

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.01.001

珠江流域 1981—2020 年水文干旱时空特征分析

吴志勇^{1,2}, 白博宇¹, 何海¹, 李源¹, 徐华亭³

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098; 3. 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200434)

摘要: 基于 VIC 模型和汇流模型生成的 1981—2020 年 5 km×5 km 网格模拟流量数据, 构建了长历时、网格化的标准化径流干旱指数(SRDI), 对珠江流域水文干旱时空演变特征进行了评估。结果表明: 基于模拟流量构建的网格化 SRDI 能够较好地模拟珠江流域干旱时空演变过程; 珠江流域水文干旱的时间演变特征明显, 干旱集中发生在夏季, 秋季可能发生大范围的水文干旱, 季节尺度上一年四季均有可能发生极端干旱; 珠江流域水文干旱在空间格局上呈现为自东向西由干旱高频区向干旱长历时、高烈度区过渡分布。

关键词: 水文干旱; 标准化径流干旱指数; VIC 模型; 珠江流域

中图分类号: S423 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2023)01-0001-09

Temporal and spatial characteristics of hydrological drought in the Pearl River Basin from 1981 to 2020

WU Zhiyong^{1,2}, BAI Boyu¹, HE Hai¹, LI Yuan¹, XU Huating³

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Shanghai Investigation, Design and Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200434, China)

Abstract: With the simulated runoff data at the 5 km×5 km grid cells from 1981 to 2020 based on the VIC model and the confluence model, a long-term and grid SRDI (standardized runoff drought index) was constructed. Then, the spatiotemporal evolution characteristics of drought in the Pearl River Basin were analyzed. The results show that: the grid SRDI based on simulated runoff can better simulate the spatiotemporal variation of drought in the Pearl River Basin; the temporal evolution characteristics of drought are obvious, hydrological drought mainly occurs in summer, and a large-scale drought may probably occur in autumn; on the seasonal scale, it is possible that extreme drought occurs all the year around; spatially speaking, the hydrological droughts in the Pearl River Basin present a transitional distribution from the east with high-frequency, to the west with long-duration and high-intensity.

Key words: hydrological drought; standardized runoff drought index (SRDI); VIC model; Pearl River Basin

水文干旱是指某段时间内地表水或者地下水收支不平衡, 出现水分短缺, 使得河川径流量亏缺, 地表水、水库蓄水和湖泊水位等低于其正常值的现象^[1]。珠江流域虽然年降水量充沛但受东亚季风影响, 降水时空分布不均^[2], 降水年际和年内变率大, 在全球变暖背景下, 水文干旱发生频率日益增大。自 1970 年以来, 流域内干旱事件增多, 干旱历时和强度增大, 给社会经济造成巨大影响^[3-4]。2004 年、2009 年、2010 年和 2011 年珠江流域均发生了重大水文干旱, 流域内江河水位长期处于低水位甚至断流状态, 水库有效蓄水量减少严重, 仅 2010 年农作物受旱面积就达 542 万 hm², 农业直接经济损失达 378 亿元^[5]。因此, 认识水文干旱时空演变特征, 对减小干旱灾害影响和提高旱灾监测准确度具有重要的意义^[6-7]。

不少学者通过对珠江流域气象水文干旱传递过程^[8]、水文干旱历时与强度等特征的概率分布^[9]、水库影响^[10]、缺水响应^[11]等研究, 揭示了珠江流域水文干旱特征和时空变化规律及其影响。在发生时间上, 吴

基金项目: 国家自然科学基金长江联合基金重点项目(U2240225); 国家重点研发计划(2017YFC1502403)

作者简介: 吴志勇(1979—), 男, 教授, 博士, 主要从事水文物理规律模拟及水文预报研究。E-mail: zywu@hhu.edu.cn

引用本文: 吴志勇, 白博宇, 何海, 等. 珠江流域 1981—2020 年水文干旱时空特征分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(1): 1-9.

WU Zhiyong, BAI Boyu, HE Hai, et al. Temporal and spatial characteristics of hydrological drought in the Pearl River Basin from 1981 to 2020[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(1): 1-9.

志勇等^[12]研究了西江流域水文干旱的年代际变化特征,发现1963年、1989年和2007年是水文干旱较为严重的年份。在发生空间上,陈毓灵等^[13]研究了西江流域水文干旱空间分布规律,发现柳江、郁江水文干旱发生较为频繁;肖名忠等^[8]的研究则显示东江流域下游水文干旱风险较高,中游因水库径流的调节作用水文干旱风险较低。上述研究为珠江流域旱情诊断、风险管理和防旱减灾提供了重要参考,但多数研究是基于站点流量资料开展的,在时空连续性方面存在一定的局限性,难以详细反映大范围水文干旱精细化时空演变特征。

本文选用标准化径流干旱指数(standardized runoff drought index, SRDI),基于可变下渗容量(variable infiltration capacity, VIC)模型和改进的5 km×5 km大尺度分布式汇流模型^[14],运用游程理论、集中度分析等方法,从高时空分辨率网格化SRDI、区域干旱和场次干旱多个角度分析珠江流域水文干旱时空演变规律,以此来揭示珠江流域水文干旱精细化特征。

1 研究区概况与研究数据

珠江流域位于我国东南部,横跨云南、贵州、广西、江西、福建、广东6省区,介于东经102°14′~115°53′、北纬21°31′~26°49′之间,流域面积44万km²,海拔由西南向东北逐渐降低。流域地处热带和亚热带季风气候区,部分地区属于干旱、半干旱少雨区域^[15],年平均气温在14~22℃,多年平均降水量为1525.1 mm,降水季节分配不均,大部分集中在4—9月的雨季,降水量由中西部往中北部递减。研究区域及站点分布如图1所示。

采用的气象数据为1981—2020年典型气象站的日降水数据、最高和最低气温数据,来自中国气象数据共享服务网(<http://data.cma.cn/>);水文数据为典型水文站日流量数据;DEM数据来自中国科学院云数据网站(<http://data.csdb.cn/>),分辨率为100 m;植被数据采用全球1 km×1 km土壤覆盖数据,各植被类型的相关参数参考了LDAS(land data assimilation system)的成果^[16-17];土壤数据采用Reynolds等^[18]开发的土壤数据库设定的各土壤参数值。

