

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2016.01.008

西江流域水文干旱时空特征分析

吴志勇^{1,2}, 林青霞^{1,2}

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水问题研究所, 江苏 南京 210098)

摘要:选取 1951—2010 年西江干、支流上 5 个典型水文站的实测日径流资料, 基于标准化径流干旱指数(SRDI)研究了西江流域水文干旱的时空变化特征。结果表明:①1951—2010 年西江流域的水文干旱主要发生在 1950 s、1960 s 和 2000 s, 1950 s 冬季、1960 s 春季、1980 s 夏季和 2000 s 秋季是干旱频发的时期;②西江年最大干旱日数在同一站点连续出现的时间不超过 5 年。流域内轻旱的发生范围有扩大趋势, 而极旱则相反, 多向区域发展。③西江流域的水文干旱具有区域性, 4 条支流同期的干旱发生水平差异较大, 过去 60 年间只 1963 年、1989 年、1991 年、2009 年和 2010 年 4 条支流同时发生了水文干旱。

关键词:水文干旱; 标准化径流干旱指数; 西江流域

中图分类号:S423 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2016)01-0051-06

Analysis on spatial and temporal characteristics of hydrological drought in Xijiang River Basin

WU Zhiyong^{1,2}, LIN Qingxia^{1,2}

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

Abstract: Selecting data of daily runoff acquired from 5 typical hydrological stations along main stream and tributaries of Xijiang River over the past 60 years, the spatial and temporal characteristics of hydrological drought in Xijiang River basin are studied based on the standardized runoff drought index (SRDI). The results show that: (1) Hydrological droughts in Xijiang River Basin mainly occur in 1950s, 1960s and 2000s. Besides, the prone periods include 1950s' winter, 1960s' spring, 1980s' summer and 2000s' autumn. (2) The annual maximum droughts days continuously appear in any site are shorter than 5 years. The occurrence areas of light droughts have the tendency to expand, while the extreme droughts are likely to be more regionalized. (3) Hydrological droughts in Xijiang River Basin are of significant regional characteristic that drought severities of 4 tributaries are diverse during the same typical drought years. Statistically, the years when droughts are monitored in 4 tributaries simultaneously are only in 1963, 1989, 1991, 2009 and 2010.

Key words: hydrological drought; standardized runoff drought index (SRDI); Xijiang River Basin

西江流域降水时空分布不均, 干旱是其主要灾害性天气之一^[1-2]。该流域在 1962—1963 年经历了严重干旱, 1984—1992 年出现了长达 9 年的连续干旱。近年来, 极端干旱和长历时多年连旱出现了频发趋势, 2003 年以来, 流域内的广西壮族自治区出

现了 3 次特大干旱灾害 (2003/2004, 2004/2005, 2009/2010), 对广西的农业生产造成了极大影响^[3-4], 全球商业网络咨询公司 (global business network, GBS) 在《气候突变的情景及其对美国国家安全的意义》的报告中甚至指出该地区在 2010 年前

基金项目: 全国优秀博士学位论文作者专项资金 (201161); 教育部新世纪优秀人才支持计划 (NCET-12-0842); 水利部公益性行业科研专项 (201301040); 国家自然科学基金 (51579065); 江苏省研究生科研创新计划项目 (2014B35014)
作者简介: 吴志勇 (1979—), 男, 教授, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: wuzhiyong_110@163.com

后可能进入 10 年的干旱期,气候变化背景下极端水文事件的频发不仅是政策制定者和公众普遍关心的问题,也成为国内外科学研究的热点问题^[5-7]。

认识变化环境下水文干旱的时空变化特征,对合理调整农业种植结构、优化配置水资源方案和规避干旱灾害风险起着重要的指导作用^[8]。现阶段国内外学者就此开展了一系列研究,但多数研究关注于气温、降水和径流等要素在年代季尺度上的时空变化^[9-10],忽略了水文气象要素长期异常引发的水文干旱特征分析。近年来,西江流域极端水文干旱和多年连旱给广西壮族自治区自然生态系统、农业种植系统和社会经济系统带来了多方位、多层次的负面影响,但针对极端水文干旱研究仍不足^[11-12]。因此,本文研究的目的在于揭示 1951—2010 年西江流域一般水文干旱和极端水文干旱的时空变化特征,以期制定有效防旱抗旱政策和设计防灾减灾工程提供科学依据。

1 研究区概况及资料

西江发源于云南,流经贵州、广西和广东,在珠海市注入南海,干流长 2 214 km,由南盘江、红水河、黔江、浔江、西江等 5 个河段组成,主要支流有北盘江、柳江、郁江、桂江及贺江等,流域面积 36 万 km²。西江干流水流平缓、河床稳定,年平均径流量仅次于长江,为黄河的 5 倍。流域横跨中、亚热带,气候温暖多雨,夏长冬短。流域西部为云贵高原,中部丘陵、盆地相间,东南部为三角洲冲积平原,地势西北高,东南低。西江流域水资源量丰富,但区域分布不均,水资源量变化的总趋势为从东南向西北递减。

