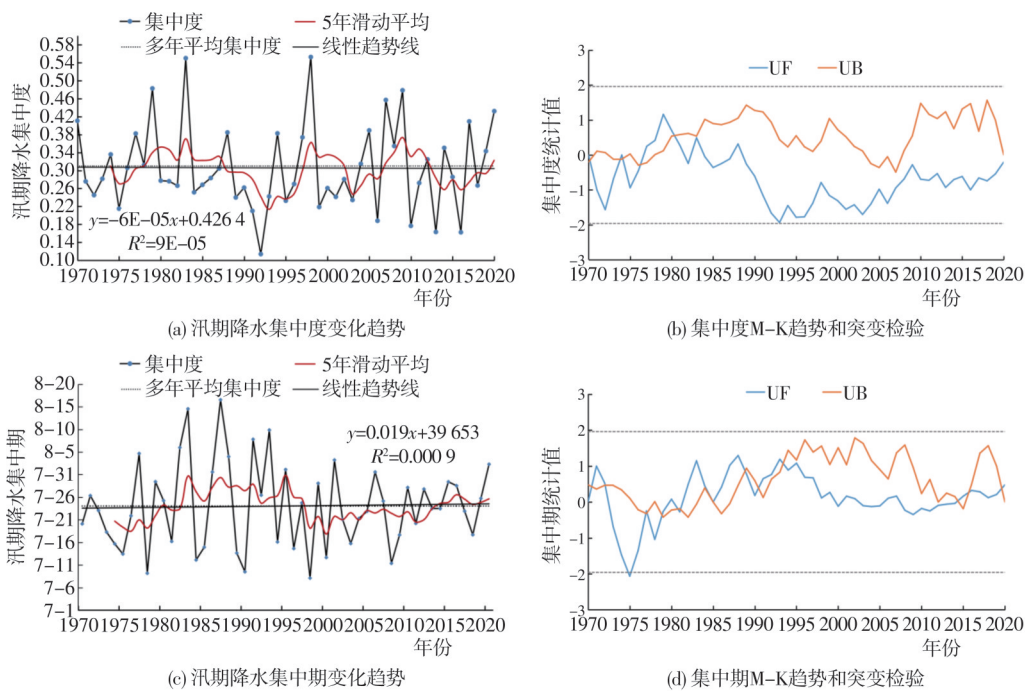


图7 1970–2020年滇池流域汛期降水集中度和集中期年际变化  
Fig.7 Interannual variation of flood precipitation concentration and concentration period in Dianchi basin from 1970 to 2020



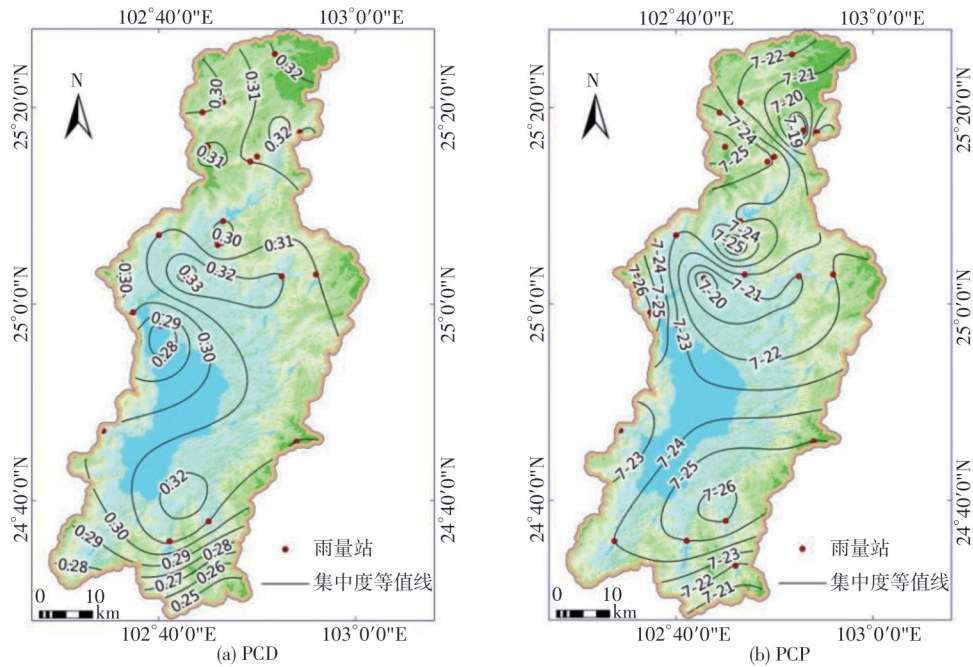


图8 滇池流域汛期降水多年平均集中度(PCD)和集中期(PCP)等值线  
Fig.8 Multi-year average concentration (PCD) and concentration period (PCP) contours of flood precipitation in Dianchi basin

