

夏军. 变化环境下长江流域滨海城市供水安全与适应性对策[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(2): 209-214. XIA J. Water security and adaptive management for coastal cities of Yangtze River basin under changing environment[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(2): 209-214. (in Chinese)

# 变化环境下长江流域滨海城市供水安全与适应性对策

夏军<sup>1,2</sup>

(1. 武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 武汉 430072; 2. 海绵城市建设水系统科学湖北省重点实验室, 武汉 430072)

**摘要:** 全球气候变化和高强度人类活动影响导致长江流域水循环变化及相关联的城市群水资源供需矛盾问题, 尤其在长江下游上海等滨海城市供水安全问题更加凸显, 这已成为长江大保护十分关注的重要问题之一。以典型滨海城市上海为例, 重点论述变化环境对长江流域的供水安全风险问题; 分析当前和未来上海城市供水极端干旱影响、长江淡水与河口咸潮互动供水窗口压力, 以及上海城市供水管理综合运用工程措施和预警预报、调度等非工程措施的挑战; 提出若干对策与建议, 包括供水安全保障的系统思维与战略规划、提升城市供水安全的系统智能化与智慧化管理水平以及完善供水安全保障的管理体系。

**关键词:** 变化环境; 滨海城市供水; 供水安全; 适应性管理; 对策建议

**中图分类号:** TV213 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0022

气候变化带来的极端水旱灾害(干旱、洪水等)、城市化快速发展带来的用水需求的增加以及水资源时空变化等不确定因素使城市供水面临的环境更加复杂, 需要应对的问题和挑战越来越多<sup>[1-3]</sup>。大量资料<sup>[4]</sup>显示, 这些问题导致我国长江流域面临一系列新问题、新任务和新挑战。上海市地处长江入海口, 长江水源在上海市原水供应中起着重要作用<sup>[5-6]</sup>, 但是近几年来作为典型滨海城市的上海, 供水备受供水安全和水质安全风险困扰<sup>[7]</sup>。上海市虽然通过构建完备的原水供应体系, 能够解决保障正常年份的供水安全, 但在气候变化和人类高强度活动的影响下, 还存在一定的供水安全压力。为了使城市供水系统适应未来发展需求, 必须确保和提高城市供水的可靠性、安全性和适应性<sup>[8-9]</sup>。

2022 年 8 月 30 日, 住建部、国家发改委和国家疾控局联合印发的《关于加强城市供水安全保障工作的通知》(建办城[2022]41号)<sup>[10]</sup>指出, “到 2025 年, 建立较为完善的城市供水全流程保障体系和基本健全的城市供水应急体系”。未来城市供水安全是城市可持续发展的关键因素。目前, 城市供水系统重点在预防风险和增强稳定性方面进行了

大量的建设, 而在供水系统的适应性方面研究工作投入较少<sup>[11-12]</sup>。研究<sup>[13-14]</sup>表明, 在变化环境下, 城市供水系统需要应对外界变化的不确定性、复杂性与相互依赖性增大, 所面临的不可预测风险也会越来越多。面对未来变化环境下城市供水系统呈现的水资源短缺和水质安全等一系列新的、不稳定问题, 正确认识城市供水系统与相互关联系统的相互作用, 探讨城市供水系统应对变化环境的适应性对策, 对推动城市供水可持续发展有重要的意义。因此, 本文以典型滨海城市上海为例, 分析供水安全存在的风险及管理挑战, 提出滨海城市供水系统适应性水管理的对策。

## 1 全球变化与上海市供水安全的风险

全球变化主要是指全球环境(大气环境、水环境、生态环境、地理环境等)的变化, 其中, 既有全球气候变化部分, 也包括日益凸显的全球土地利用覆被(LUCC)的变化。它将带来水资源和自然灾害等多方面的影响, 给人类生存带来诸多风险<sup>[15]</sup>。根据联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)

收稿日期: 2023-12-28 修回日期: 2024-03-08 网络出版时间: 2024-04-11

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240409.1333.002>

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(41890823); 中国科学院学部咨询评议重点项目(2022-ZW09-B-022); 中国科学院战略性先导科技专项项目(XD23040304)