本文的基础资料为西江干流高要水文站及主要支流红水河、郁江、柳江和桂江上的 4 个典型代表站(迁江站、贵港站、柳州站和平乐站) 1951—2010 年实测日径流资料,资料来源于国家水利部水信息中心。西江流域重要河流水系及 5 个典型水文站点分布见图 1。

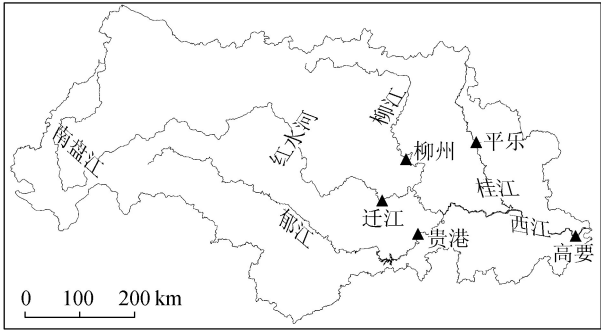


图 1 西江流域重要河流水系及 5 个典型水文站点分布

2 研究方法

干旱指数是监测、评价、研究干旱发生发展的基础。近一个世纪以来,国内外学者提出了各种形式的干旱指数^[13]。Zaidman 等^[14]为了监测水文干旱的变化情况,提出了标准化径流干旱指数(SRDI)。将天然径流序列以日为单位分成 366 个子序列,并采用对数正态分布拟合子序列,经过标准化得到径流干旱指数,其数学表达式如下:

$$I_{y,d} = \frac{\overline{\ln Q_d} - \ln Q_{y,d}}{\delta(\ln Q_d)} \tag{1}$$

式中: $I_{y,d}$ 为第 y 年 第 d 日的标准化径流干旱指数; $\ln Q_{y,d}$ 为第 y 年 第 d 日实测流量的对数值; $\overline{\ln Q_d}$ 和 $\delta(\ln Q_d)$ 分别为 1951—2010 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 值为正时,表示河道天然来水量低于多年平均状态,亦即偏旱。

根据式(1)计算西江流域 5 个典型代表站的 SRDI 系列,并验证其是否满足正态分布。QQPlot 值用于直观验证一组数据是否来自某个指定分布,若序列 X 服从正态分布,则图上经验点排列成一条直线。以迁江站为例,SRDI 能较好地服从于正态分布(图 2),可采用与 SPI 类似的干旱等级划分标准^[14]。

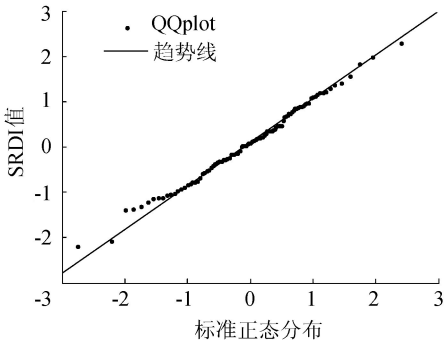


图 2 西江上游迁江站 SRDI 序列与标准正态分布的 QQPlot 图

张世法等^[15]依据我国各省的年受旱率、成灾率,计算了干旱灾害综合指标。西江流域出口高要水文站的 SRDI 系列与以上干旱灾害综合指标(广西省)的相关系数为 0.66,体现出较好的相关性,表明 SRDI 能够适用于西江流域水文干旱的研究。

3 结果与分析

3.1 区域水文干旱时空变化的总体特征

干旱频率常用以反映区域干旱在时间和空间上的发生频繁程度,是抗旱工程规划设计、旱灾风险管理的重要统计参数。干旱的发生通常由气象要素的长期异常引起,我国气温和降水均存在较明显的年代际变化^[9],随之发生的干旱也表现出相应特征^[17-18]。因此,全时段的干旱研究可能漏失局部变

