

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20220107

# 机载水质定点分层采样装置设计与实现

陈城<sup>1</sup>, 周兴伟<sup>2</sup>, 方卫华<sup>3,4</sup>, 韩继伟<sup>3,4</sup>, 杨浩东<sup>3,4</sup>

1. 南京信息工程大学 自动化学院, 江苏 南京 211800;
2. 淮安市淮阴区节约用水管理服务中心, 江苏 淮安 223001;
3. 水利部南京水利水文自动化研究所, 江苏 南京 210012;
4. 水利部水文水资源监控工程技术研究中心, 江苏 南京 210012)

**摘要:** 为了提高水质采样的自动化、精准化以及信息化水平, 针对传统水质采样(人工采样和无人船采样)的低效率、高成本、周期长以及难以到达采样地点等问题, 提出了利用无人机技术取代传统的水质采样方式, 该装置由旋翼无人机、采样装置以及标准取水容器组成, 其采样过程首先是通过拨动无人机遥控器上的开关按钮预先设置好采样深度, 然后在无人机地面站输入经纬度信息使得无人机能够飞行到指定的采样地点, 进而拨动遥控器上的一键采样按钮自动完成取水操作, 最后再一次拨动遥控器上的返航按钮使得无人机自动返航回到初始位置。该方法相比于传统方式具有安全性高、成本低等优势, 有利于推动水文仪器现代化发展。

**关键词:** 无人机技术; 水质采样装置; 取水容器

**中图分类号:** TV1; P33

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0852(2023)04-0053-04

## 0 引言

目前我国水质监测主要依靠人工监测、无人船监测和遥感卫星拍摄, 人工监测需要实地采样, 周期长, 工作效率低, 需要消耗大量人力物力; 无人船监测在水面受到严重污染或有大量漂浮物时也会使无人船受到阻碍和污染, 在水域环境上有一定的局限性; 卫星遥感拍摄分辨率比较低, 受天气影响比较严重<sup>[1-2]</sup>。此外, 不同水层的水质状况差异较大, 根据中华人民共和国国家环境保护标准《水质采样技术指导 HJ 494—2009》要求, 不同水深采样要求更不同。为此, 寻求一种方便、便捷以及高效的分层水质取样方式具有重要的现实意义<sup>[3]</sup>。

随着微电子技术和计算机技术的飞速发展, 无人机成为近些年关注的热点, 其技术研究趋于成熟, 在不同行业应用愈加广泛。其中, 多旋翼无人机相比固

定翼无人机具有可操控性、起降灵活、可靠性高以及小巧便携等优势成为行业应用热点<sup>[4]</sup>。因此, 利用旋翼无人机实现自动定点、定深的采集水样成为可能并能够较好地弥补传统手段上的缺陷, 提高水质采样的自动化、精确化以及信息化水平<sup>[5]</sup>。

现有基于无人机平台的水质采样装置主要存在定深误差大、水质采样载荷重且需要外置地面端设置采样深度甚至一些水质采样装置难以实现定深采样等功能, 因此本文采用投入式液位传感器精准定深以期实现机载水质定点分层采样<sup>[6-7]</sup>。将水质采样装置集成在无人机上实现高效的水质采样作业, 能够突破地形等限制, 此外将监控设备集成在无人机上实现基于无人机的水质监控采样一体化系统能够对水体水质和突发水污染等进行巡航监管, 严密监控各个排污口、重要断面等目标处现场状况, 为突发水污染应急响应和管理提供决策平台, 具有重要的应用价值。

收稿日期: 2022-09-23

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.1814.p.20230818.1549.002>

基金项目: 江苏省水利科技项目(2021073), 江苏省环保科研项目(2019009), 水利部南京水利水文自动化研究所自立项目(YJZS1521002)

作者简介: 陈城(1991—), 男, 江苏兴化人, 博士在读, 工程师, 主要研究方向为无人机技术在水利水文上的应用。E-mail: chencheng\_nuist@sina.com

网络首发日期: 2023-08-21

### 1 机载水质定点分层采样装置技术路线

机载水质定点分层采样装置设计目前有2种方式<sup>[8]</sup>,一种是基于采样桶采样装置设计,另一种是基于泵吸式采样装置设计,其中泵吸式难以分层采样以及在采样过程中泵吸式对水体的溶解氧、浊度以及悬浮物指标有一定影响,而且根据采样规范性《水质采样技术指导 HJ 494—2009》,用采样桶采样方式更符合规范要求,因此本文采用采样桶采样方式水体取样。

机载水质定点分层采样装置由旋翼无人机平台、采样装置以及标准取水容器组成,其中旋翼无人机是载体;采样装置用来设置取水深度和取水操作,取水容器用来作为取水装置。采样装置中包含有限位传感器、液位传感器、电机、绞盘、OLED显示屏以及LoRa数传模块等,其中,液位传感器用来检测采样的深度;OLED显示屏用来显示预先设置的采样深度;LoRa数传模块用来实时传输液位传感器的入水深度(预留接口);绞盘缠绕液位传感器的线缆控制收缩或释放,其整个系统的控制链路如图1所示,采样装置的控制硬件架构如图2所示。

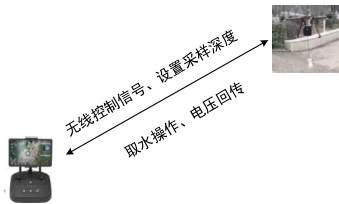


图1 控制链路  
Fig.1 Control link

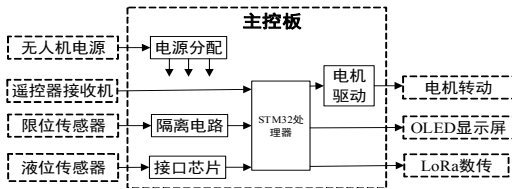


图2 硬件架构  
Fig.2 Hardware Architecture

### 2 机载水质定点分层采样装置设计分析

机载水质定点分层采样装置工作流程见图3。

(1)采样深度设置,采样装置控制器是采用基于STM32微处理器,通过GPIO口来识别遥控器接收机未使用的通道发出的PWM波,当微处理器识别出接收机通道的PWM波占空比大于一定百分比时便触发采样深度的设置操作<sup>[9]</sup>。采样深度设置占用遥控器接收机上面的两个空闲通道(一般遥控器上有10个通道,其

