

DOI:10.16867/j.issn.1673-9264.2023290

柯帅,丁兵,渠庚. 枯水情势对长江中下游取水工程运行影响及对策研究[J]. 中国防汛抗旱, 2023, 33(9): 25-30. KE Shuai, DING Bing, QU Geng. Research on the impact and countermeasures of low water conditions on the operation of water extraction projects in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. China Flood & Drought Management, 2023, 33(9): 25-30. (in Chinese)

枯水情势对长江中下游取水工程运行影响及对策研究

柯 帅 丁 兵 渠 庚

(1. 长江水利委员会长江科学院, 武汉 430010; 2. 水利部长江中下游河湖治理与防洪重点实验室, 武汉 430010)

摘 要: 长江是长江经济带发展的重要依托,也是沿江城市群最重要的水源地。2022年长江中下游干流极端枯水位的出现极大影响了沿江城市供水安全,暴露出长江中下游沿岸取水工程在枯水情况下面临重大威胁。基于已有研究成果,在上游干支流控制性水库陆续建成及极端干旱灾害频发的背景下,从水库蓄洪补枯调度、枯水河槽下切及干旱天气影响角度,阐述了长江中下游干流未来枯水情势变化趋势,分析了枯期水位下降对取水水位、水质保证及河口取水工程抵御盐水入侵的影响,并提出了相应对策建议。

关键词: 长江中下游; 枯水条件; 取水工程; 供水安全; 治理对策

中图法分类号: TU991; S423

文献标识码: A

文章编号: 1673-9264(2023)09-25-06

0 引 言

长江中下游地区是长江中游城市群发展战略、长三角一体化发展战略的实施区域,在我国经济社会发展中具有重要的战略地位^[1]。长江中下游干流河道上起宜昌,下迄长江河口原 50 号灯标,全长约 1 893 km,分布百余处集中式饮用水水源地^[2],是长江经济带最重要的水源地。而在新水沙条件下,长江中下游干流河道正面临着“清水下泄”带来的长时间、长距离的枯水河槽冲刷及枯水水位下降等问题^[3],枯期供水安全问题凸显。虽在上游系列控制性水库的调蓄作用下,坝下游枯期水位下降趋势等一系列问题有所缓和^[4],但河床下切叠加极端天气影响下的枯水位下降问题愈发得到广泛关注。本文分析了以三峡工程为核心的上游水库群建成投运以来,长江中下游干流河道枯水情势变化特点及其对沿江取水工程运行的影响,通过总结已有经验,针对提出相关建议和对策,为枯水情势下长江中下游

取水工程应急补水提供参考。

1 长江中下游枯水情势变化

长江干流水沙条件在以三峡为核心的干支流控制性水库陆续建成投运后发生了较大变化。自三峡工程 2003 年蓄水以来,除监利站多年平均径流量较蓄水前偏丰 6% 外,长江中下游其他站点水量均偏枯 1% ~ 4%^[5]。如三峡工程蓄水前,宜昌站、沙市站、汉口站和大通站 1950—2002 年多年平均径流量分别为 4 369 亿 m³、3 942 亿 m³、7 111 亿 m³ 和 9 052 亿 m³^[5],2003—2021 年多年平均径流量为 4 218 亿 m³、3 907 亿 m³、6 929 亿 m³ 和 8 782 亿 m³^[6],相比于蓄水前分别降低 3.46%、0.89%、2.56% 和 2.98% (图 1)。同时,2003—2021 年宜昌站、沙市站、汉口站和大通站年均输沙量分别为 0.34 亿 t、0.50 亿 t、0.95 亿 t 和 1.32 亿 t,相比蓄水前减少 93%、88%、76% 和 69% (图 2)^[7],特别是在 2013 年上游干流控制性水库群兴建以来,宜昌站年均输沙量进一步减少。

收稿日期: 2023-07-24

第一作者信息: 柯帅,男, E-mail: keshuai96@163.com。

通信作者信息: 丁兵,男,高级工程师, E-mail: dingbing@mail.crsri.cn。

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC3202601); 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(CKSF2023328/HL、CKSF2023189/HL)。

