

# 长江流域典型枯水年径流时空演变特征分析

张睿康,徐长江,陈 玺,郦建平,邵 骏,郑雅莲

(长江水利委员会水文局,湖北 武汉 430010)

**摘要:**为了解长江流域枯水演变规律、提升旱情应对能力,基于长江流域主要水文站 1956—2022 年长系列水文数据,在提取年、枯水期月尺度典型枯水年的基础上,对典型枯水年径流时空演变特征进行了分析。结果表明:年尺度下识别得到的典型枯水年集中在 2006 年、2011 年和 2022 年,枯水期月尺度下识别得到的典型枯水年集中在 1978 年和 2022 年;2006 年、2011 年和 2022 年典型枯水年的共同特征为汛期来水较枯;2006 年 8 月前径流相比历史同期逐渐转枯,8 月后枯水形势更明显,而 2022 年 8 月前径流相比历史同期较丰,8 月后呈现急剧由丰转枯;2006 年干旱程度沿上游干流逐渐累积,宜昌站以下自上游至下游干旱程度逐渐缓解,2011 年向家坝—寸滩、寸滩—螺山、螺山—大通区间干旱程度呈现降低、升高和降低的波动趋势,2022 年为上中下游同枯。

**关键词:**典型枯水年;径流特征;干旱;长江流域

**中图分类号:**P333.3

**文献标志码:**A

**文章编号:**1004-6933(2025)04-0151-08

**Spatiotemporal evolution characteristics of runoff in typical dry years in the Yangtze River Basin//ZHANG Ruikang, XU Changjiang, CHEN Xi, BING Jianping, SHAO Jun, ZHENG Yalian (Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China)**

**Abstract:** To understand the evolution of low flow and enhance the ability to cope with drought in the Yangtze River Basin, typical dry years on an annual scale and monthly scale during dry seasons were extracted, and spatiotemporal evolution characteristics of runoff in typical dry years were analyzed based on the hydrological data of the main hydrological stations in the Yangtze River Basin from 1956 to 2022. The results show that the typical dry years identified at the annual scale are concentrated in 2006, 2011, and 2022, while the typical dry years identified at the monthly scale during dry seasons are concentrated in 1978 and 2022. The common characteristic of typical dry years in 2006, 2011, and 2022 is that the runoff during flood seasons is low. In 2006, the runoff gradually decreased before August compared with the historical average of the same period, and the dry situation became more obvious after August. However, in 2022, the runoff was relatively abundant compared with the historical average of the same period before August, and there was a sharp transition from wet to dry after August. In 2006, the severity of drought gradually accumulated along the upper reaches above Yichang Station, and it gradually decreased from upstream to downstream below Yichang Station. In 2011, the severity of drought in the Xiangjiaba-Cuntan, Cuntan-Luoshan, and Luoshan-Datong sections showed a fluctuating trend of decreasing, increasing, and decreasing. In 2022, upstream, midstream, and downstream experienced simultaneous drought in the Yangtze River Basin.

**Key words:** typical dry year; runoff characteristics; drought; the Yangtze River Basin

干旱是一种发生频率高、持续时间长、影响范围广且难以准确预估的自然灾害<sup>[1-3]</sup>。干旱影响着人类社会的各个层面,造成农业歉收、水资源短缺、生态环境恶化和能源供应不足等<sup>[4-6]</sup>。在全球气候变化和人类活动加剧的背景下,降水、径流、蒸发等水循环过程的时空变异性加强,全球极端干旱事件呈现多发广发的态势<sup>[7-8]</sup>。长江流域的抗旱工作关系

到我国粮食安全、经济发展、生态保护和社会稳定,尤其在气候变化背景下,干旱的频率和强度可能进一步加剧,加之长江流域跨流域调水工程的实施和人类取水活动的加剧,可能导致某些年份水资源紧缺,因此,长江流域的抗旱工作显得尤为重要<sup>[9]</sup>。

针对长江流域典型枯水年的径流特征已开展了

**基金项目:**国家重点研发计划项目(2023YFC3206001);湖北省自然科学基金项目(2024AFD354)

**作者简介:**张睿康(1997—),男,工程师,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:l5735154149@163.com

**通信作者:**陈玺(1986—),男,高级工程师,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:chenx@cjh.com.cn

大量研究,以期深入了解干旱的成因和产生的影响,为优化水资源管理、改进抗旱措施和制定长期应对策略提供科学依据。例如:徐俊杰等<sup>[10]</sup>基于长江干支流水文站水文气象资料,结合三峡水库蓄水作用,探讨了2006年长江径流过程特征及枯水成因;刘建刚<sup>[11]</sup>对比分析了长江中下游2011年干旱事件与历史干旱事件的演变特征和成因;官学文等<sup>[12]</sup>分阶段研究了2022年长江流域极端枯水的时空演变过程,估计了干支流枯水重现期,并总结了枯水特征和成因;张明波等<sup>[13]</sup>研究了2022年长江中下游汛期枯水情势,推算了7—10月中下游干支流典型断面枯水回归期,分析了8—9月各水文站枯水地区组成。

为进一步开展多个典型枯水年径流特征的综合分析,本文基于长江流域主要水文站1956—2022年长系列水文数据,在年尺度和枯水期月尺度下提取典型枯水年的基础上,开展典型枯水年径流时空演变特征分析,从而更全面地了解枯水事件的演变规律,为水资源管理决策提供参考,以提升长江流域旱情应对能力。

### 1 数据来源

收集了1956—2022年(水文年)长江流域主要水文站(图1)长系列日平均流量。主要水文站包括上游干流向家坝站、朱沱站和寸滩站,中下游干流宜昌站、螺山站、汉口站和大通站,支流岷江高场站、沱江富顺站、嘉陵江北碛站、乌江武隆站和汉江皇庄站。其中,向家坝站流量系列最早为2012年,其之前系列用屏山站流量代替;受建站时间限制,富顺站流量系列最早为2002年。

由于梯级水库群调度运行影响,长江流域主要水文站径流系列存在非一致,需对径流系列进行还原处理。收集整理纳入2024年长江流域联合调度的53座控制性水库的调度参数<sup>[14]</sup>,包括库容曲线、尾水水位流量关系、月尺度坝前水位、库容和出库流量等实际运行资料,基于水量平衡,消除水利工程调度运行对径流的影响,得到还原后的月径流系列。