化。为此,本文按年代划分了研究时期,统计分析了西江流域水文干旱频率的季节分布(图3)和空间分

配(图4),以明确过去60年水文干旱在不同年代的时空变化特征。

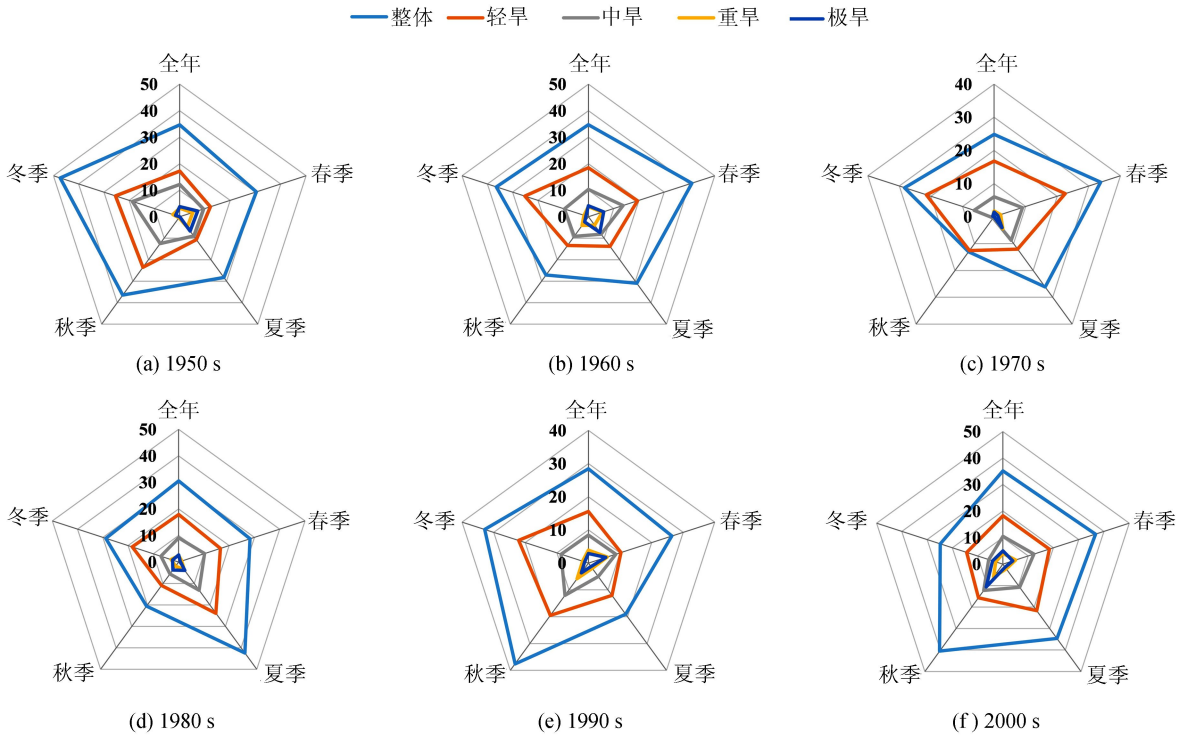


图3 西江干流年代际不同等级干旱季节发生频率统计

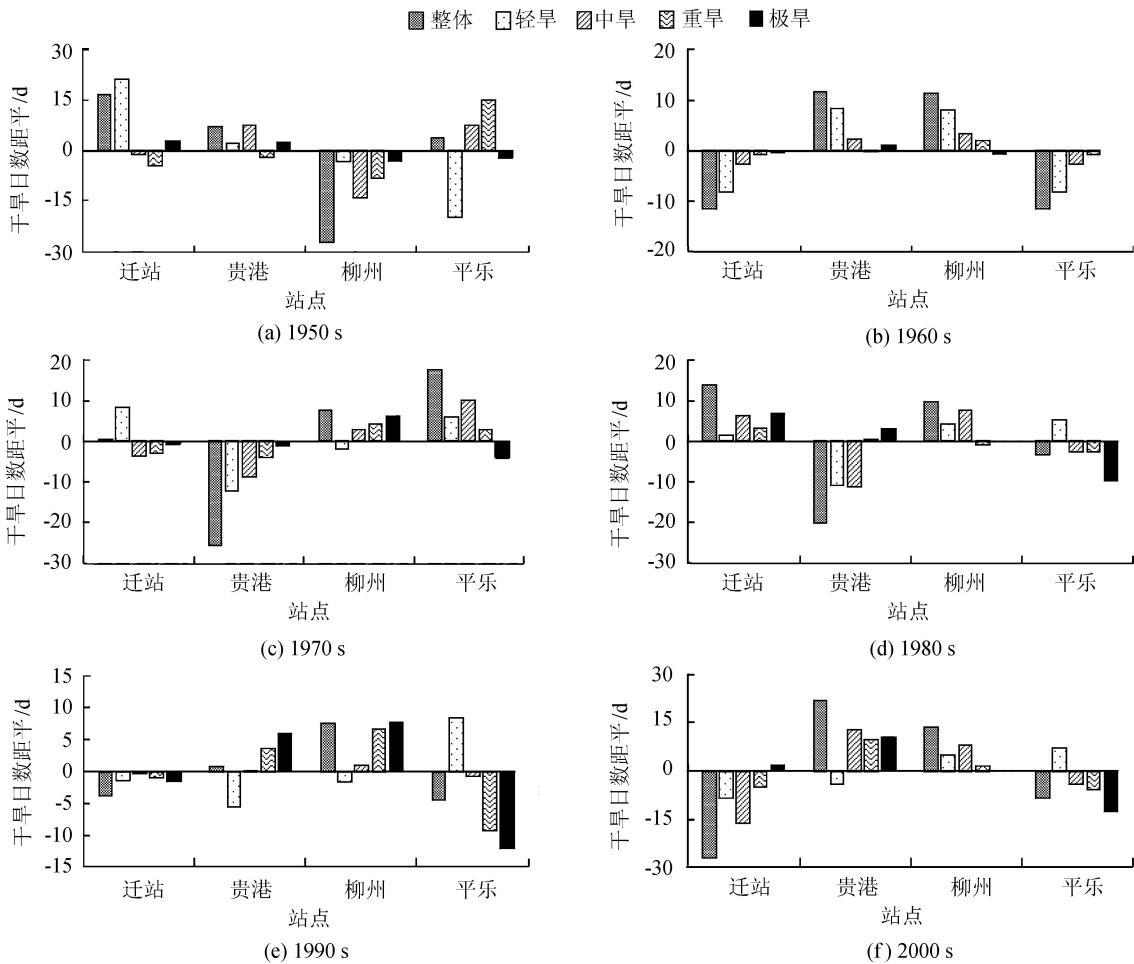


图4 西江4条支流不同等级水文干旱年代际发生水平的空间分布

图3反映了各年代西江流域水文干旱的发生频率存在差异。1950s 冬季干旱发生频率远高于其他季节,轻、中旱频率分别超过了同期平均的 47.7% 和 53.3%,但重、极旱频率低于夏季和春季。1960s 和 1970s 干旱主要发生在春季,前者干旱多发体现在重旱和极早上,而后者体现在轻、中早上。1980s 夏季干旱发生频率高,超过同期季节平均的 39%,且体现在中、重和极早上,均超过了季节平均的 44%,表明 1980s 的夏旱十分严重。1990s 和 2000s 的干旱主要发生在秋季,前者主要体现于中旱,后者多体现于更为严重的干旱。其中,重旱频率超过了平均水平的 47.5%,极旱频率更是高达平均水平的 2 倍,表明 2000s 的秋旱极为严重。总体而言,1950s、1960s 和 2000s 是西江流域这 60 年的干旱频发期,干旱频率分别为 34.6%,34.7% 和 35.2%。1950s 主要体现为冬季中旱频发,1960s 主要体现为春季重旱和夏季极旱的频发,2000s 主要体现为秋季重极旱的频发。