作者简介: 夏军(1954—), 男, 湖北广水人, 教授, 中国科学院院士, 长期从事水文学及水资源研究。E-mail: xiajun666@whu.edu.cn

第六次评估报告(AR6)《气候变化 2021: 自然科学基础》<sup>[16]</sup>, 全球气候变化范围广泛、快速并不断加剧, 这是数千年来前所未有的。其中, 最为显著的表征是 2006—2015 年人类活动已使世界变暖可能达到 1.5 °C, 亚洲地区 2011—2020 年是 1850 年以来最暖的 10 年<sup>[17]</sup>。2022 年 12 月世界气象组织(WMO)发布首份《全球水资源状况报告》指出, 2021 年全球大片地区比正常情况更加干燥, 气候变化显著增加了干旱等极端水文事件频率<sup>[18]</sup>。另外, 全球气候变化可能加剧水安全风险, 对人类生存最突出影响之一就是海平面上升, 据悉 20 世纪以来全球海平面已上升了 10~20 cm<sup>[19]</sup>, 这将带来一系列的水安全问题。研究<sup>[20]</sup>表明, 全球气候变化导致了水循环加速和时间空间变异, 并使发生低可能性、高影响结果的气候和水文事件的概率越大。未来 20~30 年(2020—2040), 东部季风区水文极端事件(水旱灾害)发生的频率与强度似乎有增强的态势, 但是不确定性也在增大。资料也显示, 近年来长江流域极端降水事件的发生频率增大, 强度增强<sup>[21]</sup>。人类活动正在造成气候变化, 使得包括热浪、强降水和干旱在内的极端气候事件变得更为频繁和更强, 比如, 长江流域 2020 年发生普遍性大洪水<sup>[22]</sup>, 但又在 2022 年发生了极端干旱<sup>[23]</sup>。供水安全是水安全之首, 也是最基础的水安全保障问题。然而未来气候变化导致全国水资源配置的不确定性, 将会深入影响到长江流域, 特别是对长江口水源地供水安全必然带来巨大压力。

由于长江河口是径流和潮流交汇地带, 咸潮入侵是一种自然污染现象。但变化环境下的气候变异会导致极端咸潮事件, 对上海市长江水源地的原水供应安全造成威胁, 甚至可能加剧城市供水安全的潜在风险。上海及长三角经济带是长江经济带的龙头, 是我国典型滨海城市, 经济高度发达的同时也十分注重城市的供水安全。目前上海全部实现由水库集中取水, 形成了“两江并举、多源互补”的水库型水源地格局。现有四大饮用水水源地, 即长江陈行、青草沙、东风西沙、黄浦江上游金泽四大水库, 其中 50% 以上来自长兴岛上的青草沙水库, 可保证咸潮期连续 68 天不取水情况下正常供水。通过提前蓄水、利用 2 次咸潮间隙取水、仅利用库容这 3 种方式可充分地利用青草沙水库的库容来应对咸潮入侵导致取水口临时关闭的供水严峻挑战。而且随着青草沙水库等水库的建成, 上海初步实现了四大水源 1500 万 m<sup>3</sup>/d 的原水规模。通过青草沙、

陈行、金泽三大上海原水系统完全可以实现动态切换, 互为支援, 以此来保障城市巨大的原水水量需求。但 2022 年 8 月以来长江流域持续干旱, 出现汛期反枯异常情况, 长江来水量突破历史同期低值, 为咸潮入侵长江口创造了条件, 导致上海城市供水压力空前紧张<sup>[24]</sup>。由此可见, 全球气候变化对滨海城市供水安全的影响还是很明显的。因此, 本文以上海原水供应为研究对象, 研究分析上海供水安全存在的风险。