降水数据来源于国家青藏高原科学数据中心发

布的中国1 km 分辨率逐月降水量数据集(1901—2023年)。用水数据来自1960—2020年分布式人口和取水量数据集<sup>[15]</sup>。

### 2 研究方法

基于干支流枯水期识别和年尺度及枯水期月尺度下典型枯水年提取,开展长江流域典型枯水年径流时空演变特征研究。徐宇程等<sup>[16]</sup>研究表明,针对枯水期平均径流和年平均径流划分的丰、平、枯水年类型吻合度仅为38%,有必要针对枯水期平均径流和年平均径流分别提取枯水年。而识别干支流枯水期是提取典型枯水年的基础。本文基于主要水文站长系列月尺度径流资料,通过统计各水文站径流年内分布特征,将连续最小3月平均流量出现月份作为枯水期。

根据识别得到的枯水期,通过分析年尺度和枯水期月尺度下径流特征,提取各尺度下典型枯水年。根据GB/T 50095—2014《水文基本术语和符号标准》,一般采用保证率划分丰、平、枯水年,特枯水年的年平均流量频率大于87.5%。也有研究利用Z指数作为单个水文站的旱涝指标划分枯水年<sup>[17-18]</sup>。本文采用较为简易的典型枯水年提取方式,以1956—2022年年平均流量系列、枯水期平均流量系列及枯水期各月平均流量系列最枯的3个年份作为典型枯水年。针对识别得到的典型枯水年,分析日尺度下流量的时间演变特征,并通过地区组成法分析径流的空间分布特征。

### 3 结果与分析

#### 3.1 长江流域干支流枯水期识别

将月平均流量连续最枯3月定义为枯水期,通过统计干支流各水文站径流年内分布特征,识别得到长江流域干支流枯水期,结果见表1。利用枯水期平均流量与多年平均流量的比值 $R_1$ 反映枯水期枯水程度, $R_1$ 越大,表示枯水程度越低。结果表明,长江干流自上游至下游枯水期依次为:向家坝站2—4月,朱沱、寸滩和宜昌站1—3月,宜昌以下站

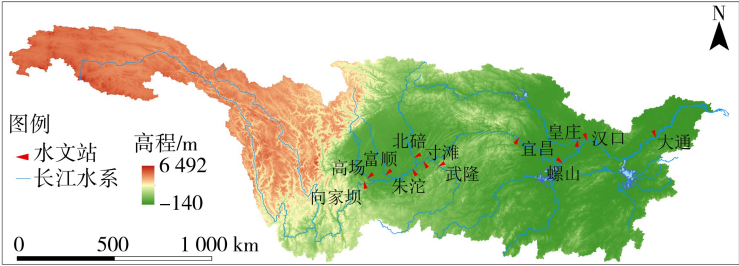


图1 长江流域主要水文站

Fig. 1 Main hydrological stations in the Yangtze River Basin

表 1 长江流域主要水文站枯水期

| Table 1 Dry seasons at main hydrological stations in the Yangtze River Basin |     |             |
|------------------------------------------------------------------------------|-----|-------------|
| 干支流                                                                          | 水文站 | 枯水期         |
| 干流                                                                           | 向家坝 | 2—4 月       |
|                                                                              | 朱沱  | 1—3 月       |
|                                                                              | 寸滩  | 1—3 月       |
|                                                                              | 宜昌  | 1—3 月       |
|                                                                              | 螺山  | 12 月至次年 2 月 |
|                                                                              | 汉口  | 12 月至次年 2 月 |
|                                                                              | 大通  | 12 月至次年 2 月 |
|                                                                              | 高场  | 1—3 月       |
| 支流                                                                           | 富顺  | 1—3 月       |
|                                                                              | 北碚  | 1—3 月       |
|                                                                              | 武隆  | 12 月至次年 2 月 |
|                                                                              | 皇庄  | 1—3 月       |

点 12 月至次年 2 月。除乌江武隆站外,长江支流水文站枯水期均为 1—3 月。乌江武隆站的丰、枯水期均为各站最早,其连续最枯 3 月径流出现在 12 月至次年 2 月,连续最丰 3 月径流出现在 5—7 月。

从枯水期枯水程度来看,干流和支流均是越靠下游枯水期枯水程度越低(图 2)。例如,干流从向家坝站至大通站及支流从高场站至皇庄站, $R_1$  呈增大趋势。此外,计算了较枯的秋冬季平均流量与多年平均流量的比值  $R_2$ ,结果同样显示,自上游至下游,干流和支流  $R_2$  也呈增大趋势。总体而言,自上游至下游,长江干流枯水期有提前趋势,且越靠下游,干支流枯水期枯水程度均呈下降趋势。

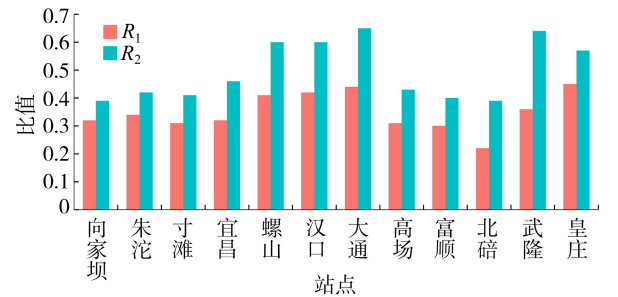


图 2 长江流域主要水文站枯水期和秋冬季平均流量与多年平均流量的比值

Fig. 2 Ratios of average runoff in dry seasons and in spring and winter to average annual runoff at main hydrological stations in the Yangtze River Basin

3.2 年、枯水期月尺度下典型枯水年提取

根据识别得到的干支流枯水期,统计各水文站 1956—2022 年年平均流量系列、枯水期平均流量系列及枯水期各月平均流量系列,结果见图 3。针对 1956—2022 年各尺度流量系列,提取系列中最小 3 个流量值作为异常值标注在箱线图上,将 3 个异常值对应的年份作为典型枯水年,从图 3 可以看出各尺度下典型枯水年流量在各水文站流量系列中的

排位,例如,向家坝、朱沱、寸滩、宜昌、螺山、汉口和大通站 2006 年平均流量在 1956—2022 年年平均流量系列中的排位分别为末 3 位、末 3 位、末位、末位、末位、末 2 位和末 3 位。在年尺度下,干流中识别得到的典型枯水年集中在 2006 年、2011 年和 2022 年,分别出现了 7、4、4 站次;在干支流中识别得到的典型枯水年同样集中在 2006 年、2011 年和 2022 年,分别出现了 10、5、6 站次。针对枯水期,干流中识别得到的典型枯水年集中在 1971 年和 1978 年,各出现了 3 站次;干支流中识别得到的典型枯水年分布广泛,1972 年和 2022 年各出现了 4 站次,1971 年、1978 年和 2002 年各出现了 3 站次。