水文干旱的影响范围广、具有空间变异性。但是,受限於水文资料难以获取以及河道间复杂的水力联系,当前对西江流域水文干旱空间特征的研究仍不多见。为此,本文计算了 1951—2010 年各年代 4 条支流上不同等级水文干旱的干旱日数距平(图 4),以初步探究西江流域水文干旱在年代际上的空间分布特征。

图 4 显示各年代水文干旱发生水平的空间分布存在差异,1950s 干旱主要集中在红水河,较区域平均值偏高 17d/a,郁江和桂江接近平均水平,而柳江偏低。红水河以轻旱偏多最为显著,重、极旱偏多的情况主要发生在桂江;1960s 水文干旱在郁江和柳江分别偏多 12d/a 和 11d/a,而红水河和桂江偏少 12d/a;1970s 的水文干旱在桂江和柳江分别偏多 18d/a 和 8d/a,郁江偏少 26d/a;1980s 红水河和柳江分别偏多 14d/a 和 10d/a,郁江偏少 20d/a,但偏少主要体现在轻、中早上;1990s 的干旱在柳江虽仅偏多 8d/a,但主要体现在重、极早上,同时郁江的重、极旱亦偏多。相反地,桂江的重、极旱分别偏少 9d/a 和 12d/a;2000s 水文干旱在郁江和柳江分别偏多 22d/a 和 14d/a,而红水河与桂江的水文干旱相对较少,红水河的偏少水平为 27d/a,较桂江更为明显。

3.2 极端水文干旱的时空变化特征

区域干旱要素的统计分析使笔者认识到了西江流域水文干旱在年代际上的一般变化规律。极端水文干旱引起的灌溉、供水等不足将给农业生产和社会经济带来更为严重的影响,值得加深对其的关注和研究。全流域年最大干旱日数及其出现位置(图

5)在一定程度上反映了干旱在时空上的发生水平和分布特征,可作为极端水文干旱研究的一项指标。掌握其变化规律有助于合理地调配西江流域不同地区间的水资源,科学改善当前区域水资源分配不均的现状。