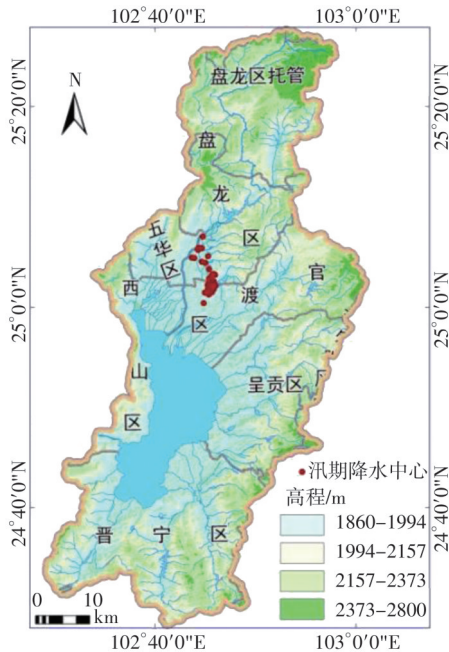


图9 滇池流域历年汛期降水中心分布  
Fig.9 Distribution of the center of gravity of precipitation in the Dianchi basin during the flood season

水中心向东和向南移动趋势显著。降水中心的偏移情况一定程度上可以反映出降水集中区的移动情况,从图10、图11反映出的移动趋势可以看出,未来一定时期内,滇池流域中东部地区汛期降水量可能会增加,北部、西部地区汛期降水量则会减少,有可能出现中东部涝,北部和西部则相对偏旱的变化趋势。突变年份为

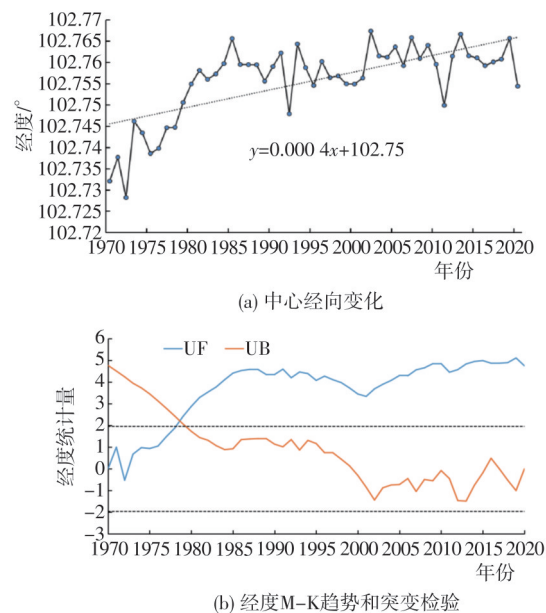


图10 滇池流域历年汛期降水中心经向变化曲线  
Fig.10 The longitudinal change curve of the center of gravity of precipitation in the Dianchi basin during the flooding period of all years

1979年,这一变化规律与昆明城市建设进程加快后产生的城市热岛效应对降雨的影响有关<sup>[23]</sup>。昆明市主城区建设范围于1980年前后开始大范围向东南方向扩张,建成区面积由20世纪80年代初的22.6 km<sup>2</sup>逐步增加至2020年的483 km<sup>2</sup><sup>[24]</sup>,受城市热岛效应的影响,暴雨覆盖范围逐步向东南方向延伸,从而导致暴雨中心向东南方向移动。

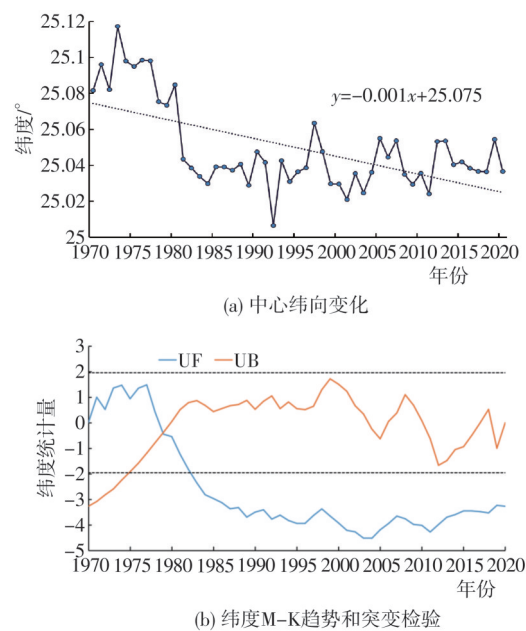


图 11 滇池流域历年汛期降水中心纬向变化曲线  
Fig.11 The latitudinal change curve of the center of gravity of precipitation in the Dianchi basin during the flood season in the past years