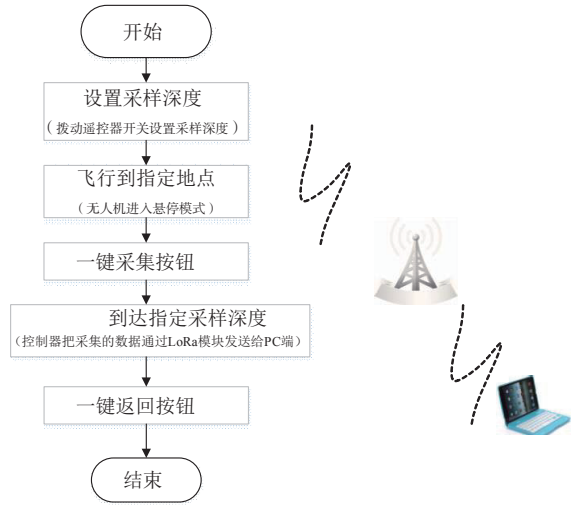


图3 机载的水质定点分层采样装置流程  
Fig.3 Flow chart of airborne point stratified sampling unit for water quality

中四个通道用来控制无人机的横滚、俯仰、偏航、升高/下降),其中一个通道用来设置采样深度的增加,另一个设置采样深度的减少,根据需求设置每个通道触发增加/减少的水位深度值,默认初始采样水位深度为50 cm,每次触发10 cm一次的水位增加和减少来设置采样深度。

(2)采样点位设置,本无人机系统采用开源飞控Pixhawk4,其配套开源地面站系统QGround Control,根据用户需求选择手动还是自主飞行指定位置,其中自主飞行指定位置需要在无人机系统配套的地面站系统里面设置航迹规划,输入需要采样点位的经纬度值来确定取样位置。

(3)一键采样设置,当旋翼无人机飞行到预先设置好的采样点位后,拨动无人机遥控器上面的开关按钮,当采样装置里面的STM32处理器捕获遥控器接收机上面的PWM波超过一定占空比时便触发电机转动,液位传感器和采样容器瓶下降至设置深度后静止2秒电机便反方向转动直至液位传感器和取样容器返回原位至此一个水层的采样过程完成。

(4)一键返航设置,采样容器瓶采完水样之后返回到原始位置时,拨动遥控器上面的返航按钮,无人机便自动进入到返航模式(无人机先飞行到一定高度之后,然后再飞行到初始位置处),至此一次完整的采样过程完成,可以再重复上述步骤完成下一次的水质采样工作。

### 3 机载水质定点分层采样装置实现

基于无人机平台的水质采样装置主要由3块部分组成<sup>[10]</sup>,第1部分是无人机平台、第2部分是采样装置以及第3部分是取水容器,其总体结构如图4所示。



图4 环境监测无人机平台

Fig.4 Environmental monitoring unmanned aerial vehicle platform

(1)无人机主体设计,本文采用的多旋翼无人机平台由开源 Pixhawk4 飞行控制器、朗宇 X5112S 无刷电机、好盈乐天 60 A 电调、1855 寸碳纤维螺旋桨、锂电池 22.2V 16 000 mah、轴距为 960 mm 轴距的机架以及云卓 T10 遥控器组成的无人机平台,其有效负载 6 kg,续航时间 40 min(空载),25 min(负载 2 kg)。

(2)采样装置,采样装置主要用来设置采样深度以及控制取水操作,借助于无人机遥控器接收机的空闲通道来完成取样深度的设置以及一键采样等功能。

(3)取水容器,取水容器为标准的取水样品瓶,有 500 ml、1 L、2 L,以及 3 L 等规格,符合国家《水和废水监测分析方法》的技术规范,该采水器系在液位传感器的一端随着液位传感器垂直放入水中,底下阀门自动打开,待采水器投入一定深度后将采水器缓缓提起,下阀门自动封闭,其如图 5 所示。



图5 水质采样器

Fig5 Water sampler

(4)无人机水体取样流程,无人机的水体取样流程主要包括:技术准备以及水体取样全过程如图 6 所示。

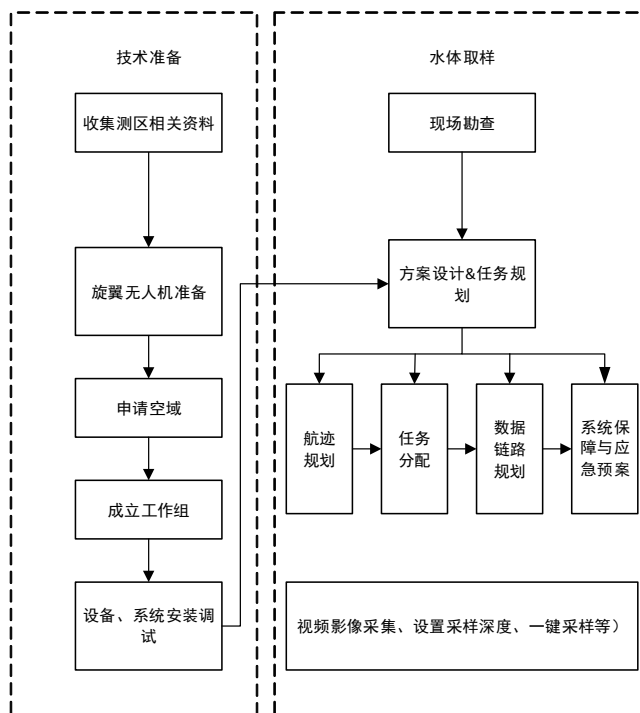


图6 无人机水样采集作业流程

Fig.6 Flow chart of unmanned aerial vehicle water sample collection operation

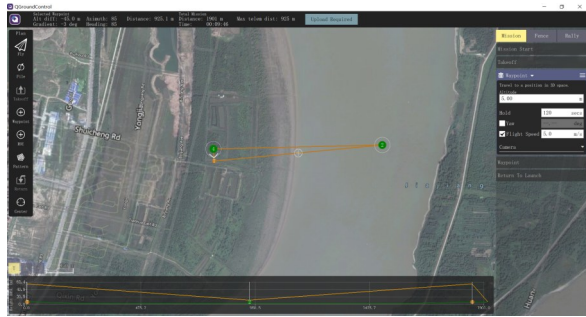
#### 4 无人机系统的稳定性分析

以江苏南京某河流为采样点,预设采样深度为 50 cm,在无人机地面站软件 QGround Control 规划航行,采样点距离岸边 100 m 左右,飞行速度为 5 m/s,悬停时间为 2 min,整个采样时间为 4 min,如图 7 所示航道规划,图 8 是 GPS 点位信息(绿色是采集点位信息,蓝色是无人机 GPS 点位信息,红色为估计误差),图 9 是采样过程中的姿态曲线图,图 9(a)显示 X 轴上的横滚角和图 9(b)显示在 Y 轴方向上的俯仰角在 0 度范围上下波动,其中,绿色线条是期望姿态变化,红色线条是无人机实际飞行过程中的姿态变化,红色线条实时趋近于绿色线条,其推导出无人机水质采样具有可行性和较高的稳定性,能够满足无人机在水环境监测中的应用。