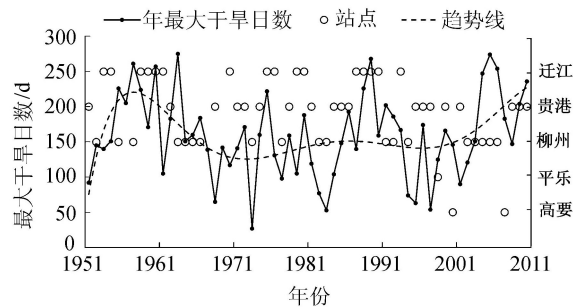


图5 1951—2010 年西江年最大水文干旱日数及相应站点统计

图 5 显示年最大干旱日数呈锯齿状波动,对应站点位置亦随年份变化,未见周期规律。整体干旱的年最大干旱日数主要出现在西江上游红水河(1950s, 1970s, 1980s),支流郁江(1970s, 1980s, 1990s)和柳江(1960s, 2000s)。其中,最大年干旱日数的极大值(≥ 250 d)多出现在柳江。相反,桂江只在 1998 年出现全流域最大值。西江干流因为综合了各支流的丰枯特征,因此年干旱日数一般小于支流,仅 2000 和 2007 年出现全流域最大值。

图 6 显示了不同等级水文干旱极端值的空间分布(图 6)。4 条支流均出现过流域年最大值,但各年代侧重点不同。1950s 和 1980s 多集中于红水河、1960s 多集中于柳江,1970s 和 1990s 多发生在郁江,2000s 多体现在柳江。年最大轻旱日数于 1970s 开始出现在桂江,该支流逐步发展为区域轻旱频发中心。年最大中旱日数在 1990s 之前多集中于桂江和红水河,之后多出现在郁江及柳江。1950s—1980s 的 30 年中,桂江经历了长期严重的水文干旱,有 16 年的流域年最大重旱日数出现在该支流。1970s 之前年最大极旱日数主要出现在西江干流,之后依次出现在支流郁江(1970s)、红水河(1980s)和柳江(1990s—2000s)。这一干流向支流的转变反映了极端干旱影响范围存在缩小趋势。1970s—1980s 中期西江流域的最大重、极旱日数多小于 20 d,表明该时期水文干旱情势良好。不同的是,2002—2006 年流域年最大干旱日数连年出现在柳江,并随年份持续增加,且同时体现在中、重和极早上。不仅如此,1 年—5 年最大干旱日数仍连续在柳江出现,表明柳江在 2010s 初期遭遇了近 60 年以来全流域最为严重的水文干旱。