由图 3 可知,在年尺度下或枯水期共识别得到 23 个典型枯水年,而在两种尺度下同时识别为典型枯水年的仅有 9 年,Jaccard 相似系数仅为 0.39,说明年尺度下和枯水期共同识别得到的典型枯水年一致性很低,这与徐宇程等<sup>[16]</sup>的研究结论一致。枯水期识别得到的典型枯水年大部分在 2000 年前,占比 63.9%,说明 21 世纪以来,枯水期极端干旱发生频率降低。而在年尺度下识别得到的典型枯水年却集中在 2000 年后,占比 69.4%。2000 年后,枯水期干旱频率降低而年尺度下干旱频率增加,可推测年尺度下干旱更多由丰水期的反枯所致。为此,计算了 1956—2022 年长江流域各水文站年最小 3 月平均流量系列与夏秋季年最小 3 月平均流量系列,图 4 给出了长江中下游干流 4 个代表站的结果。可利用 Mann-Kendall 检验的 Z 值反映序列的变化趋势, $Z>0$ 、 $Z<0$  分别表示序列存在上升和下降趋势,  $|Z|>1.96$  说明序列变化趋势显著。与预期一致,年最小 3 月平均流量呈增加趋势,说明近年来枯水期流量呈增加趋势;而夏秋季年最小 3 月平均流量系列呈减少趋势,说明近年来丰水期反枯现象更加明显。

针对枯水期各月份,干流中识别得到的典型枯水年集中在 1962 年、1972 年、1978 年和 2022 年,分别出现 6、5、9、5 站次;干支流中识别得到的典型枯水年集中在 1978 年、2002 年和 2022 年,分别出现 10、9、11 站次。年尺度和枯水期月尺度下识别得到的典型枯水年 Jaccard 相似系数仅为 0.26,验证了年尺度识别的枯水年与枯水期月尺度下识别的典型枯水年一致性很低的结论。

3.3 典型枯水年径流时间演变特征

在识别典型枯水年后,分析日尺度下流量的时间演变过程。长江流域旱灾中下游发生概率高于上游<sup>[19]</sup>,因此,以宜昌、螺山、汉口和大通站为例分析典型枯水年径流时间演变过程。年尺度下,干流和干支流中识别得到的典型枯水年均集中在 2006 年、

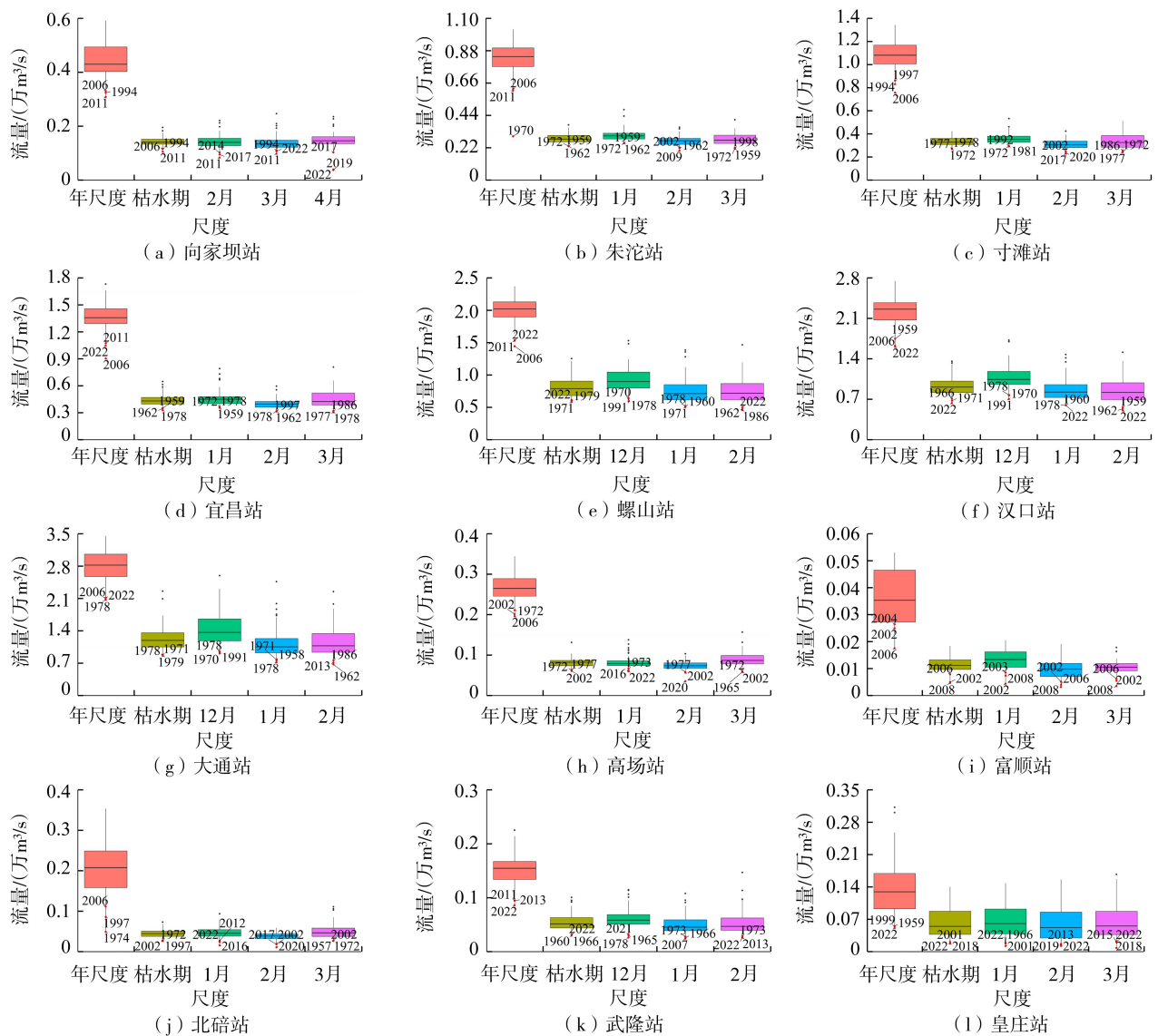


图3 年、枯水期和枯水期月尺度下流量特征及典型枯水年

Fig. 3 Runoff characteristics and typical dry years on annual scale, scale of dry seasons, and monthly scale during dry seasons