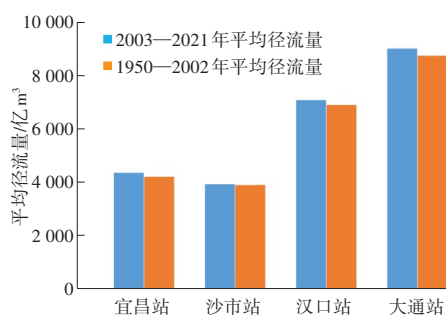


图1 三峡工程蓄水前后平均径流量

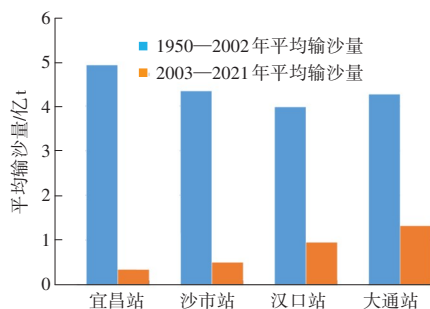


图2 三峡工程蓄水前后平均输沙量

在上游梯级水库蓄洪补枯调度下,中下游干流洪枯径流量变化引起水位变幅。2022年水利部将长江流域111座水工程纳入联合调度,其中含控制性水库51座,总调节库容1160亿 m^3 、总防洪库容705亿 m^3 ^[8]。上游水库群汛期腾库蓄洪、枯期兴利消落的作业方式对长江中下游干流河道枯水期产生的主要影响是流量过程明显坦化,中等流量持续时间加长^[7],枯期径流量较建坝前有所增加^[9]。如图3所示,中下游干流河道汛前水位相较三峡工程蓄水前有所增加,汛期水位具有明显降幅,12月至次年3月枯期水位均高于三峡工程蓄水前,且中游汉口站变化幅度比下游大通站更为明显。另根据实测资料显示,枝城站、沙市站、螺山站、汉口站等中游水文站在三峡工程蓄水后枯水位最大下降值分别为0.8 m、2.4 m、1.6 m、1.4 m,荆江河段枯水位下降相对较大,城陵矶至汉口段次之,下游河段相对较小^[10]。

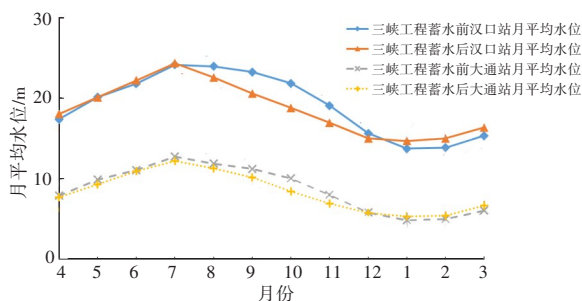


图3 三峡工程蓄水前后汉口站、大通站多年月平均水位曲线图

上游水库群枯期补水虽能一定程度增加中下游来水量,但在拦沙作用下,长江中下游干流河道在“清水下泄”中将处于长时间、长距离冲刷与调整,造成长江干流河道枯期河水归槽、水位下降。加之近年来极端干旱气候频发,长江流域各测站几度出现极端枯水位。如2006年严重干旱,武汉关水位降至1985年有实测资料以来最低水位15.98 m^[11],2022年长江流域全流域均遭受严重旱灾,上中下游同枯。总而言之,长江中下游枯水条件变化主要有以下趋势。