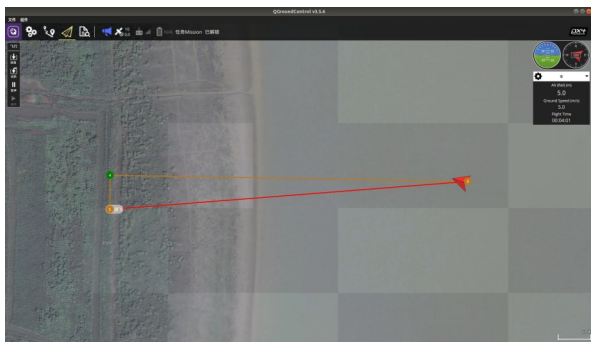
#### 5 结论与展望

本文主要针对传统水质采样装置低效率、高成本等问题,提出了采用无人机水体取样装置,利用无人机的机动、定位准确以及起降灵活等特点使无人机水体取样系统有望取代传统的人工取样方式以期水质取样变得更快、高效和智能,较好地弥补了传统手段上的缺陷,提高了水质监测的自动化、精确化、信息





(a)悬停时间



(b)飞行时间

图7 航道规划  
Fig.7 path planning

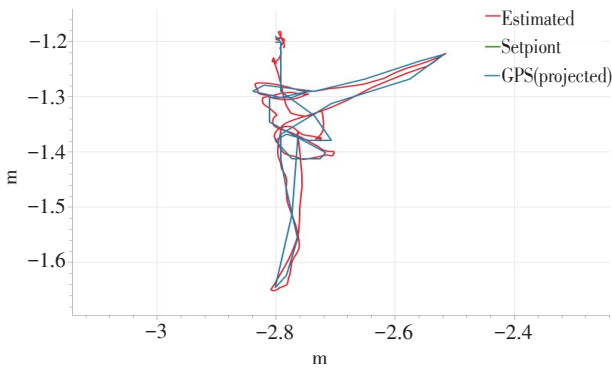


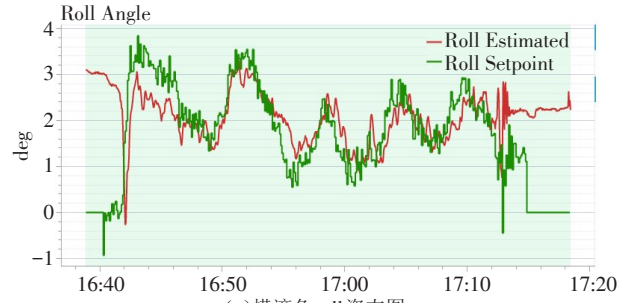
图8 GPS定位精度  
Fig.8 GPS positioning accuracy

化水平以及减少人力劳动和能源浪费从而进一步地推动水文仪器现代化进程和发展。

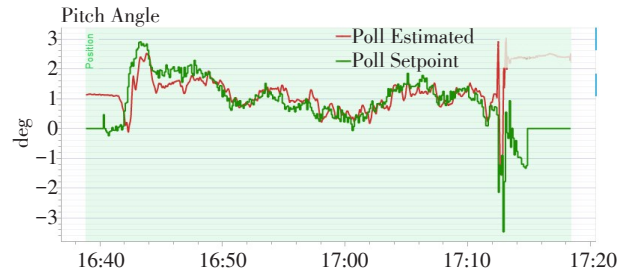
此外,无人机在有效负载范围内安装不同容量的采集瓶,从而满足用户的不同采样需求,该方式为水质采样的发展开辟了一条新的道路并为长江入河入海排污口断面提供监测手段并为突发水污染应急响应和管理提供决策支持平台。

参考文献:

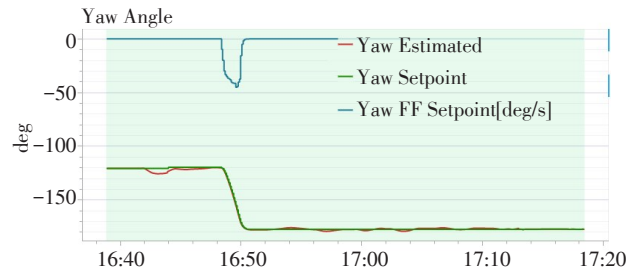
[1] 王贵作,孟祥龙,郎勋贤,等.利用无人机开展入河排污口清查的



(a)横滚角roll姿态图



(b)俯仰角pitch姿态图



(c)偏航角yaw姿态图

图9 采样过程中三个角度的姿态曲线

Fig.9 Attitude curves from three angles during sampling

思路与建议[J].水利发展研究,2018,18(2):27-33.

[2] 黄宇,陈兴海,刘业林,等.基于无人机高光谱成像技术的河湖水质参数反演[J].人民长江,2020,51(3):205-212.

[3] 林祚顶.加快推进水文现代化全面提升水文测报能力[J].水文,2021,41(3)4-7.

[4] 谢志刚,曾贺,李根,等.无人机载破冰弹消除冰坝险情的时机与方法[J].人民黄河,2021,43(2):70-78.

[5] 马文秀.试论无人机在水环境监测工作的应用前景[J].资源节约与环保,2019,(9):64.

[6] 张素杰,胡佳一,张凯茵,等.无人机在环境监测领域中的应用优势分析[J].福建电脑,2021,37(5):127-129.

[7] 水利部办公厅.水文现代化建设技术装备有关要求(办水文[2019]199号)[Z].2019.

[8] 丁铭,李旭文,姜晟,等.江苏生态环境无人机监测体系研究及初步应用[J].环境监控与预警,2019,11(5):96-102.

[9] 刘国洋,王宇,魏茂源,等.基于无人机技术的水质监测采样装置[J].电子测试,2016(8):23-24.

[10] 吴永兵.基于无人机的水质监控采样一体化系统初探[J].设备运维,2017,12-13.