### 1.1 原水供水安全的风险

上海市位于长江入海口, 咸潮现象在河海交界处十分普遍, 每年 10 月至翌年 3 月, 常发生不同程度咸潮现象。长江口入流的淡水和咸潮入侵的作用是目前和未来影响上海市长江口水源地供水能力的主要制约因子。随着咸潮入侵增强, 陈行、青草沙和东风西沙水库等上海市长江口水源地取水口均受到咸水入侵影响, 不可取水天数增加, 供水能力降低, 水资源供需矛盾必然加剧。大量资料也表明, 随着变化环境下全球气候变异加剧, 上海咸水倒灌的“咸潮”也会发生在夏季<sup>[25]</sup>。例如, 2006 年 8 月的夏秋季汛期上海就出现了咸潮, 入侵时间提前 3 个月, 而且入侵次数增多, 当年 8 月至次年 5 月共发生了 15 次强劲的咸潮入侵, 陈行水库持续 8 天氯化物超标, 导致青草沙水库等水源地无法取到足够的长江淡水, 严重干扰了水库的正常供水。

另外, 变化环境下长江流域干旱发生的频率和强度有不断增加态势。由图 1 可知, 近几十年长江典型极端干旱年及其灾害越发严重。其中比较典型案例是, 2022 年长江全流域出现特大干旱, 长江下游大通流量站出现严重干旱, 枯水重现期最严重超过了 100 a 一遇。又由于海水入侵, 直接导致上海等城市的多个水源地的最低蓄水需求都不能得到保障。而且可预见上海供水可能会面对 2022 年长江特大型干旱的频次和强度增多局面。

由此可见, 青草沙水库等原水系统建成运行已具备了上海每天原水的保障能力, 但变化环境下, 尤其突发性组合灾害影响下, 仍存在突出的不确定性与风险。特别是在长江特大型干旱的频次和强度增多, 以及上海水源地夏季发生“咸潮”概率增大的组合作用和影响下, 长江流域河口海岸地区特别是上海市的供水安全压力进一步加大。

### 1.2 原水水质安全的风险

上海市水资源总量为 599.21 亿 m<sup>3</sup>, 其中地表水

总量 593.50 亿  $m^3$ ，地表水中，当地自产水量仅为 25.57 亿  $m^3$ ，占地表水总量的 4.3%，绝大部分为长江和太湖流域的过境水资源(客水)<sup>[26]</sup>。而且从地理位置来看，上海处于长江流域和太湖流域尾间，易受上游径流和排污等不确定不稳定因素影响，原水水质复杂风险较大。长江口水质目前氮、磷含量偏高，青草沙水库存在富营养化并产生蓝藻水华的可能<sup>[27]</sup>。这是因为青草沙水源地水质主要取决于上游徐六泾来水。徐六泾水质若基于现状下降一级，

将导致青草沙水源地水质恶化，包含氨氮和总磷含量在内的重要水质评价指数，将分别比现状提高 22% 和 20%<sup>[28]</sup>。相关研究<sup>[29]</sup> 也表明：青草沙水库在个别时段，已遭受水体富营养化的威胁。通过 2009 年 4 月—12 月对青草沙水库水质进行监测，当年 5 月 18 日水质甚至低至劣 V 类。如果上海市和江苏省在未来无法有效遏制长江口水污染，那么青草沙水库的实际使用寿命将缩短至 10~20 a。