2.4 滇池流域汛期旱涝变化特征

分析 24 个雨量站点的标准化降水指数(SPI),用于表征单站的旱涝等级。滇池流域雨量站网密度大且分布均匀,各站 SPI 值在相同时间尺度内基本一致,取平均值计算出该流域 1970—2020 年 SPI 值,点绘滇池流域历年平均 SPI 指数变化过程和 M-K 趋势和突变检验曲线(见图 12)。由图 12 可知,滇池流域 51 年间 23 年属正常年份,所占频率 45.1%;有 13 年发生干旱,干旱发

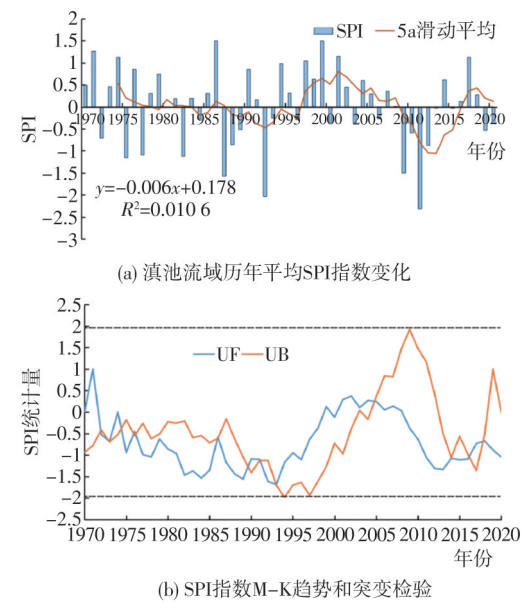


图 12 滇池流域历年 SPI 指数变化过程  
Fig.12 The process of SPI Indexes over the years in Dianchi basin

生频率为 25.5%,其中轻旱和中旱的发生频率平均值分别为 11.8% 和 7.8%,高于重旱和特旱(2.0% 和 3.9%);有 15 年发生了洪涝,洪涝发生频率为 29.4%,其中轻涝和中涝的平均发生频率分别为 15.7% 和 9.8%,重涝 3.9%。重涝年份出现在 1986 和 1999 年,特旱年份为 1992 和 2011 年,连续干旱出现在 2009—2013 年,滇池流域旱涝频发且旱涝发生频率基本均等,发生轻中度旱涝的频率高于重特度旱涝频率,但变化趋势不显著。

采用各站旱涝等级所出现的概率比值来反映流域旱涝分布特征,分别绘制滇池流域历年干旱(洪涝)频率分布图(见图 13、图 14)。表明,滇池流域南

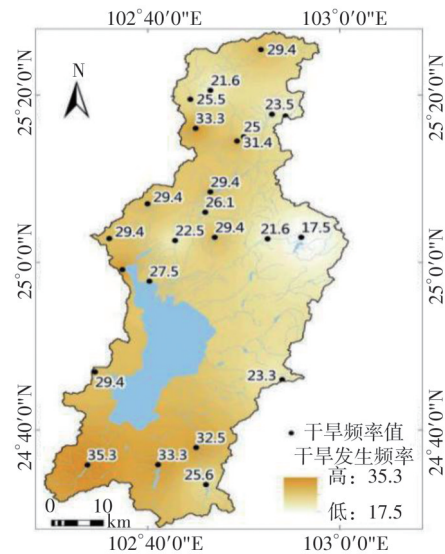


图 13 滇池流域历年干旱发生频率分布  
Fig.13 Frequency distribution of droughts in Dianchi basin over the years

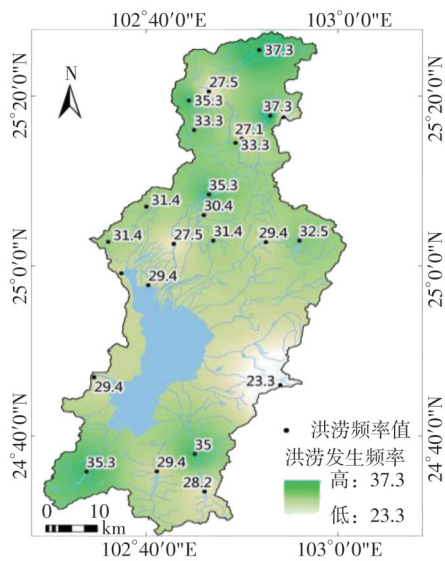


图 14 滇池流域历年洪涝发生频率分布  
Fig.14 Frequency distribution of floods in Dianchi basin over the years