近年来,西江流域的多年连旱对广西壮族自治区

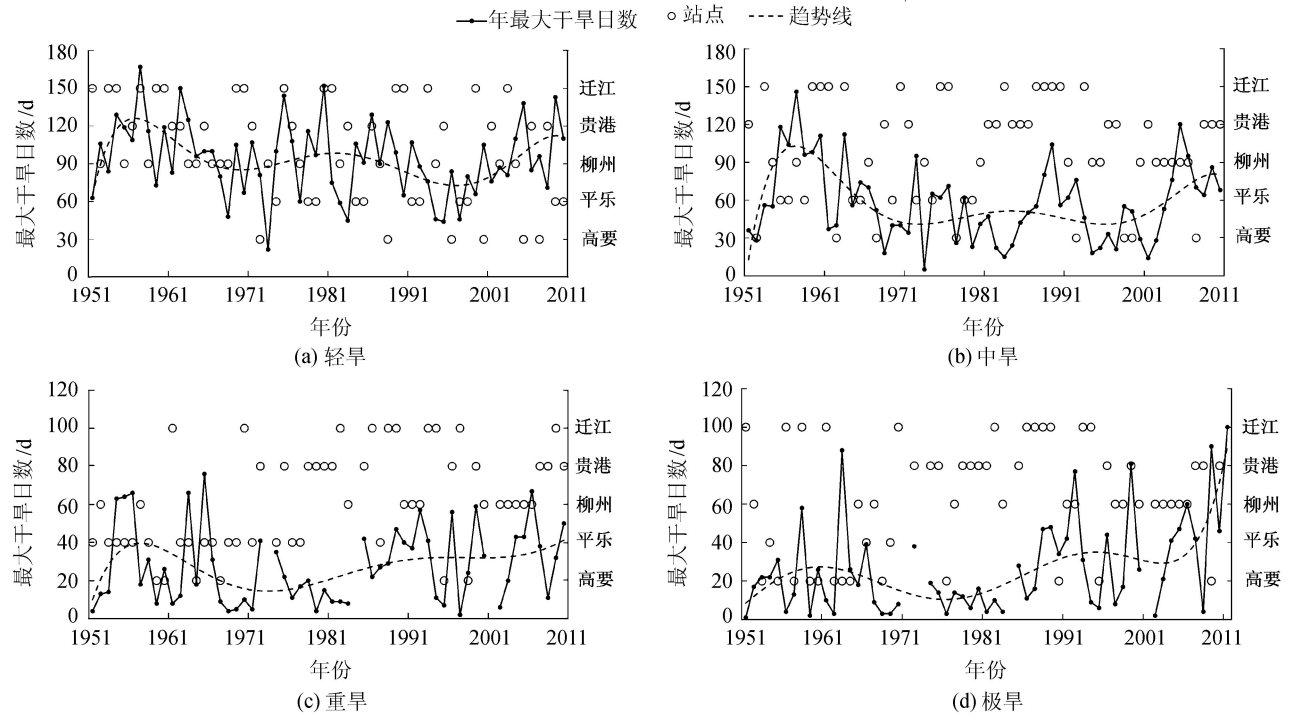


图6 1951—2010年西江各等级干旱的年最大干旱日数及相应站点统计

区经济、社会产生了严重影响,因此,在研究流域年最大干旱日数变化规律的基础上,还需进一步开展对多年连旱特征的分析研究(表1),为多年连旱的监测预测提供思路,为防御和减轻重大干旱灾害造成的损失提供依据。

表1显示西江流域最为严重的3个水文干旱年份为1963年,1989年和2007年。水文干旱期间,4条支流的干旱程度差异较大,60年间只1963年、1989年、1991年、2009年和2010年4条支流同时发生了水文干旱。西江流域内的多年连旱共有8场,其中6场干旱历时2年,其余历时分别为5年和9年。2年连旱中仅2009/2010年西江干流也表现出连旱过程,其余仅体现在支流上。历时较长的两场连旱中,2003—2007年的水文干旱主要发生在红水河和郁江,两者都经历了长达4年及以上的连旱,而桂江和柳江情况较好。1984—1992年干旱期间,4条支流上都出现了3年及以上的多年连旱,各条支流开始出现干旱的年份表明,水文干旱由柳江、桂江开始(1984年),逐步发展到郁江(1987年),最后扩展到迁江(1988年),反映出流域内水文干旱经历了由北向南、由东向西的发展。

4 结 论

a. 1951—2010年西江流域的水文干旱主要发生在1950s、1960s和2000s,1980s和1990s的干旱接近60年平均水平,1970s的干旱远低于各年代平均水平。其中,1950s主要发生在红水河,以轻旱偏

表1 西江流域多年连旱过程及干、支流水文干旱发生情况统计

历时/a	时期	年份	干旱等级				
			高要	迁江	平乐	柳州	贵港
2	1952—1953	1952	/	/	/	/	中
		1953	/	中	/	轻	/
	1957—1958	1957	/	/	/	轻	/
		1958	中	/	重	/	中
	1962—1963	1962	/	轻	/	/	/
		1963	极	极	极	极	极
	1965—1966	1965	/	/	中	/	/
		1966	/	/	轻	/	/
	1975—1976	1975	/	重	/	/	/
		1976	/	/	/	轻	/
	2009—2010	2009	中	中	轻	轻	中
		2010	轻	中	中	轻	轻
5	2003—2007	2003	/	轻	/	中	轻
		2004	轻	中	轻	/	重
		2005	轻	轻	/	/	轻
		2006	轻	轻	/	/	轻
		2007	重	/	中	中	极
9	1984—1992	1984	轻	/	轻	轻	/
		1985	/	/	轻	中	/
		1986	/	/	中	中	/
		1987	轻	/	/	轻	中
		1988	轻	轻	中	/	中
		1989	极	极	中	重	重旱
		1990	/	轻	/	/	/
		1991	中	轻	重	轻	轻旱
		1992	/	中	/	/	轻旱

注:“/”为非干旱。

多最为显著。1960s和2000s郁江和柳江各等级干旱均偏多,红水河与桂江偏少。1980s的干旱主要以红水河和柳江偏多,郁江偏少,但偏少主要体现在

轻、中早上。1990 s 的水文干旱主要以柳江偏多,且多体现在重、极早上。1970 s 主要以桂江和柳江偏多,而在郁江偏少。1950 s 冬季、1960 s 春季、1980 s 夏季和 2000 s 秋季整体干旱的发生频率均达到了 0.40 以上,是西江干旱发生较频繁的时期。

b. 年最大干旱日数的统计结果表明,整体及各等级干旱的最大干旱日数在同一站点连续出现的时间均不超过 5 年,连续 5 年的情况出现在柳江,其不同站点之间的转移不具有普遍规律可循。1980 s 以来,西江轻旱的影响范围有扩大趋势,相反,极旱的影响范围有缩小趋势,多向区域发展。因此,要注意全流域轻旱和局部重旱的发生。

c. 西江流域最为严重的 3 个水文干旱年份为 1963 年、1989 年和 2007 年。在干旱发生等级上,4 条支流同期差异较大,60 年间只 1963 年、1989 年、1991 年、2009 年和 2010 年各条支流同时发生了水文干旱。流域内的多年连旱多以历时 2 年为主,历时较长的 2003—2007 年干旱主要发生在流域西部和南部,1984—1992 年多年连旱经历了由北向南、由东向西的发展过程。

参考文献:

[1] FISCHER T, GEMMER M, SU B, et al. Hydrological long-term dry and wet periods in the Xijiang River Basin, South China [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, 17(1): 135-148.