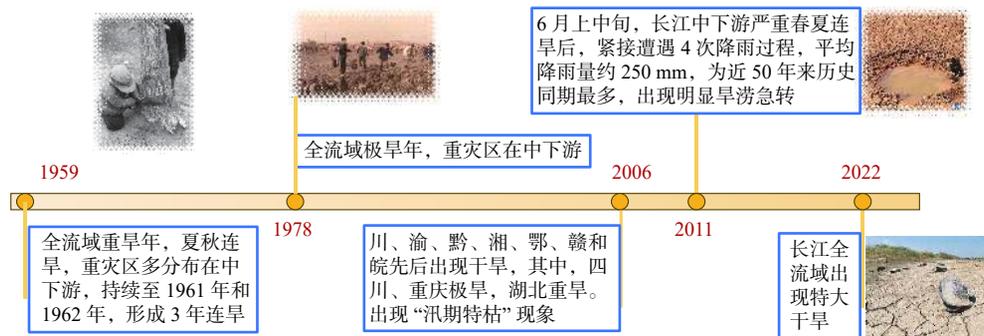


图 1 长江流域干旱事件统计

Fig. 1 Drought events in the Yangtze River basin

## 2 主要挑战与适应性管理问题

上海市水源地和原水系统所需要解决的两大核心关键是：如何保障供水安全？如何稳定原水水质？这将是变化环境下上海市供水安全保障的重大需求和关键的科学技术问题。而且从长远来看，未来变化环境下受极端天气影响，上海市原水系统仍存在一些潜在的风险和供水安全的压力。这就需要通过适应性水管理来缓解上海市原水系统的供水压力。目前长江流域已经综合运用工程措施、预警预报和调度等非工程措施来提高城市供水适应性管理能力，在抗御气象干旱能力方面发挥了巨大的作用，但面对诸如 2022 年长江极端的气象干旱，长江中下游尤其江西鄱阳湖和湖南洞庭湖的两湖地区和上海市河口区域仍面临供水安全的风险。因此，应对未来变化环境下的极端灾害，上海市供水的适应性管理仍然面临着诸多挑战。

### 2.1 变化环境下区域水环境与水资源利用的模式与制度

2022 年入夏以来，受长江流域干旱影响，上海市长江口水源地遭受咸潮入侵，其中青草沙、陈行和东风西沙水库不宜取水天数分别高达 98 d、26 d 和 28 d。这是由于长江流域出现罕见的“汛期反枯”现象，径流量显著偏少，导致了长江口咸潮入侵发

生时间早、持续时间长、入侵程度严重<sup>[30]</sup>。在原水系统水质遭遇咸潮入侵的影响下，虽然最后通过水工程群压咸补淡调度等措施，减轻了长江口咸潮影响，基本缓解了上海市供水紧张的局面，但暴露出上海市在区域水环境与水资源利用的协调上存在水安全的风险问题。

目前上海市供水安全保障与适应性管理能力还需进一步提升，特别是在应对变化环境极端气候所带来的水旱灾害方面。事实上，前期已经具有这方面的探索工作，比如探明和提升长江流域与河口水安全的统筹协调的机制，包括通过三峡水库群调度，加大长江下游大通站的径流量等。面对 2022 年长江流域极旱，就适时通过三峡水库群的调度，加强河口上海地区压咸补淡的工程措施，提升上海供水安全保障能力。但如果未来再次遭遇比 2022 年长江干旱更加严重的灾害，再叠加可能发生的突发性水质污染事件，区域发展已经不足以解决问题，这就需要以长江全流域系统性思维来提升上海供水安全保障能力。

### 2.2 变化环境下淡水水资源的智能化与智慧化综合利用

新一轮《上海市城市总体规划(2016—2040)》明确提出了“提高长江流域和太湖流域原水供应保障能力”的要求，上海的原水系统需要未来显著发

展和提升,以确保上海 2 500 万市民的安全用水需求<sup>[23]</sup>。但随着经济社会发展和城市人口的不断增长,上海未来需水量必然显著增加。一旦出现现有原水系统供水不足,需求长远规划解决缺额的供水安全保障问题。

另外,变化环境下全球气候变异加剧了长江水旱灾害和“咸潮”入侵遭遇风险。据 IPCC AR5<sup>[31]</sup>中的未来 100 年全球绝对海平面上升幅度较大,如 26~55 cm (RCP 2.6)、32~63 cm (RCP 4.5)、33~63 cm (RCP 6.0)、45~82 cm (RCP 8.5)。未来海平面的加速上升将使咸潮水上溯距离加长,沿程咸水强度增加,持续时间也会更久,尤其是以枯季大潮时期的影响最为明显。咸潮入侵的频次和强度必然增大,这就会导致青草沙等长江口水库取水水量和水质风险增大。由此可见,上海市原水系统在这“一增一减”的影响下会导致上海市供水系统应对突发性灾害的调度能力不足。

时至今日,上海市供水系统已经构建了基于四库水源地联合调度的供水安全预测预警系统平台,以此来保障极端气候灾害下城市供水安全。但该平台没有将长江全流域的监测监控以及预测预警纳入统筹考虑,存在不能实现对上海市未来水资源水平年供水安全影响预测的缺陷。另外,长江河口水质状况不仅取决于本地区水环境保护,也受控于流域上、中游来水的水质,如何协调和积极参与长江上-中-下游的“源头-湖库-岸线-城市群-河口”流域综合治理,也是长三角河口城市高质量发展需要认真思考的重要问题。