部和中部盘龙江中上游大部分地区是干旱多发区,而流域北部及中部盘龙江中上游和南部局地则是洪涝多发区,盘龙江中上游地区(昆明市主城区)是旱涝多发区。

### 3 结论

(1)近50年滇池流域汛期降水量总体呈减少趋势( $-0.79\text{ mm/a}$ ),且呈现中部地区增加,南部及盘龙江中上游地区则减少趋势。

(2)近50年滇池流域汛期降水量存在准31 a周期,按周期变化规律预计滇池流域2019年以后的一段时间,汛期降水量仍将持续偏少。

(3)滇池流域汛期降水集中度由南部和西南部向东北方向逐渐增大,较南部地区而言,中部和东北部汛期降水相对集中,是集中度高值区。流域汛期降水中心整体上有向东和向南偏移的态势,且移动趋势显著。滇池流域汛期降水多年平均集中度0.31,主要集中在7月上旬至8月中旬,多年平均集中期为7月24日,集中期每10年推迟0.19天。

(4)预计未来一段时期,滇池流域中东部地区汛期降水量可能会增加,北部、西部地区汛期降水量则会减少,有可能出现中东部涝、北部和西部则相对偏旱的变化趋势。

(5)滇池流域近50年来有45.1%的年份汛期降水属正常,其余年份旱涝灾害频发,发生轻中度旱涝的频率明显高于重特大旱涝频率,干旱发生区面积稍大于洪涝发生面积,主要集中于流域中北部及南部局地,昆明市主城区也就是盘龙江中上游地区是旱涝多发区。

#### 参考文献:

- [1] 白树明,黄中艳.云南旱灾特点和未来10年干旱趋势预测[J].广州:人民珠江,2003(6):4-6.
- [2] 刘新有,黄英,袁树堂.昆明松华坝水源地降水特征及小波分析[J].水文,2013,33(2):59-63.
- [3] 吕亚光,吴利华,叶文,等.滇池流域近60年降水变化趋势及突变与周期分析[J].昆明理工大学学报,2016,41(2):33-44.
- [4] 刘佳旭,李丽娟,李九一,等.滇池流域降水时空变异特征分析[J].地球信息科学,2015,17(4):451-461.
- [5] 魏鹤举.降水集中度与集中期的Excel计算方法研究[J].人民黄河,2017,39(4):58-61.
- [6] 汤国安,杨昕.ArcGIS地理信息系统空间分析实验教程[M].北京:科学出版社,2006.
- [7] 昆明市水利志编撰委员会.昆明市水利志[M].昆明:云南人民出版社,1997.
- [8] ZHANG L, QIAN Y. Annual distribution features of the yearly precipitation in China and their interannual variations [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2003, 17(2): 146-163.
- [9] 纳丽,李欣,朱晓伟,等.宁夏近50年降水集中度和集中期特征分析[J].干旱区地理,2012,35(5):724-731.
- [10] 吴浩云,王银堂,胡庆芳,等.太湖流域61年来降水时空演变规律分析[J].水文,2013,33(2):75-81.
- [11] 张录军,钱永甫.长江流域雨季降水集中度和旱涝关系研究[J].地球物理学报,2003,47(4):622-630.
- [12] MANN H B. Nonparametric tests against trend [J]. Econometric, 1945, 13(3):245-259.
- [13] KENDALL M G. Rank Correlation Methods [M]. Charles Griffin and Company, Limited, London, 1975.
- [14] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,2007.
- [15] 王乐,刘德地,李天元,等.基于多变量M-K检验的北江流域降水趋势分析[J].水文,2015,35(4):85-90.
- [16] 张耀鑫,姚传辉,王刚.基于M-K法与SPI指数的泰安降水量分析[J].海河水利,2022(4):97-100.
- [17] 桑燕芳.水文序列小波分析与预报方法的研究及应用[D].南京:南京大学,2011.
- [18] 易淑珍,王钊.水文时间系列周期分析方法探讨[J].水文,2005(4):26-29.
- [19] 高月,卞建民,宋超,等.基于小波分析的抚松县降水量变化对矿泉水资源量的响应研究[J].水文,2016,36(2):35-40.
- [20] MCKEE T B, DOESKEN N J, KLEIST J. The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales [C]//Eighth Conference on Applied Climatology. Bulletin of the American Meteorological Society, 1993: 179-184.
- [21] HAYES M J, MD SVOBODA, WILHITE D A, et al. Monitoring the 1996 Drought Using the Standardized Precipitation Index [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1999, 80(3):429-438.
- [22] 崔松云,史如庄.城市热岛效应对昆明市降雨量的影响分析[J].水电能源科学,2010,28(10):10-12.
- [23] 王志浩,李彤,刘金欣,等.昆明热岛效应对降雨量的影响分析[J].科技通报,2022,38(4):87-91.
- [24] 昆明市水利水电勘测设计研究院,昆明市规划设计研究院.昆明市城市排水(雨水)防涝综合规划(2014-2030)[R]. 2013.

(下转第127页)