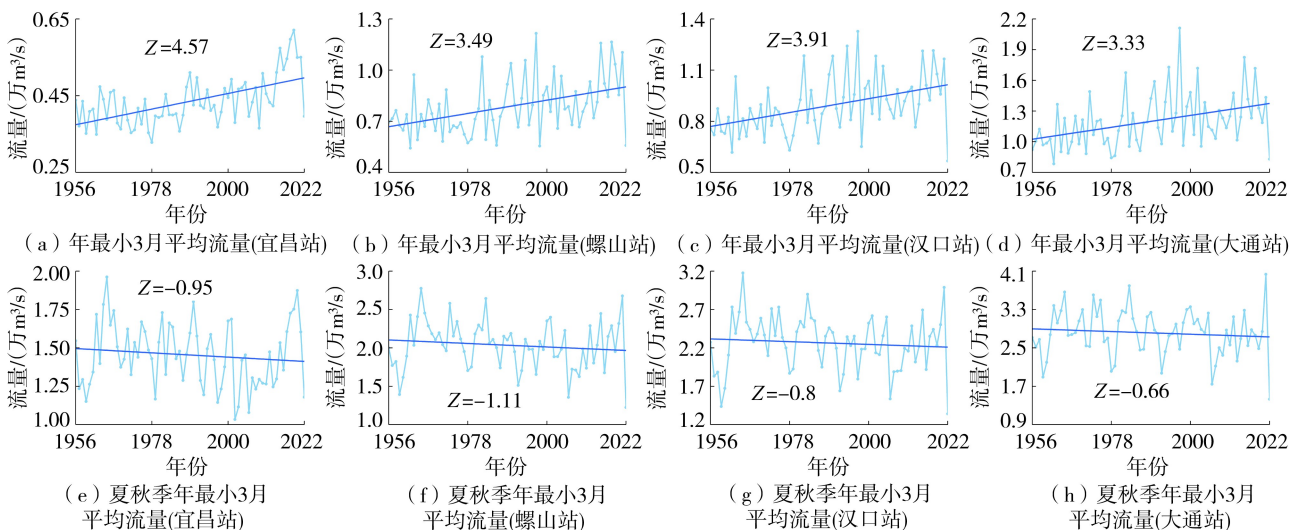


图4 年最小3月平均流量与夏秋季年最小3月平均流量

Fig. 4 Average annual minimum three-month runoff and average summer-autumn annual minimum three-month runoff

2011 年和 2022 年,因此,将 2006 年、2011 年和 2022 年日尺度累积流量过程与 2003 年后日尺度累积流量 5%~95%分位数区间进行对比,如图 5(a)~(d)所示。分析结果表明,越靠下游,流量的累积速度越稳定,说明流量年内分布越均匀。此外,越靠下游,累积流量的分位数区间越大,说明流量年内分布的年际变异性越强。9 月初,三峡进入蓄水阶段,除个别极丰年份外,处于 5%~95%分位数区间年份的流量累积速度明显放缓。宜昌站 2006 年 8 月前累积流量在 5%~95%分位数区间内,从 8 月起径流过程相比历史同期较枯,干旱程度超 20 年一遇;螺山、汉口和大通站 2006 年径流过程同样从 8 月起累积速度放缓,其全年干旱程度均超 20 年一遇。2011 年 5—9 月径流过程相比历史同期较枯,下游 4 站干旱程度基本超 20 年一遇,而 10 月后干旱程度略有缓解,次年 4 月累积流量均回升至 5%~95%分位数区间内。2022 年与 2006 年的来水过程较为类似,均从 8 月起水量骤减,呈现汛期特枯的特点,区别在于 2006 年 8 月前径流相比历史同期逐渐转枯,8 月后枯水形势更明显,而 2022 年 8 月前径流相比历史同期较丰,丰水程度甚至超 20 年一遇,8 月后呈现急剧由丰转枯。从年尺度上看,宜昌和螺山站 2006 年干旱程度最高,2011 年和 2022 年次之;汉口和大通站干旱程度同样在 2006 年最高,2022 年干旱程度超过 2011 年。总体而言,汛期来水较历史同期偏少,导致 2006 年、2011 年和 2022 年形成年尺度枯水。

针对枯水期,干流和干支流中均识别出 1978 年为典型枯水年,因此将 1978 年日尺度累积流量与 2003 年前日尺度累积流量 5%~95%分位数区间进

行对比,结果见图 5(e)~(h)。分析结果表明,与 2003 年后日尺度流量年内分布规律类似,越靠下游,2003 年前日尺度流量的年内分布越均匀,且年内分布的年际变异性越强。相比 2003 年后日尺度累积流量,2003 年前日尺度累积流量更倾向于“上凸”形,说明汛期径流占比更高,非汛期径流占比更低。1978 年汛期初期来水相比历史同期较丰,如宜昌站 7 月中旬丰水程度接近 20 年一遇。之后来水量逐渐减少,在汛期结束至次年 4 月,径流累积速度维持在较低水平,且螺山、汉口和大通站全年累积流量均跌出 5%~95%分位数区间。

3.4 典型枯水年径流空间演变特征

重点分析三峡水库建成后 2006 年、2011 年和 2022 年大通站以上各区间流量占比,结果见表 2,各区间集水面积和多年平均流量见表 3。2006 年,向家坝站、朱沱—寸滩区间和寸滩—宜昌区间的流量占比均小于相应多年平均值,向家坝—朱沱区间的流量占比与其多年平均值基本相同,因此,向家坝、朱沱、寸滩和宜昌站的干旱程度依次升高;2006 年长江中下游宜昌—螺山、螺山—汉口和汉口—大通区间的流量占比均大于相应多年平均值,因此,宜昌、螺山、汉口和大通站的干旱程度依次降低。综上,2006 年长江干流向家坝站至宜昌站干旱程度逐渐升高,宜昌站至大通站干旱程度逐渐降低。图 3 中各水文站 2006 年平均流量在 1956—2022 年年平均流量系列中的位次也印证了向家坝站—宜昌站—大通站的干旱演变特征。