### 2.3 变化环境下城市供水能力的机制保障

变化环境下长江流域水安全成为长江大保护和经济带高质量发展面对的重大问题,上海市供水安全是其中比较典型的问题。上海市面临的供水保障能力不足问题与水资源问题密切相关,这主要由于缺乏足够多的水源支撑,导致供水保障能力不足,特别是应对极端气候灾害时的应急能力。主要表现在供水的持续性和稳定性上欠缺。

目前上海市已经建立相对先进的管理体系来保障城市日常供水,但在面对未来变化环境下极端水旱灾害,还需要进一步提升供水能力,以保障上海市原水系统的供水和水质安全。当然,提升城市供水能力是一项长期性、系统性工作,需要推进解决的问题多、牵涉面广,这就需要有一个比较健全的管理体系。但目前上海市供水管理体系要有充足的

法律法规依据,突破区域纠纷不清、部门之间工作协调不畅、综合监测及数据不对等、供水保障责任不清晰等突出问题。

## 3 上海市供水水源安全保障的对策与建议

为保障变化环境下上海市未来供水安全,应通过工程措施和非工程措施来提升应对水旱灾害适应性管理水平与对策。而且在增加应对极端水旱灾害的工程措施的基础上,更需要着重从加强系统治理规划思维、提升预警预报、水库群以及供水和用水系统的联合调度、健全管理体系保障措施等非工程措施开展深入的研究工作。

### 3.1 加强应对变化环境下上海市供水安全保障的系统思维

为探明和提升长江流域与河口水安全的统筹协调的机制(包括通过三峡水库群调度,加大长江下游大通站的径流量),以及协调和积极参与长江上-中-下游的“源头-湖库-岸线-城市群-河口”流域综合治理,保障长三角河口城市高质量发展,建议着力系统性解决上海市未来水源供水安全保障,从长江流域整个水系着眼,为上海市未来原水供应提供系统规划、管理与调控决策科技难题。建议从陆-海统筹与协调,加强以供水安全保障和绿色发展为目标的城市适应性水管理的系统建设,包括工程措施和非工程措施,提高极端环境下供水安全保障能力。

### 3.2 提升城市供水安全系统智慧化管理水平

为解决上海市供水系统应对突发性灾害调度能力不足的问题,建议加强应对长江口咸潮入侵的多部门合作,推动信息共享机制,提升综合预警预测能力。可以结合笔者团队已具有的长江模拟器研究工作<sup>[32-33]</sup>,进一步推动上海市城市智慧水网建设以及监测与管理多功能的上海城市模拟器研发。通过科技创新实现以下 3 个方面的功能:加强长江全流域的监测监控,提升河口咸潮中长期的预测能力;加强分析长江洪旱灾害对上海市原水系统影响,提升干旱预警预测能力的科技创新,增加特大干旱发生时期取水应急预案研究;注重以供水安全为特色的长江流域上、中、下游以及三峡水库和鄱阳湖等协同调度的科学预报和预案。

### 3.3 健全供水安全保障管理标准与法律法规

依托《长江保护法》,深化和拓展部门和区域联合执法工作机制,完善生态补偿的政策投入机制。并进一步完善上海市供水安全应急预案及实施能

力,发挥多部门协同减灾作用,建立水情、工情、农作物墒情、流域取水用水等综合监测及数据共享机制。实现科学评价问题,明确供水保障责任,实施高效的供水管理。最终通过对水、社会经济服务、生态服务、应对气候变化影响等多维的适应性管理,增强长江下游河口水系统的韧性与供水安全,达到维系河口人类发展和生态的可持续性。

#### 4 结论

变化环境下,上海市水源地与原水系统仍然存在潜在风险。在保障供水安全和稳定原水水质的需求下,原水系统也面临诸多的问题与挑战。因此,为提升应对变化环境下的上海市供水安全保障能力,应该加强其综合治理的系统思维与战略规划。

变化环境下气候变异对河口海岸带的影响愈来愈突显,咸潮形成机理也比较复杂。迄今为止,人类在认识其规律和预测上仍有很大不确定性,需多学科联合探索与研究,提高认知和预测能力。需要通过工程措施和预报预警、调度等的非工程措施来加强适应性水管理能力。其中智能化与智慧化综合利用措施是对应的主要技术手段,建议通过科技创新的举措来提升城市供水安全的系统智能化与智慧管理水平。