2 研究方法

构建5 km×5 km网格大尺度珠江流域VIC模型^[19]和汇流模型,用于网格化流量过程模拟。采用吴志勇等^[20]建立的VIC模型产流参数移用公式来确定珠江流域5 km网格的产流参数,采用Lu等^[14]的方法确定河道汇流参数。基于VIC模型生成产流,然后进行网格与子流域融合单元的河网划分、确定融合单元响应函数以及河道汇流演算,最后生成1981—2020年珠江流域5 km×5 km日尺度的网格流量数据。

2.1 SRDI

为研究干旱发生强度以及影响范围,首先需要构建干旱指数^[21-23]。Zaidman等^[24]提出了SRDI用于反映水文干旱;陆桂华等^[1]通过在全国范围选取代表性水文站并拟合其函数分布,发现对数正态分布对径流系列的拟合效果较好,尤其在南方站点更具优势,并通过我国七大流域的水文干旱监测结果验证了SRDI对水文干旱特征识别的有效性;吴志勇等^[12]通过采用SRDI揭示了西江流域水文干旱的时空变化特征,能合理反映水文干旱的演变特征和发展趋势。将天然径流序列以日为单位分成了366个子序列,并对子序列采用对数正态分布进行拟合,经过标准化后得到SRDI。SRDI计算公式如下:

$$I_{yd} = \frac{\ln Q_{yd} - \ln \bar{Q}_d}{\delta_{\ln Q_d}} \quad (1)$$

式中: I_{yd} 为第 y 年第 d 日的SRDI值; Q_{yd} 为第 y 年第 d 日的模拟流量; $\ln \bar{Q}_d$ 、 $\delta_{\ln Q_d}$ 分别为1981—2020年每年第 d 日流量对数形成的新序列的平均值和标准差。当SRDI为负时,表示河道天然来水量低于多年平均来水量,当SRDI小于或等于-0.5时有干旱发生。基于SRDI的干旱等级划分见表1。

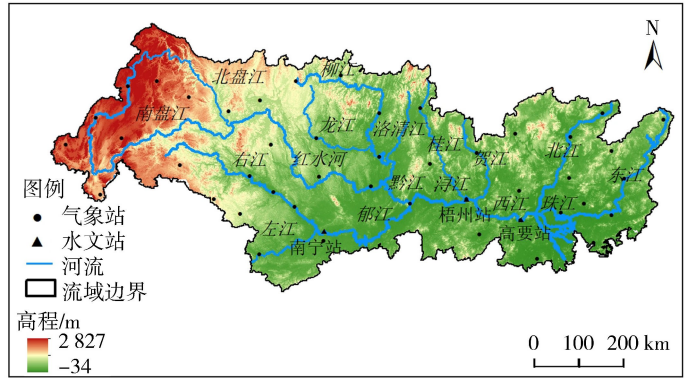


图1 研究区域及站点分布

Fig. 1 Study area and distribution of stations

2.2 干旱识别方法

游程理论^[26]广泛应用于干旱事件的识别中,将每一场干旱看作一次随机事件,以日为步长,基于 SRDI 序列进行干旱场次识别。对于区域干旱的识别通常包括 3 个步骤:①计算区域干旱面积 A (以发生干旱的面积占流域总面积的比例表示);②设置干旱面积阈值 A_c 和干旱历时阈值 D_c ;③设置合并干旱阈值 τ_c 。根据珠江流域历史干旱事件,通过对比不同干旱面积、干旱历时及合并干旱阈值,最终选择 $A_c = 30\%$ 、 $D_c = 60$ d 和 $\tau_c = 5$ d。对于网格干旱,则不需要考虑干旱面积,只需要根据每个网格的历时阈值和合并干旱阈值识别干旱事件,即当网格 SRDI 小于或等于 -0.5 的连续天数不小于 60 d,则被识别为一场干旱事件;当网格两场干旱事件的间隔时间不超过 5 d 时,则将两场干旱合并为一场干旱。

通过提取干旱历时 D 、干旱烈度 S 和干旱强度 I 等特征变量,分析所识别的干旱事件的干旱特征。干旱历时指一场干旱从开始到结束所持续的时间,干旱烈度指在干旱过程中干旱指数与干旱阈值之差的累计值(绝对值),干旱强度用来表征单位时间内干旱严重程度,数值上等于干旱烈度与干旱历时的比值。

2.3 集中度和集中期

集中度和集中期是由 Zhang 等^[27]在评价区域降水非均匀性时提出的,采用向量形式反映降水在研究区域内的分布特征。水文干旱集中度(hydrological drought concentration degree, HD CD)反映水文干旱在年内的集中程度,日尺度的水文干旱烈度累计至月尺度后以向量方式累加,其各分量之和的合成量占年水文干旱烈度的比例即为水文干旱集中度。集中期(hydrological drought concentration period, HD CP)是指水文干旱烈度向量合成后的矢量方位,反映水文干旱集中的月份,以垂直方向和水平方向 12 个月分量之和的比值正切角度表示^[27]。逐网格水文干旱集中度和集中期的计算公式如下:

$$C_i = \frac{\sqrt{S_{xi}^2 + S_{yi}^2}}{S_i} \quad (2)$$

$$P_i = \arctan\left(\frac{S_{xi}}{S_{yi}}\right) \quad (3)$$

其中 $S_{xi} = \sum_{j=1}^{12} S_{ij} \sin\theta_j$ $S_{yi} = \sum_{j=1}^{12} S_{ij} \cos\theta_j$

式中: C_i 、 P_i 分别为年内水文干旱的集中度和集中期, ($^\circ$); S_i 为网格年份 i 的水文干旱烈度; S_{ij} 为指定年份 i 和月份 j 的水文干旱烈度; S_{xi} 、 S_{yi} 分别为年份 i 年内月尺度的水文干旱烈度以向量方式累加到年尺度后在垂直方向、水平方向上的分量; θ_j 为各月对应的方位角, ($^\circ$)。