2011 年向家坝—朱沱区间流量占比与其多年平均值相近,朱沱—寸滩区间的流量占比大于其多年平均值,寸滩—宜昌和宜昌—螺山区间的流量占

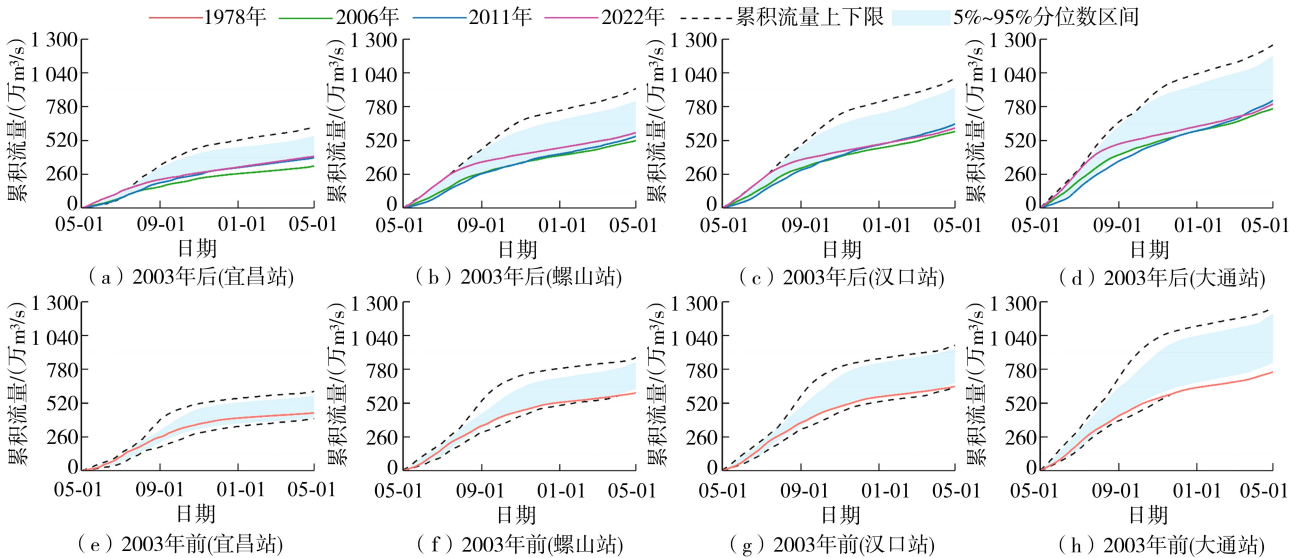


图 5 典型枯水年日尺度累积流量分布

Fig. 5 Daily cumulative runoff distribution of typical dry years

表 2 2006 年、2011 年和 2022 年大通站以上各区间流量占比

Table 2 Proportions of runoff in different regions above Datong Station in 2006, 2011, and 2022

| 枯水年  | 区间     | 典型年流量                   |        |
|------|--------|-------------------------|--------|
|      |        | 流量/( m <sup>3</sup> /s) | 占比/%   |
| 2006 | 向家坝站   | 3 309. 85               | 15. 74 |
|      | 向家坝—朱沱 | 2 888. 69               | 13. 73 |
|      | 朱沱—寸滩  | 1 379. 25               | 6. 56  |
|      | 寸滩—宜昌  | 1 471. 30               | 7. 00  |
|      | 宜昌—螺山  | 5 410. 61               | 25. 72 |
|      | 螺山—汉口  | 1 818. 01               | 8. 64  |
|      | 汉口—大通  | 4 754. 88               | 22. 61 |
|      | 大通站    | 21 032. 59              | 100    |
| 2011 | 向家坝站   | 3 084. 02               | 13. 45 |
|      | 向家坝—朱沱 | 3 004. 13               | 13. 10 |
|      | 朱沱—寸滩  | 2 769. 89               | 12. 08 |
|      | 寸滩—宜昌  | 1 871. 72               | 8. 16  |
|      | 宜昌—螺山  | 4 577. 99               | 19. 96 |
|      | 螺山—汉口  | 2 690. 85               | 11. 73 |
|      | 汉口—大通  | 4 932. 55               | 21. 51 |
|      | 大通站    | 22 931. 15              | 100    |
| 2022 | 向家坝站   | 4 105. 99               | 19. 41 |
|      | 向家坝—朱沱 | 3 035. 85               | 14. 35 |
|      | 朱沱—寸滩  | 1 693. 71               | 8. 01  |
|      | 寸滩—宜昌  | 1 630. 96               | 7. 71  |
|      | 宜昌—螺山  | 4 901. 69               | 23. 17 |
|      | 螺山—汉口  | 721. 97                 | 3. 41  |
|      | 汉口—大通  | 5 065. 89               | 23. 95 |
|      | 大通站    | 21 156. 06              | 100    |

表 3 大通站以上各区间集水面积和多年平均流量  
Table 3 Catchment area and average annual runoff of different regions above Datong Station

| 区间     | 集水面积               |        | 多年平均流量                  |        |
|--------|--------------------|--------|-------------------------|--------|
|        | 面积/km <sup>2</sup> | 占比/%   | 流量/( m <sup>3</sup> /s) | 占比/%   |
| 向家坝站   | 485 099            | 28. 02 | 4 493. 73               | 16. 05 |
| 向家坝—朱沱 | 209 626            | 12. 11 | 3 841. 03               | 13. 72 |
| 朱沱—寸滩  | 171 834            | 9. 93  | 2 429. 24               | 8. 68  |
| 寸滩—宜昌  | 138 942            | 8. 03  | 2 770. 62               | 9. 90  |
| 宜昌—螺山  | 289 410            | 16. 72 | 6 501. 44               | 23. 22 |
| 螺山—汉口  | 193 125            | 11. 16 | 2 123. 25               | 7. 58  |
| 汉口—大通  | 243 170            | 14. 05 | 5 838. 11               | 20. 85 |
| 大通站    | 1 731 206          | 100    | 27 997. 43              | 100    |

比小于相应多年平均值,螺山—汉口和汉口—大通区间流量占比大于其多年平均值。因此,2011 年长江干流朱沱站至寸滩站干旱程度逐渐降低,寸滩站至螺山站干旱程度逐渐升高,螺山站至大通站干旱程度再次降低。由图 3 可知,对于 2011 年平均流量在 1956—2022 年年平均流量系列中的排序,由朱沱至寸滩站位次上升,由寸滩至螺山站位次下降,由螺山至大通站位次上升。该位次的变化同样反映了朱沱站—寸滩站—螺山站—大通站的干旱演变特征。

2022 年向家坝站和向家坝—朱沱区间的流量占比大于相应多年平均值,而朱沱站至汉口站各区间流量占比均小于相应多年平均值,朱沱站至汉口

站干旱程度逐渐累积;汉口—大通区间的流量占比大于其多年平均值,从汉口站至大通站的干旱程度略有缓解。

综上所述,2006 年、2011 年和 2022 年呈现 3 种典型枯水年径流空间演变特征。2006 年干旱中心位于上游,尤其是川渝地区,宜昌站以下自上游至下游干旱程度逐渐缓解;2011 年向家坝—寸滩、寸滩—螺山、螺山—大通区间干旱程度呈现降低、升高和降低的波动趋势;2022 年呈现上中下游同枯,朱沱站以下干流干旱程度逐渐累积,在汉口站达最高。