(下转第63页)

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20220136

# 引汉济渭工程初期运行调水区河道生态流量优化研究

苟少杰<sup>1</sup>, 白涛<sup>1</sup>, 李晓峰<sup>2</sup>, 魏健<sup>3</sup>, 慕鹏飞<sup>4</sup>, 黎光和<sup>1</sup>

1. 西北旱区生态水利工程国家重点实验室 西安理工大学, 陕西 西安 710048;
2. 陕西省引汉济渭工程建设有限公司, 陕西 西安 710010;
3. 中国水利水电建设工程咨询西北有限公司, 陕西 西安 710100;
4. 陕西省水利电力勘测设计研究院, 陕西 西安 710001)

**摘要:**针对跨流域调水工程等强人类活动对河道生态造成严重影响的实际问题,以引汉济渭工程为研究对象,建立并求解了工程运行初期多年调节水库三河口的中长期调度模型,设定了不同生态需水下的调度方案集,量化与评估了工程初期运行对供水与生态的满足情况,并推荐了最佳的调度方案与优化的生态流量过程。研究表明:(1)在生态需水为生态基流时(设计方案),供水与生态基流保证率均满足设计要求,验证了模型与方法的合理性;(2)在生态需水为适宜生态流量时,供水与生态基流保证率分别为65%、98%,表明供水与生态两者间呈竞争关系;(3)在生态需水为修正的生态流量时,供水与生态基流保证率分别为95%、100%,在满足供水目标的同时,河道内月平均流量较设计方案提高了47%,推荐该调度方案与生态流量过程为最佳方案与最优生态流量过程。研究成果对构建生态流域、提高跨流域调水工程的综合效益具有实际意义和应用价值。

**关键词:**中长期调度;生态流量过程;多方案比较;跨流域调水;保证率

**中图分类号:**TV697.1;P33

**文献标识码:**A

**文章编号:**1000-0852(2023)04-0057-07

## 0 引言

随着人类对水的需求不断增加,水资源的供需矛盾日益突出,已成为促进国民经济发展的主要制约因素<sup>[1]</sup>。为了充分利用水资源,解决水资源时空分布不均等问题,国家大力投资建设水利设施与调水工程。但水利工程在解决水资源短缺的同时,也给河流生态环境造成了一定的影响,原本连续、动态、开放的河流在河道径流<sup>[2-5]</sup>、河岸水位<sup>[6]</sup>、生物多样性<sup>[7-10]</sup>、河道水文情势<sup>[11-12]</sup>、水质<sup>[13-14]</sup>等方面受到了一定程度的改变。为减少或缓解水利工程运行与管理对河流生态环境带来的影响,水库需要在一定时间、一定空间内下泄生态水量,然而大多

数水库调度方案只满足了河道生态基流。为保障河流的生态健康,制定合理的生态流量以缓解水利工程修建引起的生态环境效应已得到国内外学者的重点关注。

目前生态流量的计算方法大致分为水文学方法、水力学方法、生境模拟法和水文-生物分析法等<sup>[15]</sup>。为了使得到的生态流量能更好地满足河道的生态需水要求且体现河流径流年内年际变化过程,为水资源管理与规划提供帮助,有学者将以上多种方法结合使用计算河流的生态流量过程,如曹文洁<sup>[16]</sup>采用BBM法、Tennant法、生态水力学方法等计算了玉龙喀什河的不同生态流量过程;李千珣等<sup>[17]</sup>基于逐月最小生态流量法、RVA法、逐月频率法等方法计算了水布垭与隔

收稿日期:2022-04-11

网络首发地址:https://link.cnki.net/urlid/11.1814.P.20230818.1604.008

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51879213);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2019JLM-52);陕西省水利科技计划项目(2022slkj-2)

作者简介:苟少杰(1998—),男,陕西宝鸡人,硕士,研究方向为水资源系统工程。E-mail: 1220245100@qq.com

通信作者:白涛(1983—),男,陕西扶风人,教授,研究方向为水资源系统工程。E-mail: baitao@xaut.edu.cn

网络首发日期:2023-08-21

河岩水库坝址处的生态流量过程;高雪山等<sup>[18]</sup>将湿周法和生物需求法相结合计算了武江的生态流量过程。也有学者在以上方法的基础上运用新方法计算河道生态流量过程,为生态流量的计算与研究提供了新思路,包括河流最小生态流量公式法<sup>[19]</sup>、概率加权流量历时曲线法<sup>[20]</sup>、流量历时曲线移动法<sup>[21]</sup>、水文变化指标(IHA)与水情变化指标(IARI)结合法<sup>[22]</sup>、新型逐月频率计算法<sup>[23]</sup>等。上述文献在生态流量等方面进行了系统性研究,但鲜有针对跨流域调水工程生态流量过程优化的成果。鉴于此,本文以引汉济渭跨流域调水工程为研究对象,建立并求解工程运行初期三河口水库的中长期调度模型,设定不同生态需水下的调度方案集,旨在量化与评估工程初期运行对供水与生态的满足情况,推荐最佳的调度方案与优化的生态流量过程,为改善和修复调水区河道生态系统健康提供决策依据。

### 1 研究区域概况与基本资料

#### 1.1 流域与工程概况

子午河是汉江上游北岸的一级支流,发源于秦岭南麓宁陕县,河流干流全长 161 km,流域面积 3 010 km<sup>2</sup>,上游由汶水河、蒲河、椒溪河汇合而成,其流域示意图如图 1 所示。子午河流域多年平均降雨量约 866.2 mm,降雨量时空分布差异显著,多集中于夏季;多年平均径流量约 10.62 亿 m<sup>3</sup>,汛期约占全年的 83.2%,非汛期占 16.8%,年内分配不均匀<sup>[24]</sup>。

引汉济渭跨流域调水工程,简称引汉济渭工程,主要由黄金峡水利枢纽(水库)、三河口水利枢纽(水

库)、秦岭输水隧洞,输配水管网等组成。工程将汉江上游丰沛的水资源通过秦岭输水隧洞输送至渭河流域,以此缓解陕西关中地区的水资源供需矛盾,改善渭河流域生态。其中,黄金峡水利枢纽位于汉江干流,是引汉济渭工程主要调水水源地;三河口水利枢纽地处汉江支流子午河中游,是调水工程中主要的调蓄枢纽,秦岭输水隧洞是连接水源区与受水区的关键,主要由黄金峡-三河口段(黄-三段)、控制闸和越岭段三部分组成<sup>[25]</sup>。工程采用“一次立项,分期配水”的建设方案,正常运行时,由黄金峡水库与三河口水库共同承担供水任务,设计供水保证率为 95%;初期运行时,由三河口水库单独向关中地区年供水 5 亿 m<sup>3</sup>,黄金峡水库不参与供水,设计供水保证率亦为 95%<sup>[26]</sup>;根据设计报告,三河口水库采用直径 800 mm 旁通管、引水渠和运行期生态放水管泄放生态流量,若下泄流量小于生态基流 2.71 m<sup>3</sup>/s,则认为生态流量不满足要求。引汉济渭工程的输配水分布示意图与水源区调度节点见图 1~2。