3 结果和讨论

3.1 网格流量数据平稳性检验

单位根检验(dickey-fuller test, DF 检验)是平稳性检验中常用到的一种方法,ADF 检验是一种扩充的 DF 检验,解决了 DF 检验中对随机项误差白噪声假设的问题^[28]。如果序列平稳,就不存在单位根;否则,就会存在单位根。ADF 检验的原假设是存在单位根,如果得到的显著性检验统计量小于 3 个置信度(10% : -2.57 ; 5% : -2.86 ; 1% : -3.43),则对应应有(90%、95%、99%)的把握来拒绝原假设。选择高要、南宁、梧州 3 个水文站 1981—2020 年日尺度的网格流量数据进行平稳性检验,检验结果分别为 -15.9 、 -15.1 和 -15.23 ,同时小于 1%、5%、10% 置信度,说明检验结果极显著地拒绝原假设,认为 3 个代表水文站网格流量数据平稳。

3.2 基于模拟流量的 SRDI 对比验证

基于 1981—2009 年珠江流域典型水文控制站所在网格的实测日径流序列,生成并对比 1981—2009 年的模拟与实测 SRDI 序列,评价网格模拟径流及 SRDI 在揭示珠江流域水文干旱时空特征上的适用性。1981—2009 年典型水文站实测与模拟 SRDI 的散点图以及实测与模拟 SRDI 过程对比如图 2 和图 3 所示,可以看出高要站、南宁站、梧州站模拟与实测 SRDI 的相关系数分别为 0.83、0.76 和 0.84,达到了显著和高度

表 1 基于 SRDI 的干旱等级^[25]

Table 1 Drought level based on standardized runoff drought index (SRDI)

等级	类型	SRDI 值	出现频率/%
1	无旱	> -0.5	69.1
2	轻旱	$> -1 \sim -0.5$	15.0
3	中旱	$> -1.5 \sim -1$	9.2
4	重旱	$> -2 \sim -1.5$	4.4
5	极旱	≤ -2	2.3

相关的水平。实测及模拟的SRDI过程线的相关性和一致性表明,选用5 km×5 km 网格径流构建逐网格水文干旱指数SRDI具有一定的可靠性。

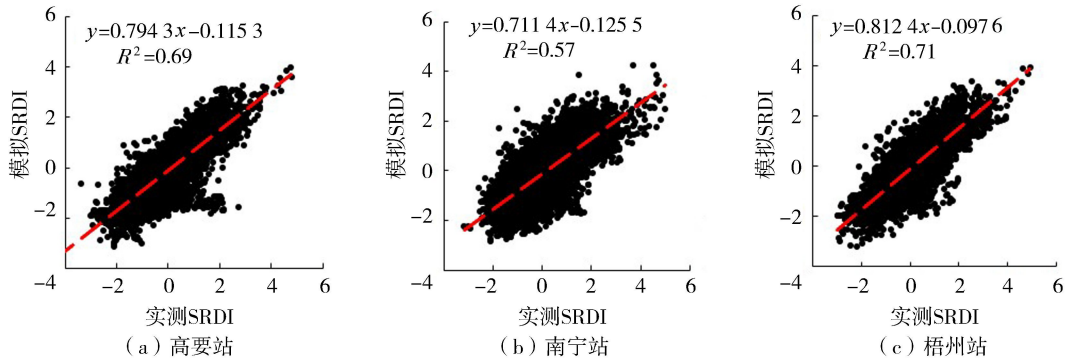


图2 1981—2009年典型水文站实测与模拟SRDI散点图

Fig. 2 Scatter chart of measured and simulated SRDI of typical hydrological stations from 1981 to 2009

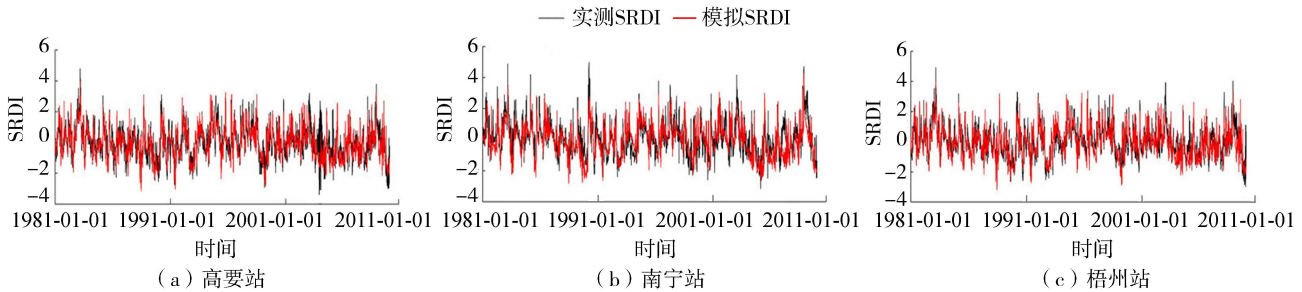


图3 1981—2009年典型水文站实测与模拟SRDI过程对比

Fig. 3 Comparison between simulated and measured SRDI processes of typical hydrological stations from 1981 to 2009

3.3 区域干旱识别

基于干旱事件识别方法,珠江流域1981—2020年共识别出了39场水文干旱。表2按照网格干旱强度从大到小列出了珠江流域相对较严重的14场历史干旱事件及特征变量,其中6场干旱发生于2000年以后。

据水资源公报统计数据,2004年珠江片区各地均出现了不同程度的干旱,特别是广东、广西旱情严重。2009年西江干流梧州河段、柳江、蒙江、桂江等江河出现的最枯流量也已接近或小于历年实测同期最小流量。2010年2—4月珠江流域西部的云南、贵州和广西3省区旱情不断发展,遭受百年不遇特大干旱。2011年6—8月珠江流域内云南、贵州、广西等部分地区干旱严重。2004—2005年、2009—2010年、2011—2012年3场干旱的起止时间、历时、强度等干旱特征与水资源公报数据统计结果和已有研究一致^[1,29-30],其余11场干旱发生时间也对应于典型干旱年份^[30],区域干旱识别结果比较合理。