(1)干流河床持续下切,同流量水位降低。大型水库修建后,在水库调蓄作用下河道水文情势发生不可逆转改变,坝下游河槽冲刷是国内外大型水库投运后的普遍现象^[4]。三峡工程及上游干支流控制性水库建成投运以来,三峡坝下来沙量大幅减少,长江中下游干流全线河道处于持续冲刷中,累计冲刷量为50.3亿 m^3 ,平均年均冲刷2.55亿 m^3 ^[5],造成河槽断面面积增加,相同流量条件水位将会下降(图4),下降幅度沿程递减。根据2003年、2009年、2015年及2020年多年流量—水位关系拟合曲线,沙市站、螺山站和汉口站在不同流量下水位均有明显下降,且呈现逐年下降趋势,如沙市站在流量为8000 m^3/s 时,上述4年拟合计算水位分别为33.61 m、32.97 m、32.02 m、30.97 m。大通站由于距坝较远,历年流量水位数据分布较为相近,未出现明显下降趋势。另外,根据实测资料,冲刷以枯水河槽为主^[3-4],枯水位以下河道断面范围增加将造成枯水水位下降,如图4中汉口站流量—水位关系曲线枯水流量下水位下降幅度更为突出。冲刷造成荆江河段近坝段河道断面形态向窄深化发展^[5],根据多年实测资料显示,长江干流觐洲湾段复兴洲上游处断面(图5),河道深泓线在2003年后不断下探,河道断面由梯形逐渐冲刷演变为倒三角形(图6)。

(2)两湖枯期历时延长,枯水水位降低。由于长江水文情势的改变,洞庭湖、鄱阳湖湖区的水文情势势必会随之

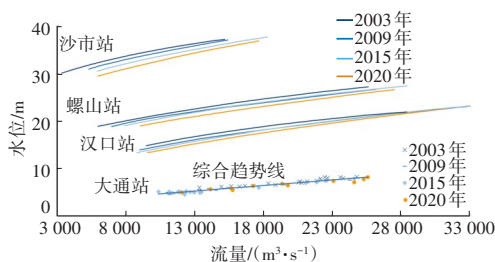


图4 长江中下游代表水文站流量—水位关系图

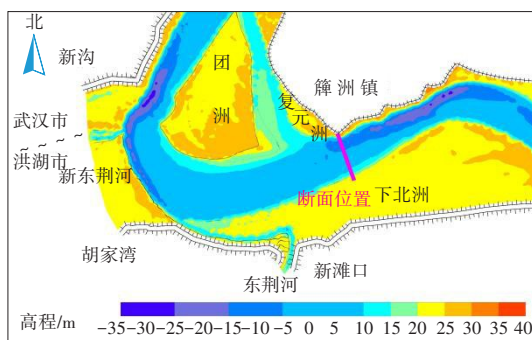


图5 长江干流簪洲湾段簪洲镇河势图

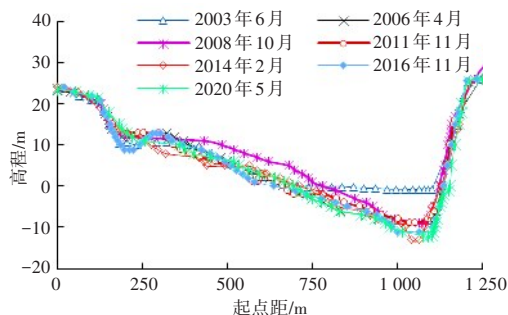


图6 河道断面多年变化图

发生变化,如鄱阳湖连续出现枯水时间提前、枯水期延长、枯水期水位超低等现象,枯水已成常态化现象^[12]。每年9—11月为上游水库群的蓄水期,干流河道下泄流量减少,湖区向干流河道出流补水造成水位提前消落,枯水提前。另外,由于长江中下游输沙量相比三峡建库前大幅减少,干流河道冲刷,洞庭湖三口河道口门分流比由三峡工程蓄水前的14.0%降低至11.9%,枯期分流比下降幅度更为明显,由1956—1966年的34.9%下降至3.4%^[13],枯期来水量大幅减少;两湖泥沙沉积量及淤积量降低而湖口输沙量却明显上升,入江水道冲刷,干流顶托作用减缓^[14],将对两湖枯水条件产生不利影响。

(3)极端干旱天气频发,枯水情势严峻。2000年以来,长江流域干旱灾害发生频次较高、对非枯期影响更大。2006年、2011年、2013年、2019年和2022年长江流域都发生了严重干旱^[15],干旱气候下流域降水减少,河川径流降低,水位随之降低。如2019年沙市以下河段出现了三峡工程蓄水以来最为严重的极低水位^[16],2022年7—10月,长江流域发生1961年实测记录以来最严重的特大干旱事件,造成“汛期反枯”,干流各代表站最低水位均突破历史最低值^[17],沿江涵闸取、引水困难。2022年干旱造成洞庭湖、鄱阳湖两湖面积锐减,分别提前4个月和3个月进入枯水期,