目前上海市水务局预报调度系统有很好基础和业务运行经验,建议进一步加强多部门协同创新与合作,提升应对水旱灾害包括咸潮入侵的综合管理能力,健全管理标准与法律法规来完善供水安全保障的管理体系,推动上海供水安全和流域水系统安全保障的科学发展与进步。

**致谢:**论文调研得到上海市水务局的支持和帮助,论文写作过程得到骆文广博士的帮助,一并致谢。

#### 参考文献:

[1] 夏军,朱一中.水资源安全的度量:水资源承载力的研究与挑战[J]. *自然资源学报*, 2002, 17(3): 262-269. DOI: 10.3321/j.issn:1000-3037.2002.03.002.

[2] 张翔,夏军,贾绍凤.水安全定义及其评价指数的应用[J]. *资源科学*, 2005, 27(3): 145-149. DOI: 10.3321/j.issn:1007-7588.2005.03.024.

[3] XIA J, ZHANG Y Y, XIONG L H, et al. Opportunities and challenges of the sponge city construction related to urban water issues in China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2017, 60(004): 652-658. DOI: 10.

1007/s11430-016-0111-8.

[4] 仲志余.长江大保护与水安全亟需硬核科技支撑[J]. *民主与科学*, 2020(3): 18-19. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0026.2020.03.009.

[5] 李云,周杰,范子武.长三角地区水安全保障技术集成与应用[J]. *中国环境管理*, 2017, 9(4): 115-116. DOI: 10.16868/j.cnki.1674-6252.2017.04.115.

[6] 楚文海,杨旭,肖融,等.长三角地区饮用水安全保障策略研究[J]. *中国工程科学*, 2022, 24(5): 19-25. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2022.05.003.

[7] 傅庆玲.上海城市供水安全策略研究[J]. *资源节约与环保*, 2015(6): 138-140. DOI: 10.3969/j.issn.1673-2251.2015.06.115.

[8] 李志强,魏智敏,卢双宝.关于确保城市供水安全的对策思考[J]. *南水北调与水利科技*, 2007(2): 38-39,49. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2007.02.015.

[9] 邱斌,朱洪涛,齐飞,等.长江流域典型城市水生态环境特征解析及综合整治对策[J]. *环境工程技术学报*, 2023, 13(1): 1-9. DOI: 10.12153/j.issn.1674-991X.20210710.

[10] 张志果.浅论城市供水系统高质量发展的内涵[J]. *净水技术*, 2023, 42(2): 1-4,84. DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2023.02.001.

[11] 夏军, THOMAS T, 任国玉, 等.气候变化对中国水资源影响的适应性评估与管理框架[J]. *气候变化研究进展*, 2008, 4(4): 215-219. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1719.2008.04.004.

[12] 夏军,陈俊旭,翁建武,等.气候变化背景下水资源脆弱性研究与展望[J]. *气候变化研究进展*, 2012, 8(6): 391-396. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1719.2012.06.001.

[13] XIA J. Climate change impact on water security & adaptive management in China[J]. *Water International*, 2012, 37(5): 509-610. DOI: 10.1080/02508060.2012.729176.

[14] 潘应骥,尚钊仪,杨凯.城市水资源可持续利用和管理的影响因素及其综合评价[J]. *西华大学学报(自然科学版)*, 2013, 32(3): 108-112. DOI: 10.3969/j.issn.1673-159X.2013.03.023.

[15] BIERKENS, MARC F P. Global hydrology 2015: State, trends, and directions[J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(7): 4923-4947. DOI: 10.1002/2015WR017173.

[16] 姜大膀,王晓欣.对IPCC第六次评估报告中有关干旱变化的解读[J]. *大气科学学报*, 2021, 44(5): 650-653. DOI: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20210810007.

[17] 侯威,朱晓金,姜彤. IPCC第五次评估报告对跨区域影响的新认识[J]. *气候变化研究进展*, 2014, 10(3): 191-196. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1719.2014.03.006.