3.4 水文干旱的时间演变特征

1981—2020年珠江流域水文干旱面积及网格平均干旱烈度的季节统计如图4所示,可以看出春夏秋冬四季平均水文干旱面积相差不大,分别为25.4%、31.0%、28.5%和23.6%,夏季相对较高。季节平均水文干旱面积为27.1%,该数值大小与SRDI的设置有关(干旱阈值设定为-0.5且SRDI小于-0.5的概率约为

表2 典型水文干旱事件及特征变量统计

Table 2 Statistics of typical hydrological drought events and characteristic variables

序号	起止时间	历时/d	面积/%	干旱强度
1	2011-03-28—2012-01-12	290	54.0	1.04
2	2009-08-10—2010-06-18	312	55.4	0.99
3	2012-03-31—2012-06-20	81	30.9	0.94
4	1989-04-25—1990-02-21	302	61.0	0.85
5	2015-03-17—2015-05-17	61	42.7	0.83
6	1987-01-11—1987-04-03	83	37.7	0.82
7	1998-08-14—1999-07-12	332	51.5	0.78
8	2004-08-08—2005-06-02	298	56.1	0.74
9	1991-02-24—1991-07-29	155	48.5	0.73
10	1988-04-01—1988-08-21	142	52.4	0.73
11	1985-06-03—1985-09-05	94	50.5	0.72
12	1990-07-18—1990-11-14	119	49.2	0.72
13	2013-05-26—2013-08-28	94	52.2	0.72
14	1992-08-01—1993-03-14	225	60.9	0.71

30.0%)。秋季水文干旱面积变化剧烈,整体在 1.4% ~ 75.2% 之间变化,表明秋季有较高的可能性发生大范围水文干旱,与陈子燊等^[31]得到的珠江流域秋旱十分突出等研究结果相近。冬季有 1 个年份(2005 年)水文干旱面积出现极值,达到了 61.9%。

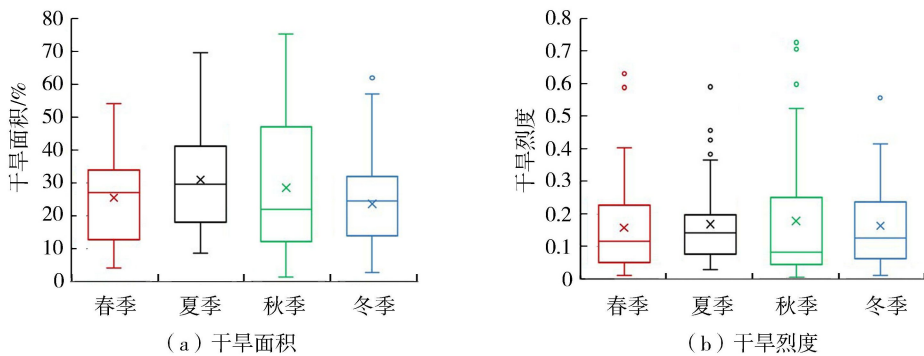


图 4 1981—2020 年珠江流域水文干旱面积与网格平均干旱烈度的季节统计

Fig. 4 Seasonal statistics of hydrological drought area and grid average drought intensity in the Pearl River Basin from 1981 to 2020

图 4 中的干旱烈度为网格均值,不同季节的平均干旱烈度基本一致,约为 0.17。春季、夏季、秋季和冬季网格干旱烈度均值达到中旱等级的年份分别有 2 个(1999 年、2010 年)、1 个(2011 年)、3 个(1989 年、2009 年、2011 年)和 1 个(2005 年),其发生季节在一定程度上揭示了 2009—2010 年秋冬春和 2010—2011 冬春夏连旱的特征。

1981—2020 年珠江流域水文干旱面积及干旱烈度的年际变化如图 5 所示,可以看出水文干旱面积和干旱烈度的年际变化呈现出相同的趋势,反映出 3 个多年连旱过程,分别为 1986—1992 年、2003—2007 年以及 2009—2013 年,与珠江水利委员会的旱灾统计结果相近,对应干旱面积分别为 35.5%、41.6% 和 38.8%,网格平均干旱烈度为 0.23、0.26 和 0.32。从干旱面积和干旱烈度来看,多年连旱的影响范围和缺水程度有所增加,一年四季均有可能发生极端干旱,与陈子燊等^[31]珠江流域四季干旱现象属于常态的研究结论一致。2011 年旱情比较突出,干旱面积为 1981—2020 年排位第 4 高的值,干旱烈度为 1981—2020 年的历史最高值,干旱主要在夏、秋季扩展,影响面积分别达到了 69.6% 和 53.2%,超过一半以上的区域遭遇干旱缺水,严重缺水主要表现在夏季和秋季,网格平均干旱烈度为 0.59 和 0.73,达到了中旱等级。

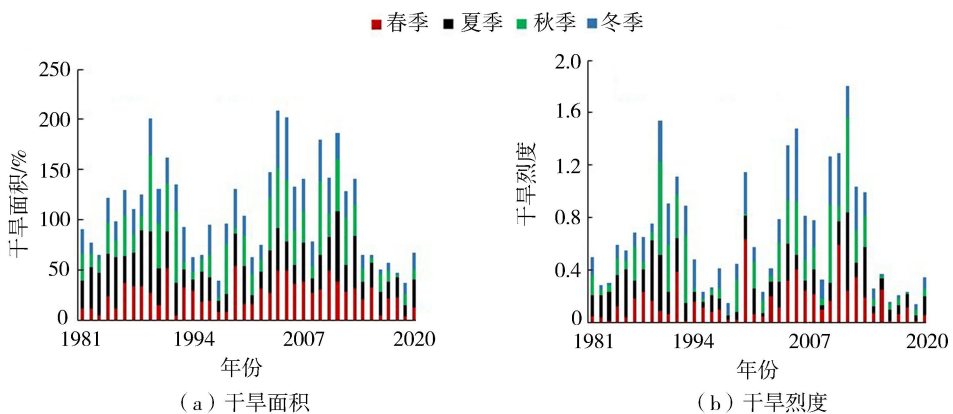


图 5 1981—2020 年珠江流域水文干旱面积与干旱烈度的年际变化

Fig. 5 Annual variation of hydrological drought area and drought intensity in the Pearl River Basin from 1981 to 2020