两湖汛期无法补水且水位严重衰退。七里山站、汉口站、湖口站和大通站在2022年8月15日测得水位23.55 m、17.30 m、10.37 m和6.84 m,均为有实测资料以来最低值。统计上述枯水年份汉口站水位(图7),枯水年份中下游12月至次年3月枯期水位相较2003年以来水位均值而言处于偏高水平,而在非枯期内相差较大,明显低于2003年以来水位均值,如2022年10月4日低7.26 m,2011年6月1日低4.54 m,非枯期受旱情影响程度更大。

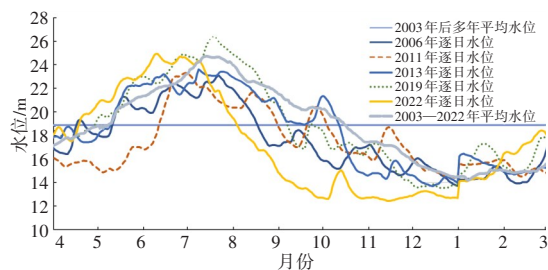


图7 枯水年份汉口站水位历时图

2 枯期取水工程运行存在的问题

长江中下游城市群的水源来源绝大部分为地表水,且因为沿江取水便利和城市附近其他水源水质不达标等原因,主要使用客水(即从上游流进或引进)。据统计^[18],长江中下游干流流经湖北、湖南、江西、安徽、江苏、上海等省(直辖市)非农业取水口分布分别为108处、8处、9处、98处、85处、14处,其中沿江城市如武汉市、南京市、上海市等大型城市自长江取水占总取水来源相当大的比例^[19],取水工程的稳定运行直接影响各大城市的供水安全。枯期水文情势变化对于长江中下游取水工程运行影响主要体现以下4个方面。

(1)河势不断调整,取水条件变差。三峡工程水库蓄水运用后,中下游河道流量过程改变,枯水河槽持续冲刷造成河势调整和发展^[3],局部冲淤及支叉调整都会对取水工程运行造成不利影响。取水工程的取水头部一般设置在靠近主流、河床稳定的位置,但在中枯水流量下部分取水工程区域河槽向下、向岸不断刷深刷宽,易造成岸坡失稳、基础出露等安全性问题,如位于武汉段天兴洲右汊2014年建成运行的新武湖水厂取水和输水工程,2022年已冲刷成一部突出体(图8)。位于河道支叉的取水工程还可能因为枯期河流归槽,所在支叉断流造成取水困难,如2022年