截至 2022 年 4 月,三河口水库已下闸蓄水,黄金峡水库仍在建设中,秦岭输水隧洞已经贯通。鉴于此,迫切需要开展工程初期运行水库调度与生态流量优化研究。

#### 1.2 基本资料

本文收集到三河口水库坝址处 1955 年 7 月—2010 年 6 月共 55 年的月径流资料以及三河口水库的设计参数资料。长系列径流过程如图 3 所示,水库设计参数如表 1 所示。

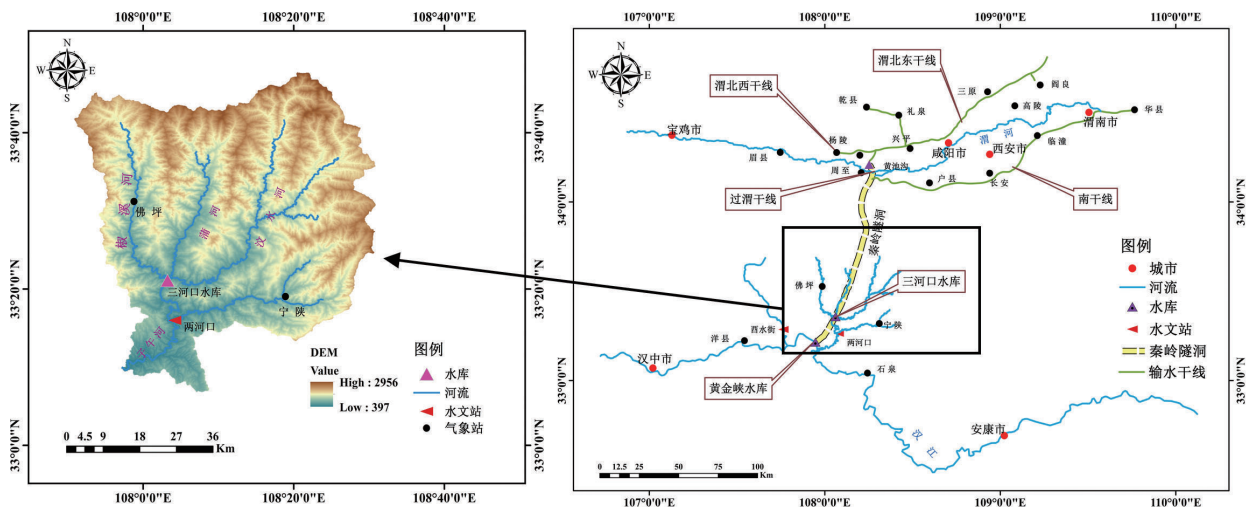


图 1 子午河流域图与引汉济渭工程输配水分布示意图  
Fig.1 The distribution diagram of Ziwu River Basin and Hanjiang-to-Weihe Diversion Project



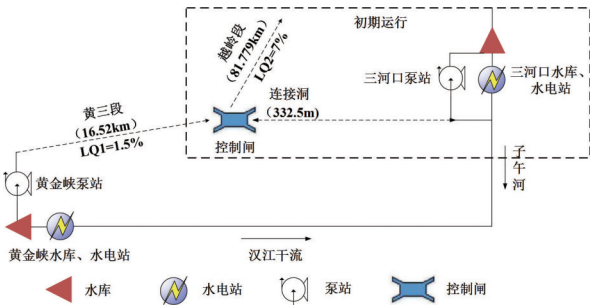


图2 水源区调度节点  
Fig.2 Dispatching node diagram of water source area

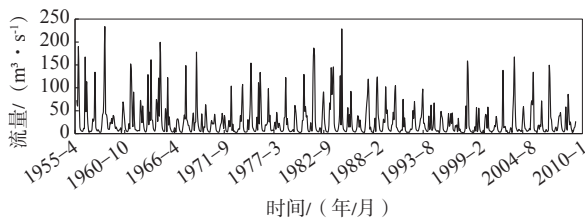


图3 长系列径流过程  
Fig.3 Long series runoff process

表1 三河口水库设计参数

水库	总库容/亿m³	调节库容/亿m³	正常蓄水位/m	汛限水位/m	死水位/m	设计供水流量/(m³·s⁻¹)
三河口(多年调节)	7.10	6.49	643	642	558	70

由三河口水库坝址处长系列径流资料可知,每年的夏季入库径流较多,冬季较少,径流变化较大,年际、年内流量分布不均,年内丰水期发生洪水,枯水期出现干旱的概率较大。

## 2 三河口水库调度模型建立与求解

### 2.1 模型建立

以水库出库水量目标(供水与生态目标)为调度函数,以1955年7月—2010年6月共55年为调度期,以月为计算时段,考虑水量平衡、水位、库容等约束条件,建立三河口水库模拟调度模型。目标函数为:

$$W = \sum_{i=1}^n Q_{ck} t_i \quad (1)$$

$$Q_{ck} = Q_{st} + Q_g \quad (2)$$

式中:  $W$  为水库出库水量(亿  $m^3$ );  $Q_{ck}$  为水库出库流量( $m^3/s$ );  $Q_{st}$  为河道生态需水流量( $m^3/s$ );  $Q_g$  表示水库供水流量( $m^3/s$ );  $t$  为时间( $s$ )。