3.5 水文干旱的空间特征分析

3.5.1 多年平均与极值变化

1981—2020 年珠江流域水文干旱变量平均值的空间分布如图 6 所示,可以看出珠江流域中下游干旱频率较高,尤其是下游支流的桂江、贺江以及北江上游,上游红水河干旱频率相对较低,红水河南盘江段干旱频率多低于 4 年一遇,为全流域的干旱低频区。1981—2020 年珠江流域干旱频率超过 2 年一遇的区域面积为

67.7%,最大干旱频率约为0.8年一遇。

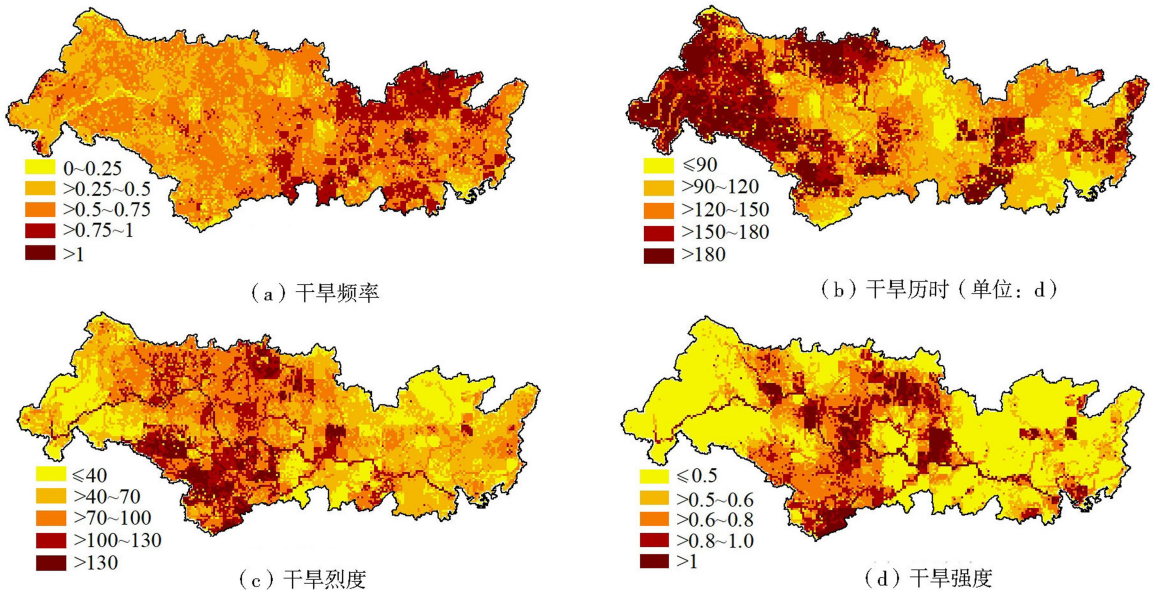


图6 1981—2020年珠江流域水文干旱变量平均值的空间分布

Fig.6 Spatial distribution of mean values of hydrological drought variables in the Pearl River Basin from 1981 to 2020

珠江流域中上游干旱历时较长,更容易发生长历时、高烈度的水文干旱。流域内平均干旱历时 $\bar{D} \geq 120$ d的区域面积为58.9%,多位于流域上游, $\bar{D} \geq 180$ d的区域面积为20.5%,最大平均干旱历时 $\bar{D}_{\max} = 433$ d,即每场干旱持续时间超过1 a。图6中水文干旱烈度为场次干旱期间的累积值,平均水文干旱烈度 $\bar{S} \geq 100$ 的区域面积为21.2%,最大平均干旱烈度 $\bar{S}_{\max} = 714.0$ 。郁江支流右江、左江以及柳江上游地区长历时、高强度的水文干旱应值得关注,与黄强等^[32]桂江、左江和右江地区遭遇的干旱风险较大的研究结果较一致。

珠江流域干旱强度表现为中部高、东西部低,平均干旱强度 $\bar{I} \geq 0.5$ 的区域面积为50.0%,一半左右网格达到了中旱及以上水平,左江和浔江部分地区达到了重旱级别,下游河道因受到上游干旱影响,干旱强度明显高于周围地区。

水文干旱严重到一定程度会引起相应的旱灾损失,因此,相对于干旱均值水平而言,极值特征更能反映区域受旱情况。1981—2020年珠江流域水文干旱变量最大值的空间分布如图7所示,可以看出流域西部和西南部容易发生极端水文干旱,尤其是流域西部的南盘江、北盘江以及流域西南郁江支流的左江和右江地区,与吴志勇等^[12]西江流域极端水文干旱相关研究结果一致。1981—2020年珠江流域网格最大干旱历时约为366 d,其中,34.1%的区域最大干旱历时在360 d以上,16.0%的区域超过了540 d。1981—2020年网格最大干旱强度为4.37,最大干旱强度在1.0、1.5和2.0以上的区域面积分别为70.0%、24.5%和5.6%。