[18] 世界气象组织.发布首份《全球水资源状况报告》[J]. *饮料工业*, 2022, 25(6): 48. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7871.2022.06.012.

[19] 章成,康婧.气候变化对低海拔岛屿国家土地退化的影响评析[J]. *华北电力大学学报(社会科学版)*,

- 2023(2): 43-51. DOI: 10.14092/j.cnki.cn11-3956/c.2023.02.006.
- [20] 夏军, 刘春蓁, 刘志雨, 等. 气候变化对中国东部季风区水循环及水资源影响与适应对策[J]. *自然杂志*, 2016, 38(3): 167-176. DOI: 10.3969/j.issn.0253-9608.2016.03.002.
- [21] 张建云. 气候变化对国家水安全的影响及减缓适应策略[J]. *中国水利*, 2022(15): 3-5. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2022.15.004.
- [22] 夏军, 陈进. 从防御2020年长江洪水看新时代防洪战略[J]. *中国科学. 地球科学*, 2021, 51(1): 27-34. DOI: 10.1007/s11430-020-9699-8.
- [23] 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. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20220730.
- [24] 彭丽娜, 蔡伟娜. 上海城市高速发展下的供水规划格局探讨[J]. *科技风*, 2011(15): 165-166. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7341.2011.15.152.
- [25] 卜东平. 咸潮入侵对长江上海段过境水资源利用的影响探讨[J]. *上海国土资源*, 2023, 44(3): 61-67. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1329.2023.03.010.
- [26] 谭清文. 上海市非常规水资源利用现状及对策建议[J]. *净水技术*, 2023, 42(S2): 35-40. DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2023.s2.006.
- [27] 朱宜平. 近十年来青草沙水库取水口水质变化趋势分析[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2022(3): 50-60. DOI: 10.3969/j.issn.1000-5641.2022.03.006.
- [28] 刘书敏, 赵风斌. 长江口水源地青草沙水库水质与浮游植物群落特征[J]. *环境污染与防治*, 2022, 44(10): 1330-1335. DOI: 10.15985/j.cnki.1001-3865.2022.10.011.
- [29] 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. DOI: 10.16483/j.issn.1005-9865.2022.02.013.
- [30] 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. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2023.04.002.
- [31] 徐志, 戴会超, 高希超, 等. 长江口盐水入侵对径流变异和海平面变化的响应[J]. *水利水电科技进展*, 2023, 43(3): 15-21. DOI: 10.3880/j.issn.1006-7647.2023.03.003.
- [32] 夏军, 余敦先, 史良胜, 等. 流域模拟器的研发与实践初探[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2023, 56(12): 1425-1431. DOI: 10.14188/j.1671-8844.2023-12-001.
- [33] 夏军, 占车生, 曾思栋, 等. 长江模拟器的理论方法与实践探索[J]. *水利学报*, 2022, 53(5): 505-514. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20220077.

## Water security and adaptive management for coastal cities of Yangtze River basin under changing environment

XIA Jun<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Hubei Key Laboratory of Water System Science for Sponge City Construction, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** Impacts of global climate change and the high-intensity human activities have led to changes in the water cycle in the Yangtze River basin and the contradiction between the water supply and water demand in the river basin and its associated urban agglomerations. This issue is especially highlighted in the water supply security of coastal cities, such as the Shanghai is in the lower reaches of Yangtze River, and has become one of the important issues of great concern for the protection of the Yangtze River. This study examines how changes in the environment affect the risk of water supply security in Shanghai. It specifically focuses on the Qingcaosha reservoir system. This text analyzes the impact of extreme droughts on current and future urban water supplies in Shanghai. It discusses the pressure on the water supply due to the interaction between the fresh water of the Yangtze River and the salty tides in the estuary. It also highlights the challenges faced in managing Shanghai's urban water supply, including the integrated use of engineering and non-engineering measures such as early warning, forecasting and scheduling. To improve water supply safety and security, it is recommended to implement systematic thinking and strategic planning, upgrade the level of systematic intelligence and smart management for urban water supply safety, and improve the management system for water supply safety and security.

**Key words:** changing environment; coastal city water supply; safety of water supply; adaptive management; countermeasures and suggestions