约束条件包括:水量平衡约束条件,库容约束条

件,水位约束条件,输水流量约束条件,非负约束条件,分别见式(3)~(7)。

$$V_{i+1} = V + (Q_i - q_i) \times \Delta t \quad (3)$$

式中:  $V_{i+1}$ 、 $V_i$  分别表示水库时段  $t+1$  的末库容与时段  $t$  的末库容(亿  $m^3$ );  $Q_i$ 、 $q_i$  表示水库  $t$  时段末的入库流量和下泄流量( $m^3/s$ )。

$$V_{\min}(t) \leq V_t \leq V_{\max}(t) \quad (4)$$

式中:  $V_t$ 、 $V_{\min}(t)$ 、 $V_{\max}(t)$  分别表示水库  $t$  时段的库容、最小库容和最大库容(亿  $m^3$ )。

$$Z_{\min}(t) \leq Z_t \leq Z_{\max}(t) \quad (5)$$

式中:  $Z_t$ 、 $Z_{\min}(t)$ 、 $Z_{\max}(t)$  分别表示水库  $t$  时段末的水位、水库的最低限制水位(死水位)和最高限制水位( $m$ )。

$$Q_{\min}(t) \leq Q_t \leq Q_{\max}(t) \quad (6)$$

式中:  $Q_t$ 、 $Q_{\min}(t)$ 、 $Q_{\max}(t)$  分别表示水库  $t$  时段的输水流量、最小和最大输水流量( $m^3/s$ )。

$$Q_t, V_t, Z_t \geq 0 \quad (7)$$

根据目标函数与约束条件,设置边界条件:(1)水位约束:非汛期:558~643 m,汛期:558~642 m;(2)水库起调水位为600 m,对应库容1.86亿  $m^3$ ;(3)设计输水流量限制:最大输水流量70  $m^3/s$ 。

### 2.2 模型求解

上述模型采取自迭代模拟算法进行求解<sup>[25]</sup>,遵循生态优先原则,算法的运行框图如图4所示。

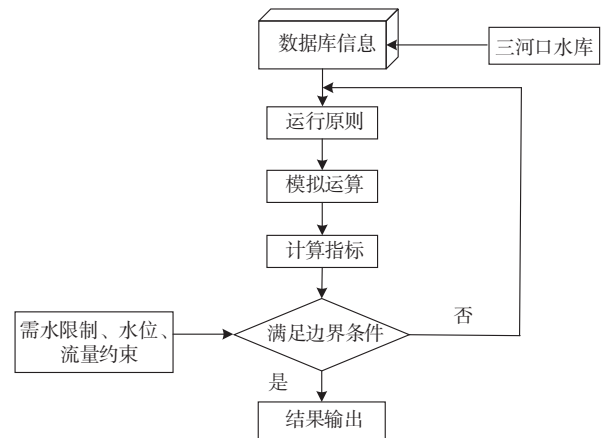


图4 自迭代模拟算法  
Fig.4 Self-iterative simulation algorithm

### 2.3 方案设置

根据三河口水库的设计资料,设定不同生态流量作为三河口水库下游河道生态需水量,按照生态优先原则,拟定不同的调度方案:

(1)方案1(设计方案):选取工程设计规定的生态基流2.71  $m^3/s$ 作为河道生态需水流量<sup>[26]</sup>。

(2)方案2:采用逐月频率法计算适宜生态流量<sup>[23]</sup>,作为河道生态需水流量。

(3)方案3:采取人机对话算法<sup>[27]</sup>,设定动态系数 $\alpha$ ,在工程规定的生态基流与适宜生态流量之间计算修正的动态生态流量过程,作为河道生态需水流量<sup>[28]</sup>,计算方法如下。

$$\text{Modified}(t) = \text{Min}(t) + \alpha(t) \cdot [\text{Suit}(i) - \text{Min}(t)] \quad (8)$$

$$0 \leq \alpha(t) \leq 1, \quad t = 1, 2, \dots, 12$$

式中: $\text{Modified}(t)$ 、 $\text{Min}(t)$ 、 $\text{Suit}(i)$ 分别表示第 $t$ 月修正的生态流量、第 $t$ 月最小生态基流、第 $t$ 月适宜生态流量, $\text{m}^3/\text{s}$ 。如图5为三种调度方案的生态流量过程。

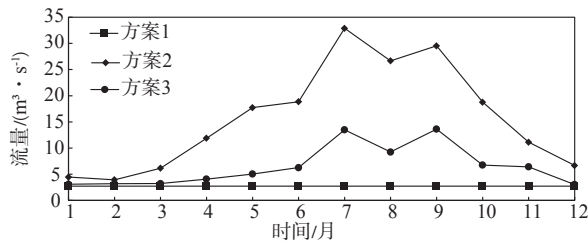


图5 子午河流域的生态流量过程  
Fig.5 Ecological flow process in Ziwu River basin

### 3 实例与讨论

#### 3.1 多年调节水库水位变化过程

图6(a~c)分别为方案1~3水库月末水位的变化过程。

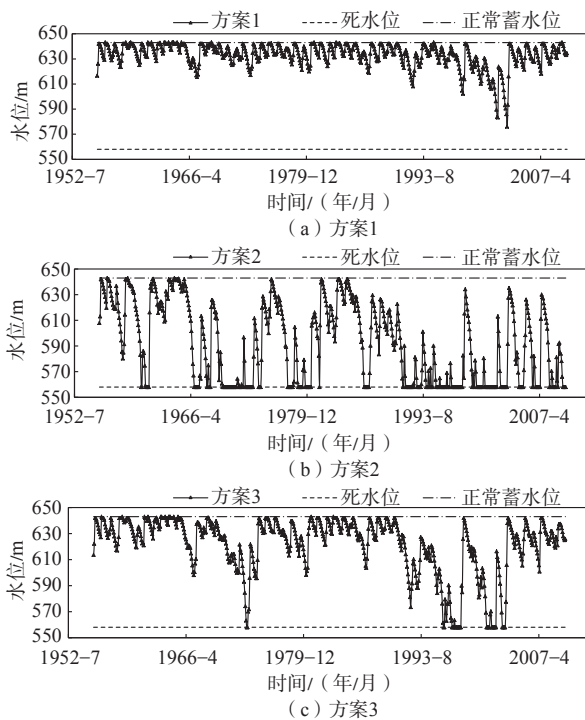


图6 三河口水库末水位变化过程

Fig.6 Change process of final water level in Sanhekou Reservoir

方案1水库调度期末水位为634.5 m,最高水位为643.0 m,最低水位为576.0 m。水库水位的变化受入库径流的影响,汛期(7~10月)水位上升,非汛期(11~3月)水位下降。水库调度后水位上升,蓄水量增加,水位处于576.0~643.0 m之间,调度期内库空率为0,库满率为18%,且有0.47亿 $\text{m}^3$ 的库容未被利用,因此,水库还有一定的调节潜力。

方案2水库调度期末水位为558.0 m,最高水位为643.0 m,最低水位为558 m。水库调度后水位下降、蓄水量减少。方案2河道生态需水量较大,水库水位变幅较方案1大,水库调节能力增强,且在调度过程中出现了缺水,调度期内库空率为35%,库满率为3%。