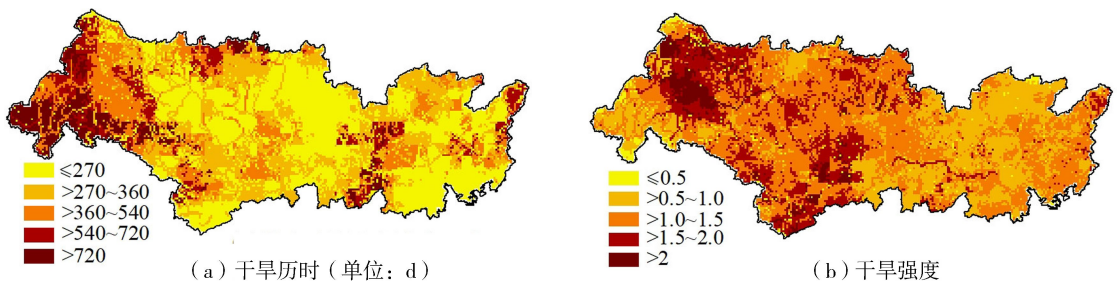


图7 1981—2020年珠江流域水文干旱变量最大值的空间分布

Fig.7 Spatial distribution of maximum values of hydrological drought variables in the Pearl River Basin from 1981 to 2020

3.5.2 水文干旱的集中度和集中期

1981—2020年珠江流域水文干旱集中度与集中期的空间分布如图8所示,可以看出珠江流域水文干旱

烈度的集中度分布具有明显的区域差异,流域中上游的集中度在 0.6 以上,略高于下游。水文干旱具有随机性和持久性,因此较高的集中度可能代表不同的情形,比如持续 1 月的短期干旱,或者持续数月但是某阶段较为突出的长期干旱。中游干、支流集中度高的原因是不同的,比如中游红水河平均干旱历时短,属于干旱密集发生导致的集中度高;郁江平均干旱历时长,但极端干旱烈度大,属于长历时干旱期间烈度高引起的集中度高。

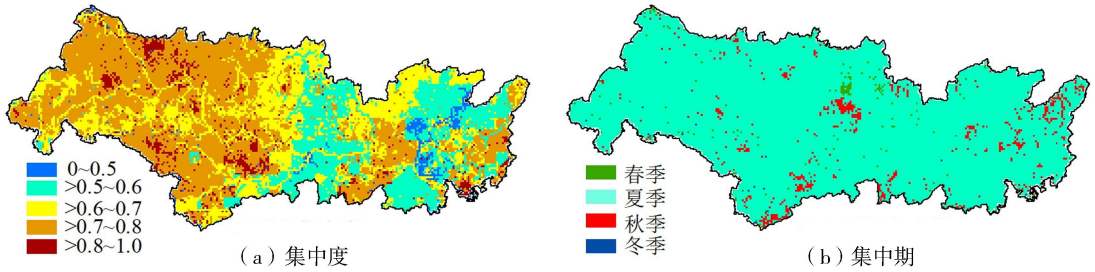


图 8 1981—2020 年珠江流域水文干旱集中度与集中期的空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of HDCD and HDCP in the Pearl River Basin from 1981 to 2020

若用四季代替角度表示干旱集中期,则春季、夏季、秋季和冬季对应方位角分别为 $>0^\circ \sim 90^\circ$ 、 $>90^\circ \sim 180^\circ$ 、 $>180^\circ \sim 270^\circ$ 和 $>270^\circ \sim 360^\circ(0^\circ)$ 。当以季节作为划分标准时,流域内水文干旱集中期的空间分布几乎无差异,1981—2020 年水文干旱集中发生在夏季,约有 95% 的区域干旱集中发生在 6、7、8 月、

不同时期珠江流域水文干旱集中度与集中期的空间分布如图 9 和图 10 所示,可以看出,1981—2000 年和 2001—2020 年水文干旱集中度的分布与多年平均分布类似,存在东西分异的格局。1981—2000 年的集中度高高于多年均值水平,而 2001—2020 年则较低。值得注意的是,自然因素变化影响下郁江所在区域干旱频率、干旱历时和干旱面积均有明显增大趋势^[25],但上游左、右江部分区域集中度仍达到 0.7 以上,属于长历时、高烈度干旱期间短期内烈度异常高引起的集中度高,在干旱缺水期间某时段内出现了严重或极端缺水的状态。

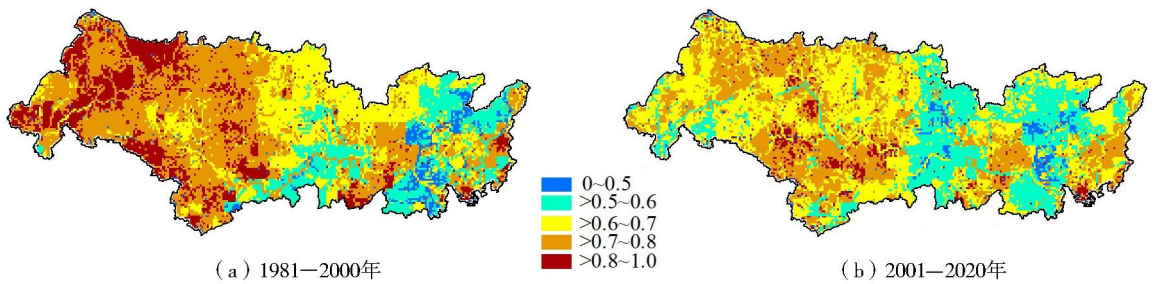


图 9 不同时期珠江流域水文干旱集中度的空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of HDCD in the Pearl River Basin in different periods

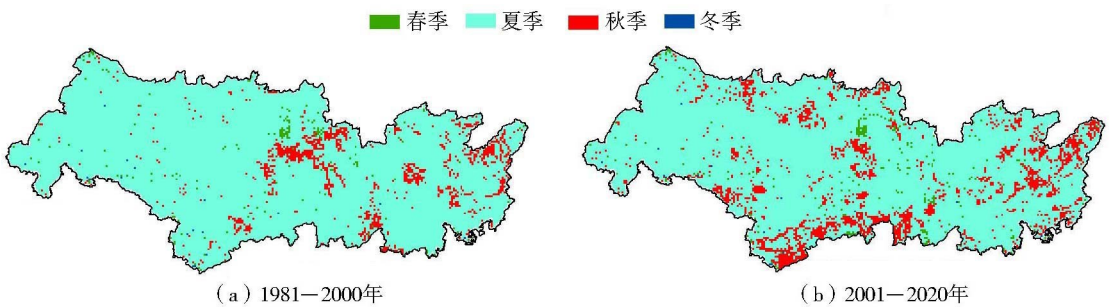


图 10 不同时期珠江流域水文干旱集中期的空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of HDCP in the Pearl River Basin in different periods