9月武穴市龙坪镇水厂因水位下降左汊断流造成取水困难,需横跨江滩超800 m架设管道,通过两级传递提水方式从右汊取水(图9)。

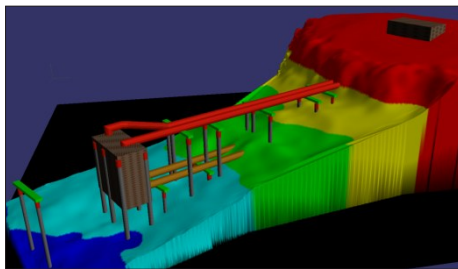


图8 新武湖水厂取水头部2021年三维地形图



图9 武穴市龙坪镇水厂新架管道

(2) 枯期水位下降,取水难度增加。取水水位下降,取水保证率降低是河床冲刷、河势调整及极端干旱气候叠加影响下长江中下游干流河道枯期水位下降带来的最直接影响之一。根据相关规范条文^[20-21],长江中下游沿江主要城市工业、生活供水保证率应在95%、99%以上,沿程各代表水文站供水保证水位值分别为沙市32.0 m,城陵矶20.5 m,汉口13.5 m,九江8.5 m,南京2.5 m^[22]。其中沙市站水位在低于30.6 m时开始出现取水口取水受影响现象,在低于29.6 m时部分取水口取水困难,在29.4 m、28.9 m时取水受影响及取水困难取水口个数出现大幅度增加,此时取水困难取水口对应的供水人口占总供水人数的比例也由水位29.6 m时的20%左右激增至80%左右。枯期水位保证不足,需采用应急泵站等临时工程保证供水,花费巨大。2022年合肥城区受巢湖水位降低影响,供水出现困难,通过开通多级应急泵站提水,西引长江水进行大房郢水库补水才能保证城区供水,累计提水1.6亿m³,投入资金上亿元^[23]。

(3) 水文节律改变,两湖供水受限。江湖关系改变,两湖水文节律也发生调整,洞庭湖、鄱阳湖均面临枯水常态化的问题,湖区取水条件恶化^[12-13]。受入湖水量补给减少、上游水库群汛末蓄水及干流河道持续冲刷等因素的综合

影响,两湖枯期持续低水位,季节性缺水问题凸显,湖区供水安全面临威胁。同时,枯水水位下降后湖盆裸露干燥,后期水位逐渐回升,湖区沉积物干湿交替对湖区水质具有显著影响^[24]。鄱阳湖1986—2016年水质呈下降趋势,2007年后湖区I~II类水占比几近于0^[12],湖区水质恶化严重,对湖区取水工程而言是又一大不利因素。

(4) 河道补水不足,河口盐水入侵。对于长江下游河口地区,盐水入侵是供水安全的重要威胁,如上海市饮用水三大水源地——陈行水库、青草沙水库和东风西沙水库常受到盐水入侵影响而产生供水问题。上游径流压咸作用是抵御盐水入侵最重要的因素之一^[25],枯期上游来水量减少及沿江抽引江水导致入海水量下降,河口盐水入侵影响显著增强,长江口的盐水入侵一般发生在枯季^[26]。2003年三峡工程蓄水以来,由于水库枯期补水调节,河道径流量增加,河口盐水入侵情况相比历史前期而言处于较弱水平。但同时由于进入21世纪以来,全球极端气候频发,枯季仍可能由于潮汐、风应力等出现严重盐水入侵。另外,长江口在汛期遭受严重盐水入侵的现象近年来亦不少见。如2006年,长江口比常年提前3个月出现盐水入侵且频次较高;2011年,3—6月长江口持续发生盐水入侵而影响水源地取水的事件^[27];2014年2月发生长时间的强北风引发盐水入侵,造成青草沙水库持续30 d不宜取水^[27]。

3 建议与对策

长江中下游干流河道正在经历长尺度的冲刷和调整,河床下切造成枯期水位下降,极端干旱气候影响频发进一步激化取水工程供水矛盾,对沿江城市供水安全造成严重不利影响。本文从实际出发,就缓解枯水情势下取水工程运行影响提出如下建议。

(1) 排查枯期供水问题,进行取水工程提升改造。对于在2022年极低枯水位下出现严重取水困难的沿江及两湖湖区水厂、涵闸泵站等取水工程,应进行详细排查登记形成台账,明确取水需求及存在的问题。长江中下游沿岸遍布取水工程,随着经济社会的发展,一部分取水设施自身已出现设施老化,供水能力不足的问题。加之枯水条件下取水条件进一步恶化,这些老旧设施的运行更加难以为继。应及时对取水困难的工程及设施改造升级指导,结合长江中下游未来枯水情势发展研究,采取相应工程措施改

善取水条件。

(2)推进数字孪生建设,开展枯水演进、咸潮预测及取水分配等研究,提高流域枯水预报及取水调度一体化水平。新水沙条件下,中下游河道冲刷造成枯水位下降趋势较为明确,但调整历时长、年变化较小,而干旱天气事件的发生具有不确定性和极端性,两者叠加作用下对长江中下游城市供水安全影响面广而又具有突发性。应从流域视角出发,综合水文、气象、水利等多行业多渠道数据,开展极端干旱天气影响下长江中下游枯水情势演进研究,明确沿江各省(直辖市)枯水演进历程和趋势,结合数字孪生流域建设,强化沿江城市取水科学统筹调度,避免竞争性取水。