方案3水库调度期末水位为625.9 m,最高水位为643.0 m,最低水位为558 m。水库调度后水位上升、蓄水量增加。调度期内库空率为5%,库满率为12%。

#### 3.2 生态目标

工程在不同方案下河道内生态水量变化过程与生态基流的满足情况如图7。可知方案1水库在调度过程中,每月的生态流量均不低于 $2.71 \text{ m}^3/\text{s}$ ,多年月平均生态流量为 $5.66 \text{ m}^3/\text{s}$ ,生态基流保证率为100%;方案2河道内总生态水量远高于方案1,多年月平均生态流量为 $15.17 \text{ m}^3/\text{s}$ ,生态基流保证率为98%;方案3河道内总生态水量居于方案1与方案2之间,多年月平均生态流量为 $8.34 \text{ m}^3/\text{s}$ ,生态基流保证率为100%。

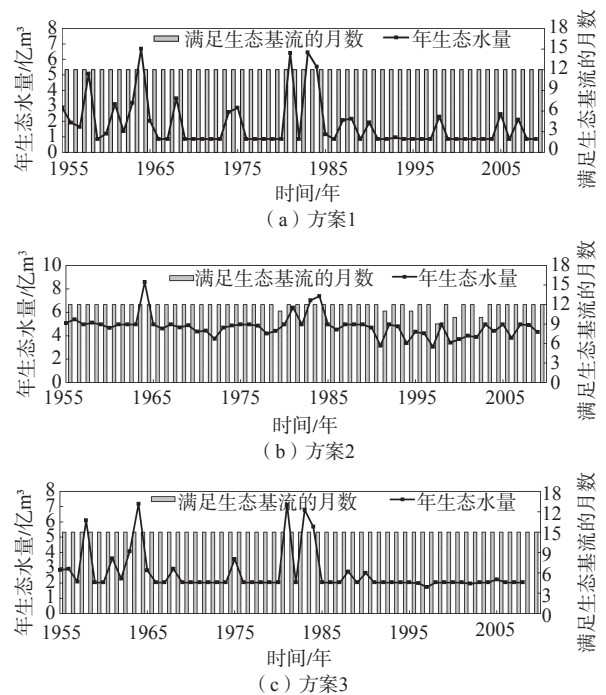


图7 三河口水库下游河道生态水量变化过程

Fig.7 Change process of ecological water quantity in lower reaches of Sanhekou Reservoir



### 3.3 供水目标

三种方案的供水过程及供水保证率如图8所示。可知按照工程规划,三河口水库每年需要满足5亿m<sup>3</sup>的供水要求,水库按月尺度进行调度,每月的供水流量为15.87m<sup>3</sup>/s。方案1水库总供水量为372.57亿m<sup>3</sup>,供水保证率为100%;方案2水库总供水量为212.77亿m<sup>3</sup>,总缺水量为62.23亿m<sup>3</sup>,年平均缺水1.13亿m<sup>3</sup>,供水保证率为65%;方案3水库总供水量为327.08亿m<sup>3</sup>,年最小供水量为1.50亿m<sup>3</sup>,供水保证率为95%。

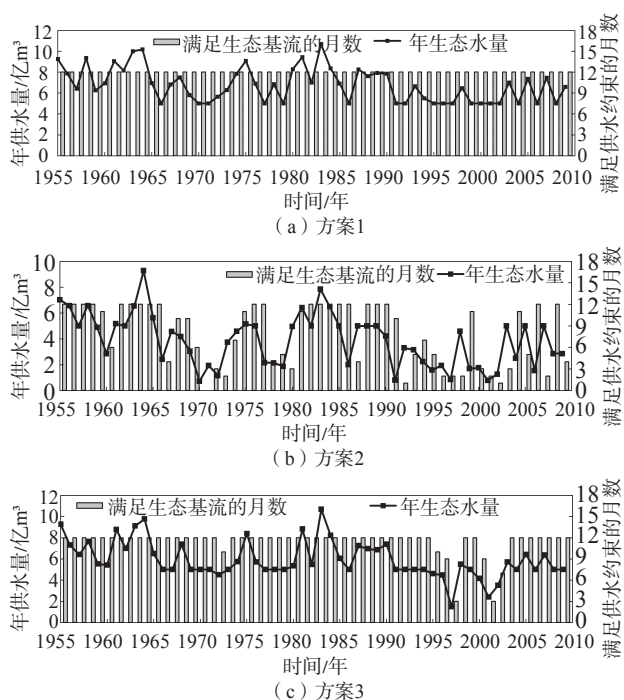


图8 供水量变化过程  
Fig.8 Change process of water supply

### 3.4 方案对比分析

三种方案的关键指标列入表2。由三种方案的结果对比分析可知:

(1)经调度后方案1~3水库的末库容分别为5.42亿m<sup>3</sup>、0.21亿m<sup>3</sup>、4.34亿m<sup>3</sup>,通过计算,三种方案均满足水量平衡原理,验证了模型的合理性。

(2)方案1的生态基流保证率与供水保证率均为100%,说明该方案尚有进一步优化的空间;方案2的生态基流保证率与供水保证率分别为98%、65%,供水与生态均遭到破坏;方案3的生态基流保证率与供水保证率分别为100%、95%,满足工程设计供水保证率与生态要求。

(3)供水目标与生态目标呈竞争关系,即生态需水越大,供水量及供水保证率越低。

(4)方案2生态水量最大,河道内生态流量过程最接近天然径流过程,除天然来水小于生态基流2.71m<sup>3</sup>/s的特枯月份外,其余时段生态流量均满足生态基流,但方案2的供水量低于工程设计供水量;方案1与方案3在满足生态基流的前提下,均达到了供水要求,且方案3的河道内生态水量较方案1增加了46.57亿m<sup>3</sup>,月平均流量提高了47%,在满足供水要求的前提下,大幅增加了下游生态水量,将跨流域调水对河道内生态的影响降至最低,推荐方案3为最佳调度方案。

(5)方案1中生态基流过程与建库前天然流量相比差距较大,没有体现年内不同时期的变化,也没有体现年际间的丰枯特征,不利于河道内生态健康的维持与保护;方案2中适宜生态流量过程使河道内水量充沛,但不能满足工程的供水目标,且在枯水期有断流现象;方案3中修正的生态流量过程能体现河道年内不同时期流量的变化与年际间的丰枯特征,在工程运行时可为权衡供水与生态目标之间的博弈关系提供技术指导,为维持引汉济渭工程调水区-子午河流域的河道生态健康提供决策依据。本文推荐方案3中修正的生态流量过程为最优的生态流量过程。