## 4 讨 论

### 4.1 与已有研究中枯水年径流演变特征对比

在时间演变特征方面,2006 年、2011 年和 2022 年均呈现盛夏枯水、夏秋连旱的特征(图 5)。2006 年和 2022 年径流时间演变特征较为相似,均在 8 月后来水量骤减。徐俊杰等<sup>[10]</sup>研究表明,2006 年宜昌、汉口和大通站径流最大减幅出现在 8—9 月;张明波等<sup>[13]</sup>研究表明,2022 年长江中下游干流 8 月来水量均为历史同期实测最小。戴志军等<sup>[20]</sup>对非汛期径流研究表明,2006 年 11 月至次年 4 月,由于洞庭湖和鄱阳湖的调蓄作用,径流减小幅度变小,这种枯季不枯的水情同样在图 5 中有所体现。与 2006 年相比,2022 年最大特点是出现了明显的由丰转枯现象(图 5),官学文等<sup>[12]</sup>也捕捉到 2022 年的丰枯急转。对于 2011 年,已有研究反映出春旱严重。例如:刘建刚<sup>[11]</sup>研究表明,2011 年 4—5 月,长江中下游干旱等级维持在二级以上;陈鲜艳等<sup>[21]</sup>研究表明,2011 年 1—5 月,长江中下游地区极端偏旱,进入 6 月后,持续少雨的态势迅速改变。图 5 显示,2011 年 5—9 月,长江中下游 4 站来水维持历史同期较低水平,说明 2011 年除春季干旱少雨外,长江流域还发生夏秋连旱,虽然 10 月后枯水情势逐渐缓解,但 2011 年径流始终维持在历史较低水平。

在空间演变特征方面,从表 2 和表 3 可以看出,2006 年干旱程度在宜昌站上游逐渐累积,在中下游逐渐缓解,这是由于 2006 年洞庭湖和鄱阳湖径流减幅相对上游较小,两湖对长江干流的枯水起到了缓解作用。徐俊杰等<sup>[10]</sup>研究表明,2006 年汛期洞庭湖径流偏少,鄱阳湖径流偏丰;戴志军等<sup>[20]</sup>研究表明,2007 年 3 月洞庭湖入江流量超宜昌站流量,鄱阳湖入江流量接近宜昌站流量。由表 2 和表 3 可知,2022 年朱沱站至汉口站各区间流量均小于相应多年平均值,朱沱站至汉口站干旱程度逐渐累积,仅汉口站以下干旱程度有所缓解。这种全流域上下游

同枯、干支流同枯的情势在官学文等<sup>[12-13]</sup> 研究中有报道。

4.2 典型枯水年成因

典型枯水年降水与径流的时空演变特征呈现出一致性,降水量偏少是导致典型枯水年的主要原因。降水与径流的时间演变过程相协同。2006 年和 2022 年降水量与多年平均降水量之比均在 8 月最低,分别为 0.62 和 0.53,而来水量同样在 8 月骤减。降水量空间分布与枯水地区组成呈现一致性。不同年份长江流域降水距平百分率空间分布如图 6 所示。从图 6 可以看出,2006 年四川盆地降水量远小于多年平均值,相应地,2006 年宜昌站流量占大通站流量比例小于相应多年平均值;洞庭湖和鄱阳湖流域降水量远大于多年平均值,相应地,宜昌—大通区间流量占大通站流量比例大于相应多年平均值。2011 年嘉陵江上游降水量大于多年平均降水量,相应地,2011 年朱沱—寸滩区间流量占大通站流量比例大于多年平均值;乌江水系和洞庭湖水系的降水量远小于多年平均降水量,相应地,寸滩—螺山区间流量占大通站流量比例小于相应多年平均值。2022 年除鄱阳湖水系外,长江中下游大部分地区降水量远小于多年平均值,这与 2022 年长江上中下游大面积枯水情势相吻合。已有研究同样得出,降水异常偏少是造成 2006 年、2011 年和 2022 年枯

水的主要原因<sup>[9,10,19,21-23]</sup>,而海气相互作用、大尺度环流和水汽环流条件的多尺度异常变化共同诱发了长江流域降水偏少<sup>[24-26]</sup>。未来需深入探讨气象干旱演变过程的多尺度影响因素驱动机制及其对气候变化的响应<sup>[24]</sup>。

长江中下游沿江取用水量呈增加趋势,进一步加剧了枯水程度。图 7 为长江中下游水文站用水量变化过程,1960—2020 年长江中下游水文站以上流域用水均呈显著增加趋势( $p<0.05$ )。2020 年宜昌、螺山、汉口和大通站以上流域用水量分别占相应多年平均径流量的 14.15%、17.92%、19.57% 和 20.03%。因此,随着长江中下游社会经济的快速发展,取用水量随之增加,加剧了枯水程度。

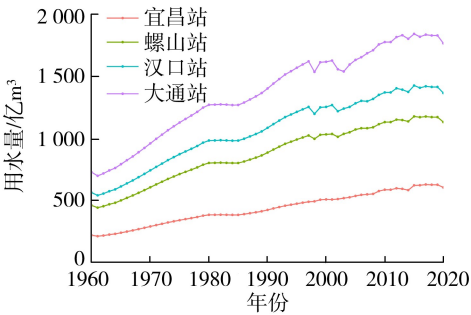


图 7 长江中下游水文站用水量变化过程  
Fig. 7 Changing process of water use at hydrological stations in middle and lower reaches of the Yangtze River

5 结 论

- a. 年尺度下识别得到的典型枯水年集中在 2006 年、2011 年和 2022 年,针对枯水期月尺度,识别得到的典型枯水年集中在 1978 年和 2022 年。
- b. 2006 年、2011 年和 2022 年典型枯水年共同特征为汛期来水较枯;2006 年与 2022 年来水过程较为相似,均在 8 月后来水量骤减,区别在于 2006 年 8 月前径流相比历史同期逐渐转枯,8 月后枯水形势更明显;2022 年 8 月前径流相比历史同期较丰,8 月后呈现急剧由丰转枯。1978 年典型枯水年汛期初期来水相比历史同期较丰,之后来水相比历史同期逐渐减少,尤其是非汛期来水维持在较低水平。
- c. 2006 年干旱中心位于上游,宜昌站以下干旱程度逐渐缓解;2011 年向家坝—寸滩、寸滩—螺山、螺山—大通区间干旱程度呈现降低、升高和降低的波动趋势;2022 年上中下游同枯,朱沱站以下干旱程度逐渐累积,汉口站达最高。
- d. 典型枯水年降水与径流的时空演变特征呈现一致性,降水量偏少是导致典型枯水年的主要原因;长江中下游沿江取用水量呈增加趋势,进一步加