(3)科学完善水库联合调度方案。随着长江流域控制性水库群的形成,水库群蓄丰补枯已成为保障枯水期供水安全最可靠的措施^[28]。水库联合调度已多次在枯期应急补水,在缓解中下游供水紧张问题时发挥重要作用。在2022年极端干旱情况下,长江流域水库群精准开展联合补水调度,实现了“大旱之年无大灾”^[29]。应持续开展水库群联合调度研究,融合上中下游多工程特点,统筹江湖关系、河口压咸等多目标需求,进一步科学完善调度方案,优化水库群运行水位控制,在确保防洪安全的前提下科学利用中小洪水资源,充分发挥水库群蓄洪补枯作用。

(4)开展应急水源地建设,增加供水安全应急储备。枯期取水工程面临的问题是对城市供水系统的挑战,目前沿江城市供水结构大多较为单一,存在城市应急水源建设和经济发展不匹配、配套设施不足等问题^[19,30],且应急水源地建设主要针对水污染事件,面对当下枯水条件的应急水源储备不足,应在综合考虑城乡供水需求下,针对枯水条件变化特点,科学研判应急水源地选址及规模,加强应急备用水源地建设,实现多源互联互通,提高城乡供水系统安全水平及应急储备。

4 结 论

长江中下游干流沿岸取水工程是两岸居民生活、生产的重要水源保障,枯水条件的变化对城市取水保障和供水安全具有重大影响。长江中下游枯水情势年内变化受上游控制性水库调节作用具有一定的补枯效果,但在未来枯水河床持续性冲刷趋势叠加极端干旱天气偶发性影响下,极低枯水位不断突破历史极值、枯水水文节律出现反常变化

的现象时有发生,造成部分取水工程无水可取、无水可用。应针对沿江取水工程在枯水情势下运行问题展开隐患排查,及时升级改造。同时尽早开展干旱天气影响下长江中下游干流枯水演进研究,完善水库群、取水工程等多工程调度方案,开展数字孪生流域建设,拓展城市供水安全应急水源地。

参考文献

- [1] 水利部长江水利委员会.长江中下游干流河道治理规划(2016年修订)[R].2016.
- [2] 中华人民共和国水利部.长江岸线保护和开发利用总体规划[R].2016.
- [3] 姚仕明,卢金友.长江中下游河道演变规律及冲淤预测[J].人民长江,2013,44(23):22-28.
- [4] 韩剑桥,孙昭华,杨云平.三峡水库运行后长江中游洪、枯水位变化特征[J].湖泊科学,2017,29(5):1217-1226.
- [5] 许全喜,董炳江,袁晶,等.三峡工程运用后长江中下游河道冲刷特征及其影响[J].湖泊科学,2023,35(2):650-661.
- [6] 水利部长江水利委员会.2021年长江泥沙公报[R].2021.
- [7] 李义天,薛居理,孙昭华,等.三峡水库下游河床冲刷与水位变化[J].水力发电学报,2021,40(4):1-13.
- [8] 水利部长江水利委员会.2022年长江流域水工程联合调度运用计划[R].2022.
- [9] 丁兵,姚仕明,渠庚.长江中下游干流河道洪中枯水位统筹治理探讨[J].长江技术经济,2023,7(1):16-22.
- [10] 丁兵,姚仕明,栾华龙.新形势下长江中下游干流河道治理思路探讨[J].长江技术经济,2023,7(1):35-42.
- [11] 朱建荣,吴辉,李路,等.极端干旱水文年(2006)中长江河口的盐水入侵[J].华东师范大学学报(自然科学版),2010,(4):1-6.
- [12] 吴培军,万晓明,徐继铭,等.鄱阳湖枯水期水位变化及应对措施[J].水资源保护,2019,35(6):104-108,123.
- [13] 钮新强.洞庭湖综合治理方案探讨[J].水力发电学报,2016,35(1):1-7.
- [14] 万荣荣,杨桂山,王晓龙,等.长江中游通江湖泊江湖关系研究进展[J].湖泊科学,2014,26(1):1-8.
- [15] 屈艳萍,吕娟,苏志诚,等.2022年长江流域夏秋旱特点分析与思考[J].中国防汛抗旱,2023,33(3):30-33,66.
- [16] 杨成刚,李思璇,董炳江,等.三峡水库运用后长江中下游枯水位变化成因研究[J].泥沙研究,2021,46(5):34-40.