水文干旱集中期的空间分布显示,1981—2000 年和 2001—2020 年水文干旱都主要集中发生在夏季,但是水文干旱存在由夏季向秋季延迟的趋势。1981—2000 年集中在夏季和秋季的水文干旱面积比例分别为 93.0% 和 6.0%,2001—2020 年集中在夏季和秋季的水文干旱面积比例分别为 87.2% 和 11.3%,并且秋旱的影响由流域东部向西部扩展。

4 结 论

a. 基于 VIC 模型和汇流模型构建的网格化 SRDI 指数集的区域水文干旱识别方法,能够较好地再现历史干旱情势,识别出的区域干旱事件与实际旱情具有较好的一致性,具有较好的时空连续性,能合理地反映水文干旱的时空演变特征和发展趋势。

b. 珠江流域水文干旱主要集中在夏季;秋季水文干旱面积变化较大,有较高的可能性发生大范围的水文干旱。季节尺度上,一年四季均有可能发生极端干旱。1986—1992 年、2003—2007 年和 2009—2013 年为 3 个多年连旱过程,影响范围和缺水程度有所增加。

c. 1981—2020 年珠江流域从东向西形成由干旱高频区向干旱长历时、高烈度区过渡分布,红水河、左江、右江构成的西南片区干旱化趋势显著。支流郁江旱情凸显,从干旱历时、干旱烈度、集中度等角度评估属于干旱高风险区。与 1981—2000 年相比,2001—2020 年水文干旱存在由夏季向秋季延迟的趋势,且秋旱的影响存在由流域东部向西部扩展趋势。

参考文献:

- [1] 陆桂华,吴志勇,何海. 大范围干旱动态监测与预测[M]. 北京:科学出版社,2021.
- [2] 朱晓萌,张泽中,袁义杰,等. 基于水分亏缺率的贵州地区烟草干旱指标[J]. 水利水电科技进展,2021,41(5):34-40. (ZHU Xiaomeng,ZHANG Zezhong,YUAN Yijie, et al. Drought index of tobacco based on water deficit rate in Guizhou region [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2021,41(5):34-40. (in Chinese))
- [3] 靖娟利,徐勇,王永锋,等. 1960—2019 年珠江流域多尺度旱涝特征研究[J]. 农业现代化研究,2021,42(3):557-569. (JING Juanli,XU Yong,WANG Yongfeng, et al. Characteristics of multi-scale drought and flood in the Pearl River Basin from 1960 to 2019[J]. Research of Agricultural Modernization,2021,42(3):557-569. (in Chinese))
- [4] 袁飞,章益棋,刘懿,等. 基于标准化帕尔默干旱指数的西江流域干旱评估[J]. 水资源保护,2021,37(1):46-52. (YUAN Fei,ZHANG Yiqi,LIU Yi, et al. Drought assessment of Xijiang River Basin based on standardized Palmer drought index[J]. Water Resources Protection,2021,37(1):46-52. (in Chinese))
- [5] BARRIOPEDRO D,GOUVEIA C M,TRIGO R M, et al. The 2009/10 drought in China: possible causes and impacts on vegetation [J]. Journal of Hydrometeorology,2012,13(4):1251-1267.
- [6] 肖祖香,朱双,罗显刚,等. 三江源区多尺度水文干旱特征及植被的响应[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(6):515-520. (XIAO Zuxiang,ZHU Shuang,LUO Xiangang, et al. Multi-scale hydrological drought characteristics and vegetation responses in the Three-River-Source Region [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(6):515-520. (in Chinese))
- [7] 周帅,王义民,畅建霞,等. 黄河流域干旱时空演变的空间格局研究[J]. 水利学报,2019,50(10):1231-1241. (ZHOU Shuai,WANG Yimin,CHANG Jianxia, et al. Research on spatio-temporal evolution of drought patterns in the Yellow River Basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2019,50(10):1231-1241. (in Chinese))
- [8] 肖名忠,张强,陈永勤,等. 基于三变量 Copula 函数的东江流域水文干旱频率分析[J]. 自然灾害学报,2013,22(2):99-108. (XIAO Mingzhong,ZHANG Qiang,CHEN Yongqin, et al. Hydrological drought frequency analysis of East River Basin based on trivariate Copulas function [J]. Journal of Natural Disasters,2013,22(2):99-108. (in Chinese))
- [9] 陈子燊,刘占明,黄强. 西江水文干旱历时与强度的遭遇概率分析[J]. 湖泊科学,2013,25(4):576-582. (CHEN Zishen,LIU Zhanming,HUANG Qiang. Probability of hydrologic drought duration and intensity of Xijiang River [J]. Journal of Lake Sciences,2013,25(4):576-582. (in Chinese))
- [10] 涂新军,杜晓霞,杜奕良,等. 水文干旱多变量联合设计及水库影响评估[J]. 湖泊科学,2018,30(2):509-518. (TU Xinjun,DU Xiaoxia,DU Yiliang, et al. Multivariate joint design of hydrological drought and impact of water reservoirs [J]. Journal of Lake Sciences,2018,30(2):509-518. (in Chinese))
- [11] 涂新军,陈晓宏,赵勇,等. 变化环境下东江流域水文干旱特征及缺水响应[J]. 水科学进展,2016,27(6):810-821. (TU Xinjun,CHEN Xiaohong,ZHAO Yong, et al. Responses of hydrological drought properties and water shortage under changing environments in Dongjiang River Basin [J]. Advances in Water Science,2016,27(6):810-821. (in Chinese))
- [12] 吴志勇,林青霞. 西江流域水文干旱时空特征分析[J]. 水资源保护,2016,32(1):51-56. (WU Zhiyong,LIN Qingxia. Analysis on spatial and temporal characteristics of hydrological drought in Xijiang River Basin [J]. Water Resources Protection,2016,32(1):51-56. (in Chinese))
- [13] 陈毓灵,刘丙军. 西江流域水文气象综合干旱评价[J]. 水电能源科学,2022,40(3):17-21. (CHEN Yuling,LIU Bingjun.