[2] NIU J, CHEN J. Terrestrial hydrological responses to precipitation variability in Southwest China with emphasis on drought [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2014, 59(2): 325-335.

[3] 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.

[4] ZHANG L, XIAO J, LI J, et al. The 2010 spring drought reduced primary productivity in southwestern China [J]. *Environmental Research Letters*, 2012, 7(4): 045706.

[5] CHEN H P, SUN J Q, CHEN X L. Future changes of drought and flood events in China under a global warming scenario [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2013, 6(1): 8-13.

[6] WANG LIN, CHEN WEN, ZHOU WEN. Assessment of future drought in southwest China based on CMIP5 multi-model projections [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2014, 31: 1035-1050.

[7] WANDERS N, WADAY, VAN LANEN H. Global hydrological droughts in the 21st century under a changing hydrological regime [J]. *Earth System Dynamics*, 2015,

6:1-15.

[8] 杨志勇,袁喆,严登华,等. 黄淮海流域旱涝时空分布及组合特性[J]. *水科学进展*, 2013, 24(5): 617-625. (YANG Zhiyong, YUAN Zhe, YAN Denghua, et al. Study of spatial and temporal distribution and multiple characteristics of drought and flood in Huang-Huai-Hai River basin [J]. *Advances in Water Science*, 2013, 24(5): 617-625. (in Chinese))

[9] 王艳姣,闫峰. 1960—2010 年中国降水区域分异及年代际变化特征[J]. *地理科学进展*, 2014, 33(10): 1354-1363. (WANG Yanjiao, YAN Feng. Regional differentiation and decadal change of precipitation in China in 1960—2010 [J]. *Progress in Geography*, 2014, 33(10): 1354-1363. (in Chinese))

[10] 王琼,张铭. 中国及周边地区气温年代际变化的研究[J]. *气候与环境研究*, 2003, 8(4): 451-456. (WANG Qiong, ZHANG Ming. A study of temperature change on decennary scale in China and peripheral area [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2003, 8(4): 451-456. (in Chinese))

[11] 张利平,杜鸿,夏军,等. 气候变化下极端水文事件的研究进展[J]. *地理科学进展*, 2011, 30(11): 1370-1379. (ZHANG Liping, DU Hong, XIA Jun, et al. Progress in the study of extreme hydrologic events under climate change [J]. *Progress in Geography*, 2011, 30(11): 1370-1379. (in Chinese))

[12] 胡彩虹,杨帆,李析男. 极端水文事件概念内涵及其在小流域的分析应用[J]. *水资源研究*, 2013(2): 171-180. (HU Caihong, YANG Fan, LI Xinan. Extreme hydrological event concept and its analysis and application in the small watershed [J]. *Journal of Water Resources Research*, 2013(2): 171-180. (in Chinese))

[13] 闫桂霞,陆桂华,吴志勇,等. 基于 PDSI 和 SPI 的综合气象干旱指数研究[J]. *水利水电技术*, 2009, 40(4): 10-13. (YAN Guixia, LU Guihua, WU Zhiyong, et al. Study on integrated meteorological drought index based on PDSI and SPI [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2009, 40(4): 10-13. (in Chinese))

[14] ZAIDMAN M D, REES H G. Spatial patterns of streamflow drought in Western Europe 1960—1995 [R]. Wallingford: Centre for Ecology and Hydrology, 2000.

[15] 慈晖,张强,白云岗,等. 标准化降水指数与有效干旱指数在新疆干旱监测中的应用[J]. *水资源保护*, 2015, 31(2): 7-14. (CI Hui, ZHANG Qiang, BAI Yungang, et al. Application of standardized precipitation index and effective drought index in drought monitoring in Xinjiang [J]. *Water Resources Protection*, 2015, 31(2): 7-14. (in Chinese))

[16] 张世法,苏逸深,宋德敦,等. 中国历史干旱[M]. 南京: 河海大学出版社, 2009. (下转第 100 页)