- [17]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.
- [18]中华人民共和国水利部.长江经济带沿江取水口、排污口和应急水源布局规划[R].2016.
- [19]陈进,王永强,张晓琦.长江经济带供水安全保障战略研究[J].水利学报,2021,52(11):1369-1378.
- [20]中华人民共和国住房和城乡建设部.城市给水工程项目规范:GB 55026—2022[S].北京:中国建筑出版传媒有限公司,2022.
- [21]中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局.泵站设计标准:GB 50265—2022[S].北京:中国计划出版社有限公司,2022.
- [22]李亚平,吴三潮,雷静,等.长江中下游主要城市供水保证水位(流量)研究[J].人民长江,2013,44(4):18-20.
- [23]徐文娟.江水西引!合肥启动城市供水应急补水[DB/OL].(2022-09-23)[2023-06-30].http://ahnews.com.cn/hefei/pc/con/2022-09/23/565_676697.html.
- [24]张洪,薛雪,郁达伟,等.鄱阳湖水位对沉积物磷释放的影响及总磷考核建议[J].人民长江,2023,54(1):46-52.
- [25]丁磊,缴健,杨啸宇,等.上游水库群运行对长江口淡水资源的影响及未来趋势分析[J].海洋工程,2022,40(2):130-142.
- [26]邱凉,翟红娟,罗小勇.长江中下游干流饮用水水源地现状及保护探讨[J].中国水利,2014,(17):19-21.
- [27]王玉琦,李铖,刘安琪,等.2022年长江口夏季咸潮入侵及影响机制研究[J].人民长江,2023,54(4):7-14.
- [28]丁胜祥,张俊,牛文静,等.应对2022年枯水的长江上游水库群联合调度方案[J].人民长江,2023,54(2):1-6.
- [29]黄艳,李荣波,马立亚,等.长江流域2022年抗旱管理实践与思考[J].中国防汛抗旱,2023,33(3):1-11,29.
- [30]周琴,肖昌虎,黄站峰,等.长江经济带取排水口和应急水源布局规划研究[J].人民长江,2018,49(5):1-5.

Research on the impact and countermeasures of low water conditions on the operation of water extraction projects in the middle and lower reaches of the Yangtze River

KE Shuai, DING Bing, QU Geng

(1.Changjiang River Scientific Research Institute, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010;

2.Key Laboratory of River and Lake Regulation and Flood Control in the Middle and Lower Reaches of the Changjiang River of Ministry of Water Resources, Wuhan 430010)

Abstract: The Yangtze River serves as a vital foundation for the development of the Yangtze River Economic Belt and constitutes the most crucial water source for the urban agglomerations along the river. The occurrence of extreme low water levels in the middle and lower reaches of the Yangtze River in 2022 had a significant impact on the water supply security of the cities along the river, thereby exposing the substantial threat faced by water intake projects along the river during periods of low water level. Building upon existing research findings and considering the background of the continuous construction of key controlled reservoirs in upstream trunk and tributaries and the increased frequency of extreme drought disasters, this paper elucidates the future trends of drought conditions in the middle and lower reaches of the Yangtze River from the perspectives of reservoir flood storage and replenishment scheduling, dry river channel cutting, and the impact of drought weather. It analyzes the impact on water intake levels, water quality assurance, and the capacity of estuarine water intake projects to counteract saltwater intrusion during declining water levels of drought periods. Furthermore, corresponding strategies and recommendations are proposed.

Keywords: middle and lower reaches of the Yangtze River; dry water conditions; water intake projects; water supply security; countermeasures

责任编辑 田亚男 修春仪