- Hydro-meteorological integrated drought evaluation of Xijiang River Basin[J]. *Water Resources and Power*,2022,40(3):17-21. (in Chinese)
- [14] LU Guihua, LIU Jingjing, WU Zhiyong, et al. Development of a large-scale routing model with scale independent by considering the damping effect of sub-basins[J]. *Water Resources Management*,2015,29(14):5237-5253.
- [15] 童娟. 珠江流域概况及水文特性分析[J]. *水利科技与经济*,2007,13(1):31-33. (TONG Juan. The generalizations and hydrological character analysis of Pearl River Basin[J]. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*,2007,13(1):31-33. (in Chinese))
- [16] HANSEN M C, DEFRIES R S, TOWNSHEND J R G, et al. Global land cover classification at 1 km spatial resolution using a classification tree approach[J]. *International Journal of Remote Sensing*,2000,21(6/7):1331-1364.
- [17] 陆桂华, 金君良, 吴志勇, 等. 水文模型植被参数获取方法及应用研究[J]. *水利水运工程学报*,2009(4):47-52. (LU Guihua, JIN Junliang, WU Zhiyong, et al. Obtaining method of vegetation parameter for hydrological model and its application[J]. *Hydro-Science and Engineering*,2009(4):47-52. (in Chinese))
- [18] REYNOLDS C A, JACKSON T J, RAWLS W J. Estimating soil water-holding capacities by linking the food and agriculture organization soil map of the world with global pedon databases and continuous pedotransfer functions[J]. *Water Resources Research*,2000,36(12):3653-3662.
- [19] 邓鹏, 孙善磊, 黄鹏年. 气候变化对鄱阳湖流域径流的影响[J]. *河海大学学报(自然科学版)*,2020,48(1):39-45. (DENG Peng, SUN Shanlei, HUANG Pengnian. Influence of climate change on runoff in Poyang Lake Basin[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*,2020,48(1):39-45. (in Chinese))
- [20] 吴志勇, 陆桂华, 张建云, 等. 基于VIC模型的逐日土壤含水量模拟[J]. *地理科学*,2007,27(3):359-364. (WU Zhiyong, LU Guihua, ZHANG Jianyun, et al. Simulation of daily soil moisture using VIC model[J]. *Scientia Geographica Sinica*,2007,27(3):359-364. (in Chinese))
- [21] LLOYD-HUGHES B. The impracticality of a universal drought definition[J]. *Theoretical and Applied Climatology*,2014,117(3):607-611.
- [22] 王卫光, 黄茵, 邢万秋, 等. 基于SPEI的海河流域干旱时空演变特征及环流成因分析[J]. *水资源保护*,2020,36(3):8-13. (WANG Weiguang, HUANG Yin, XING Wanqiu, et al. Analysis of spatial and temporal evolution characteristics and circulation causes of drought in Haihe River Basin based on SPEI[J]. *Water Resources Protection*,2020,36(3):8-13. (in Chinese))
- [23] 曹永强, 李可欣, 任博, 等. 基于SPEI的辽宁省气象干旱特征及驱动因素分析[J]. *水利水电科技进展*,2022,42(5):28-36. (CAO Yongqiang, LI Kexin, REN Bo, et al. Characteristics and driving factors analysis of meteorological drought in Liaoning Province based on SPEI[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*,2022,42(5):28-36. (in Chinese))
- [24] ZAIDMAN M, REES G. Spatial patterns of streamflow drought in Western Europe 1960-1995[R]. Wallingford: Centre for Ecology & Hydrology,2000.
- [25] 林青霞. 西江流域水文干旱演变规律及其与环境因子的交互影响研究[D]. 南京: 河海大学,2018.
- [26] 陈再清, 侯威, 左冬冬, 等. 基于修订Copula函数的中国干旱特征研究[J]. *干旱气象*,2016,34(2):213-222. (CHEN Zaiqing, HOU Wei, ZUO Dongdong, et al. Research on drought characteristics in China based on the revised Copula function[J]. *Journal of Arid Meteorology*,2016,34(2):213-222. (in Chinese))
- [27] ZHANG Lujun, QIAN Yongfu. Annual distribution features of precipitation in china and their interannual variations[J]. *Acta Meteorologica Sinica*,2003,17(2):146-163.
- [28] LEVIN A, LIN C F, CHU C S. Unit roots test in panel data: asymptotic and finite-sample properties[J]. *Journal of Econometrics*,2002,108(1):1-24.
- [29] 黄强, 陈子燊, 唐常源, 等. 珠江流域重大干旱事件时空发展过程反演研究[J]. *地球科学进展*,2019,34(10):1050-1059. (HUANG Qiang, CHEN Zishen, TANG Changyuan, et al. Monitoring the spatio-temporal process of severe droughts in the Pearl River Basin[J]. *Advances in Earth Science*,2019,34(10):1050-1059. (in Chinese))
- [30] 张世法, 苏逸深, 宋德敦, 等. 中国历史干旱:1949—2000[M]. 南京: 河海大学出版社,2008.
- [31] 陈子燊. 珠江流域干旱时空变化的经验诊断分析[J]. *中山大学学报(自然科学版)*,2020,59(4):33-42. (CHEN Zishen. Empirical diagnostic analysis on spatial and temporal variations of droughts in the Pearl River Basin, China[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*,2020,59(4):33-42. (in Chinese))
- [32] 黄强, 陈子燊, 刘占明, 等. 珠江流域区域干旱风险评估[J]. *中山大学学报(自然科学版)*,2013,52(5):140-147. (HUANG Qiang, CHEN Zishen, LIU Zhanming, et al. Regional drought risk assessment across the Pearl River Basin[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*,2013,52(5):140-147. (in Chinese))