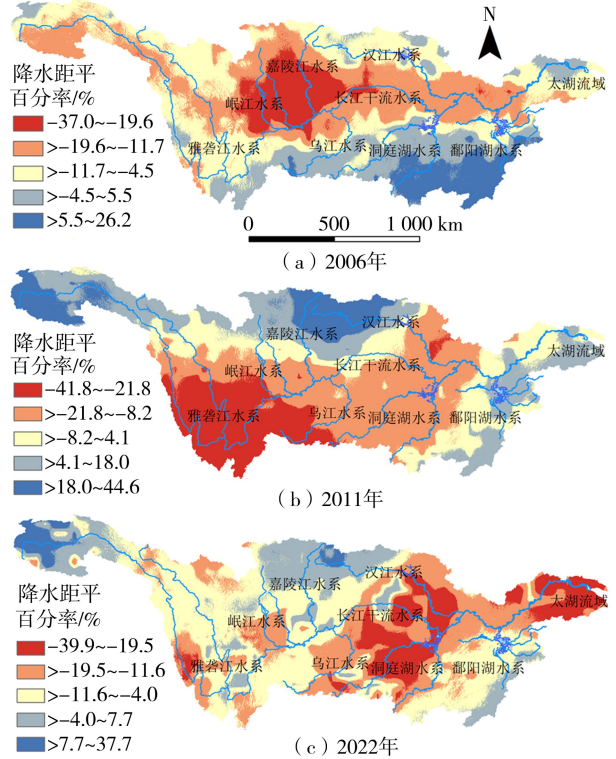


图 6 长江流域降水距平百分率空间分布  
Fig. 6 Spatial distributions of precipitation anomaly percentage in the Yangtze River Basin

剧枯水程度。

参考文献：

[ 1 ] DAI Aiguo. Drought under global warming: a review[ J]. WIREs Climate Change, 2011, 2( 1 ): 45-65.

[ 2 ] SHEFFIELD J, WOOD E F, RODERICK M L. Little change in global drought over the past 60 years[ J]. Nature, 2012, 491( 7424 ): 435-438.

[ 3 ] 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. ( in Chinese ) ).

[ 4 ] 张强, 姚玉璧, 李耀辉, 等. 中国干旱事件成因和变化规律的研究进展与展望[ J]. 气象学报, 2020, 78( 3 ): 500-521. ( ZHANG Qiang, YAO Yubi, LI Yaohui, et al. Progress and prospect on the study of causes and variation regularity of droughts in China [ J]. Acta Meteorologica Sinica, 2020, 78( 3 ): 500-521. ( in Chinese ) ).

[ 5 ] 郝增超, 张璇, 郝芳华, 等. 2022 年夏季长江流域复合高温干旱事件的影响及应对[ J]. 水资源保护, 2023, 39( 6 ): 46-52. ( HAO Zengchao, ZHANG Xuan, HAO Fanghua, et al. Impacts and coping strategies of compound hot extremes and droughts during summer of 2022 in the Yangtze River Basin [ J]. Water Resources Protection, 2023, 39( 6 ): 46-52. ( in Chinese ) ).

[ 6 ] 姜雨彤, 郝增超, 冯思芳, 等. 长江与黄河流域复合高温干旱事件时空演变特征[ J]. 水资源保护, 2023, 39( 2 ): 70-77. ( JIANG Yutong, HAO Zengchao, FENG Sifang, et al. Spatiotemporal evolution characteristics in compound hot-dry events in Yangtze River and Yellow River basins [ J]. Water Resources Protection, 2023, 39( 2 ): 70-77. ( in Chinese ) ).

[ 7 ] 尹家波, 郭生练, 顾磊, 等. 中国极端降水对气候变化的热力学响应机理及洪水效应[ J]. 科学通报, 2021, 66( 33 ): 4315-4325. ( YIN Jiabo, GUO Shenglian, GU Lei, et al. Thermodynamic response of precipitation extremes to climate change and its impacts on floods over China [ J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66( 33 ): 4315-4325. ( in Chinese ) ).

[ 8 ] MUKHERJEE S, MISHRA A K. Increase in compound drought and heatwaves in a warming world [ J]. Geophysical Research Letters, 2021, 48( 1 ): e2020GL090617.

[ 9 ] 许继军, 袁喆. 2022 年长江流域干旱特征分析与新时期抗旱减灾应对模式探讨[ J]. 长江科学院院报, 2023, 40( 4 ): 1-8. ( XU Jijun, YUAN Zhe. Drought characteristics of Changjiang River Basin in 2022 and drought mitigation response pattern under new circumstances [ J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, 40( 4 ): 1-8. ( in Chinese ) ).

[ 10 ] 徐俊杰, 何青, 刘红, 等. 2006 年长江特枯径流特征及其原因初探[ J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17( 5 ): 716-722. ( XU Junjie, HE Qing, LIU Hong, et al. Preliminary analysis of characteristics of the exceptional low discharge and its cause over the Yangtze River in 2006 [ J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2008, 17( 5 ): 716-722. ( in Chinese ) ).

[ 11 ] 刘建刚. 2011 年长江中下游干旱与历史干旱对比分析[ J]. 中国防汛抗旱, 2017, 27( 4 ): 46-50. ( LIU Jiangang. A Comparative analysis of current severe drought in the middle and lower reaches of Yangtze River 2011 with historical drought records [ J]. China Flood & Drought Management, 2017, 27( 4 ): 46-50. ( in Chinese ) ).

[ 12 ] 官学文, 曾明. 2022 年长江流域枯水特征分析与启示[ J]. 人民长江, 2022, 53( 12 ): 1-5. ( GUAN Xuewen, ZENG Ming. Characteristics and enlightenment of low water in Changjiang River Basin in 2022 [ J]. Yangtze River, 2022, 53( 12 ): 1-5. ( in Chinese ) ).

[ 13 ] 张明波, 熊丰, 王栋. 2022 年长江流域汛期枯水情势分析[ J]. 人民长江, 2023, 54( 4 ): 1-6. ( ZHANG Mingbo, XIONG Feng, WANG Dong. Analysis on low water regime during flood season in Yangtze River Basin in 2022 [ J]. Yangtze River, 2023, 54( 4 ): 1-6. ( in Chinese ) ).