优先监测分析,从水功能区的划分、典型污染种类及数量的动态变化等几方面入手,科学合理地选取水质监测数据。除对主要超标项目如总磷、化学需氧量、氨氮等进行常规监测外,还应增加一些有机污染监测指标,而对一些在标准指标下或者长时间没有监测出问题的项目,可以适当减少监测频次^[8]。

b. 适当增加嫩江流域省界缓冲区的水生生物监测内容。水生生物是生态环境的重要组成部分,它直接反映环境变化对河湖健康的危害程度。理化指标的监测只能在特定条件下检测水环境中污染物的类别和含量,而生物监测可以反映多种污染物在自然条件下对生物的综合影响。基于目前开展的水利部“948”项目“水生态风险监控技术引进”,已经对嫩江流域中上游水生态情况有了初步的了解,但相关工作还需要持续深入研究。

c. 优化监测方法。在进行水质监测的时候,可以将多种监测方式进行有机结合,如将污染源监控、人工监测以及自动监测等方法综合使用。样品的运输与保存受季节温度、地域等因素的影响造成样品挥发、变质等一系列问题,而对实验结果产生影响。可以根据监测项目随时间的衰减情况对实验结果进行一定修正。

d. 保证水环境监测质量。为提高嫩江干流水环境管理水平,规范水环境监测质量管理,必须保障水质监测数据和信息的准确可靠。结合松辽流域水环境监测中心的质量管理经验,提高水环境实验室监测信息的质量控制水平,构建嫩江干流典型缓冲区实验室质量管理体系。质量保证涉及多个方面,如样品的采集,在选择好监测断面的基础上,要确保实验操作规范以提高样品的代表性;还有数据的分析,可依据当地环境及水质特点,综合应用单因子评价法、污染指数法、模糊评价法,灰色评价法、主成分分析法对水质数据进行分析。

参考文献:

[1] 曹永强,游海林,罗麟,等. AHP 在省界缓冲区水资源保护方案评价中的应用[J]. 长江科学院院报,2009,26(12):26-28. (CAO Yongqiang, YOU hailin, LUO Lin, et al. Application of AHP in water resources protection program assessment of provincial boundary buffering area[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Insitute, 2009,26(12):26-28. (in Chinese))

[2] 李娜,王霞,李兵. 典型缓冲区纳污能力核定方法初探[J]. 水利技术监督,2014(4):9-11. (LI Hua, WANG Xia, LI Bin. Study of verification method of pollutant carrying capacity of typical buffering area[J]. Technical Supervision in Water Resources,2014(4):9-11. (in Chinese))

[3] 李航,张颖,李昊,等. 黄河流域省界缓冲区监督管理初探[J]. 人民黄河,2012,34(12):66-68. (LI Hang, ZHANG ying, LI Hao, et al. Preliminary discussion on supervision and control of provincial buffer zone in the Yellow River Basin[J]. Yellow River,2012,34(12):66-68. (in Chinese))

[4] 吴东芳. 嫩江干流点污染源入河排污口现状布局分析研究[D]. 长春:吉林大学,2010.

[5] 王申芳,王丽,杨晓灵,等. 珠江流域片省界缓冲区最严格水资源管理的研究[J]. 人民珠江,2015(2):16-19. (WANG Shenfang, WANG li, YANG Xiaoling, et al. Study on the most strict water resources management of provincial boundary buffer in the Pearl River Valley [J]. Pearl River, 2015(2):16-19. (in Chinese))

[6] 许君雨,康嶠,段海燕,等. 左右岸省界缓冲区水质达标评价方法研究[J]. 节水灌溉,2014,46(11):64-67. (XU Junyu, KANG Jiao, DUAN haiyan, et al. Study on water quality assessment method of left and right provincial boundary buffering area[J]. Water Saving Irrigation,2014 46-48(11):64-67. (in Chinese))

[7] 宿华,范晓娜,李环,等. 实施松辽流域水资源保护规划的思考[J]. 中国水利,2013(13):76-77. (SU Hua, FAN Xiaona, LI Huang, et al. Thoughts about implementation of water resources protection planning in Songliao River Basin [J]. China Water Resources, 2013(13):76-77. (in Chinese))

[8] 谢琳娜,白焱,高峰,等. 松辽流域省界缓冲区水环境质量现状分析[J]. 东北水利水电,2006,12(24):58-59. (XIE Linna, BAI Yan, GAO Feng, et al. Analysis of quality status of water environment in provincial boundary buffering area of Songliao River Basin[J]. Journal of Northeast Water Conservancy and Hydropower,2006,12(24):58-59. (in Chinese))

(收稿日期:2015-09-22 编辑:彭桃英)

(上接第 56 页)

[17] 刘珂,姜大勝. 中国夏季和冬季极端干旱年代际变化及成因分析[J]. 大气科学,2014,38(2):309-321. (LIU Ke, JIANG Dabang. Interdecadal change and cause analysis of extreme summer and winter droughts over China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2014,38(2):309-321. (in Chinese))

[18] 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. (QI Haixia, ZHI Xiefei, BAI Yongqing. Interdecadal variation and trend analysis of the drought occurrence frequency in China [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2011,34(4):447-455. (in Chinese))

(收稿日期:2015-10-29 编辑:徐 娟)