[ 14 ] 长江水利委员会. 2024 年长江流域水工程联合调度运用计划[ R]. 武汉: 长江水利委员会, 2024.

[ 15 ] YAN Denghua, ZHANG Xin, QIN Tianling, et al. A data set of distributed global population and water withdrawal from 1960 to 2020 [ J]. Scientific Data, 2022, 9( 1 ): 640.

[ 16 ] 徐宇程, 朱首贤, 张文静, 等. 长江大通站径流量的丰平枯水年划分探讨[ J]. 长江科学院院报, 2018, 35( 6 ): 19-23. ( XU Yucheng, ZHU Shouxian, ZHANG Wenjing, et al. Classification of high/medium/low flow year of the Yangtze River according to runoff at Datong Station [ J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35( 6 ): 19-23. ( in Chinese ) ).

[ 17 ] 刘志雄, 肖莺. 长江上游旱涝指标及其变化特征分析[ J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21( 3 ): 310-314. ( LIU Zhixiong, XIAO Ying. Indices and characteristic of drought and flood in the upper basin of the Changjiang River [ J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21( 3 ): 310-314. ( in Chinese ) ).

[ 18 ] 谭桂容, 孙照渤, 陈海山. 旱涝指数的研究[ J]. 南京气象学院学报, 2002, 25( 2 ): 153-158. ( TAN Guirong, SUN Zhaobo, CHEN Haishan. Study on the flood/drought indices [ J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2002, 25( 2 ): 153-158. ( in Chinese ) ).

( 下转第 179 页 )

CUI Yuanlai. Construction of integrated surface water and groundwater model for irrigation area[J]. Shuili Xuebao, 2012,43(7):826-833. (in Chinese))

[38] 赖格英,吴敦银,钟业喜,等. SWAT 模型的开发与应用进展[J]. 河海大学学报(自然科学版),2012,40(3):243-251. (LAI Geying, WU Dunyin, ZHONG Yexi, et al. Progress in development and applications of SWAT model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012,40(3):243-251. (in Chinese))

[39] SHI Wenhai, HUANG Mingbin. Predictions of soil and nutrient losses using a modified SWAT model in a large hilly-gully watershed of the Chinese Loess Plateau[J]. International Soil and Water Conservation Research,2021, 9(2):291-304.

[40] 丁一汇,柳艳菊,徐影,等. 全球气候变化的区域响应:中国西北地区气候“暖湿化”趋势、成因及预估研究进展与展望[J]. 地球科学进展,2023,38(6):551-562. (DING Yihui, LIU Yanju, XU Ying, et al. Regional responses to global climate change:progress and prospects for trend, causes, and projection of climatic warming-wetting in Northwest China [J]. Advances in Earth Science,2023,38(6):551-562. (in Chinese))

[41] SINGH D, VARDHAN M, SAHU R, et al. Machine-learning- and deep-learning-based streamflow prediction in a hilly catchment for future scenarios using CMIP6 GCM data[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2023, 27 (5):1047-1075.

(收稿日期:2024-09-30 编辑:施业)

-----

(上接第 158 页)

[19] 夏军,陈进,余敦先. 2022 年长江流域极端干旱事件及其影响与对策[J]. 水利学报,2022, 53(10):1143-1153. (XIA Jun, CHEN Jin, SHE Dunxian. Impacts and countermeasures of extreme drought in the Yangtze River Basin in 2022 [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022,53(10):1143-1153. (in Chinese))

[20] 戴志军,李九发,赵军凯,等. 特枯 2006 年长江中下游径流特征及江湖库径流调节过程[J]. 地理科学,2010, 30(4):577-581. (DAI Zhijun, LI Jiufa, ZHAO Junkai, et al. Adjustment processes of runoff among river, lake and reservoir along mid-lower reaches of Changjiang River during 2006 extreme drought year [J]. Scientia Geographica Sinica, 2010, 30(4):577-581. (in Chinese))

[21] 陈鲜艳,周兵,钟海玲,等. 2011 年长江中下游春旱的气候特征分析[J]. 长江流域资源与环境,2014,23(1):139-145. (CHEN Xianyan, ZHOU Bing, ZHONG Hailing, et al. Climate characteristics of the 2011 spring drought in the mid-lower Yangtze Basin [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2014,23(1):139-145. (in Chinese))

[22] 张明波,戴明龙,熊丰,等. 2022 年长江流域极端干旱分析及思考[J]. 中国防汛抗旱,2023,33(7):9-15. (ZHANG Mingbo, DAI Minglong, XIONG Feng, et al. Analysis and reflection on extreme drought in the Yangtze River Basin in 2022 [J]. China Flood & Drought Management,2023,33(7):9-15. (in Chinese))

[23] 孟长青,董子娇,刘柯莹,等. 嘉陵江流域骤发干旱时空演变特征分析[J]. 水利水电科技进展,2024,44(4):23-30. (MENG Changqing, DONG Zijiao, LIU Keying, et al. Analysis of spatiotemporal evolution characteristics of flash droughts in Jialing River Basin[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44 (4):23-30. (in Chinese))

[24] 荣艳淑,石丹丹,吕星玥,等. 拉尼娜事件对长江中下游旱涝的影响[J]. 水资源保护,2019,35(3):14-24. (RONG Yanshu, SHI Dandan, LU Xingyue, et al. Influence of La Niña events on drought and flood in middle and lower reaches of Yangtze River[J]. Water Resources Protection,2019,35(3):14-24. (in Chinese))

[25] 吴志勇,施怡然,刘杨合,等. 长江流域干旱形成演变机制与预测研究进展[J]. 人民长江,2024;1-13[2025-07-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1202.TV.20241220.1528.003.html>. (WU Zhiyong, SHI Yiran, LIU Yanghe, et al. Advances in drought manifestation and propagation mechanism, and its prediction over Yangtze River Basin[J]. Yangtze River,2024;1-13[2025-07-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1202.TV.20241220.1528.003.html>. (in Chinese))

[26] 郑博福,肖德利,万炜,等. 长江流域干旱评估指标、时空特征及成因研究进展[J]. 水资源保护,2024,40(5):18-28. (ZHENG Bofu, XIAO Deli, WAN Wei, et al. Research progress on assessment indicators, spatio-temporal characteristics and causes of drought in the Yangtze River Basin [J]. Water Resources Protection, 2024,40(5):18-28. (in Chinese))

(收稿日期:2024-10-23 编辑:施业)