## 4 结论与展望

(1)模型计算结果满足年供水5亿m<sup>3</sup>、生态流量为2.71m<sup>3</sup>/s的设计要求,验证了模型建立与求解的合理

表2 三种方案的指标对比

Table2 Comparison of indicators in the three schemes

方案	总入库水量/亿m <sup>3</sup>	总出库水量/亿m <sup>3</sup>	蓄水量/亿m <sup>3</sup>	总生态水量/亿m <sup>3</sup>	总供水量/平均供水量/亿m <sup>3</sup>	生态基流保证率/%	供水保证率/%
方案1	474.17	470.61	3.56	98.04	372.57/6.77	100	100
方案2	474.17	475.82	-1.65	263.05	212.77/3.87	98	65
方案3	474.17	471.69	2.48	144.61	327.08/5.95	100	95

性和可靠性。

(2)三河口水库下游生态水量增加时,水库的供水量将减少,供水保证率降低,表明生态与供水目标之间呈现相互竞争的关系。

(3)通过多方案比较优选,方案3的调度方案能在满足供水目标的同时,总生态水量较设计方案有所提高,将跨流域调水对河道内生态的影响降至最低,推荐方案3为最佳调度方案。

(4)修正的生态流量过程能够体现河道内不同时期的流量变化情况与丰枯特征,且经过水库调度后,河道内月平均流量较设计方案提高了47%,推荐修正的生态流量过程为最优的生态流量过程。

本文仅开展了引汉济渭工程初期运行的调度研究,下一步可开展引汉济渭工程正式运行期的调度研究,并结合不同气候模式与水文模型预测流域未来径流变化趋势,构建并求解未来气候模式下引汉济渭工程的多目标优化调度模型,探讨未来气候变化下对水库生态与供水的影响。

#### 参考文献:

- [1] 王双银,宋孝玉.水资源评价(第二版)[M].郑州:黄河水利出版社,2014.
- [2] Al-FARAJ F A M, SCHOLZ M. Assessment of temporal hydrologic anomalies coupled with drought impact for a transboundary river flow regime: The Diyala watershed case study [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 517: 64-73.
- [3] 张金艳.大通河流域河流水文健康评价及生态流量研究[D].西安:西北大学,2021.
- [4] 李昌文.基于改进Tennant法和敏感生态需求的河流生态需水关键技术研究[D].武汉:华中科技大学,2015.
- [5] 陈伟东.锦江水库对下游径流年内分配影响分析[J].三峡大学学报(自然科学版),2016,38(2):11-15.
- [6] 胡莎莉.水利工程建设对鄱阳湖区生态环境的影响分析[D].南昌:南昌大学,2017.
- [7] PLIGIN Y V. Long-term changes in the composition and in the quantitative indices of the development of macrozoobenthos of the Kiev reservoir [J]. *Hydrobiological Journal*, 2009, 45(1): 16-31.
- [8] 杜倩.调水前后对河流生态水质的影响探讨[J].地下水,2019,41(3):52-53.
- [9] SANTOS N C L, GARCÍA-BERTHOUE, DIAS J D, et al. Cumulative ecological effects of a Neotropical reservoir cascade across multiple assemblages [J]. *Hydrobiologia*, 2018, 819(1): 77-91.
- [10] 赵阳,牛诚祯,李雪健,等.跨流域调水背景下汉江流域洋县段的鱼类多样性及资源现状[J].生物多样性,2021, 29(3):361-372.
- [11] MéRONA B, VIGOUROUX R, TEJERINA-GARRO F L. Alteration of fish diversity downstream from Petit-Saut dam in French Guiana. Implication of ecological strategies of fish species[J]. *Hydrobiologia*, 2005, 551(1): 33-47.
- [12] 徐鑫,倪朝辉,沈子伟,等.跨流域调水工程对水源区生态环境影响及评价指标体系研究[J].生态经济,2018,34(7):174-178.
- [13] BARBOSA J E D L, SEVERIANO J D S, CAVALCANTE H, et al. Impacts of inter-basin water transfer on the water quality of receiving reservoirs in a tropical semi-arid region [J]. *Hydrobiologia*, 2021, 848: 651-673.
- [14] 杨净,王宁,陈燕.河流水电资源的梯级开发对生态环境的影响[J].水资源与水工程学报,2013,24(4):58-62.
- [15] 黄强,赵梦龙,李瑛.水库生态调度研究新进展[J].水力发电学报,2017,36(3):1-11.
- [16] 曹文洁.玉龙喀什水利枢纽工程中生态流量的研究与应用[J].水利规划与设计,2020(3):63-66.
- [17] 李千珣,郭生练,邓乐乐,等.清江最小和适宜生态流量的计算与评价[J].水文,2021,41(2):14-19.
- [18] 高雪山,关帅,刘树锋,等.基于生态保护目标的武江流域生态流量定值研究[J].水文,2020,40(5):1-6.
- [19] CASTELLETTI A, PIANOSI F, SONCINI-SESSA R. Water reservoir control under economic, social and environmental constraints[J]. *Automatica*, 2008, 44(6): 1595-1607.
- [20] 龙凡,梅亚东.基于概率加权FDC法的河流生态需水量计算[J].水文,2017,37(4):1-5,28.
- [21] BARUAH A, SARMA A K, ASCE M. Hydrological - Hydrodynamic nexus for evaluation of fish habitat suitability in the Bhogdoi river, India[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2021, 26(11).
- [22] GRECO M, ARBIA F, GIAMPIETRO R. Definition of ecological flow using IHA and IARI as an operative procedure for water management [J]. *Environments*, 2021(8).
- [23] 李捷,夏自强,马广慧,等.河流生态径流计算的逐月频率算法[J].生态学报,2007,27(7):2916-2921.
- [24] 张艳玲,邵高曦.汉江子午河流域洪水预警指标及阈值计算方法[J].陕西气象,2017(6):1-5.
- [25] 李瑛,白涛,杜小洲,等.引汉济渭跨流域复杂水库群联合调配研究[M].北京:中国水利水电出版社,2020.
- [26] 魏健.引汉济渭工程初期运行的调水区河道水文响应及生态流量研究[D].西安:西安理工大学,2020.
- [27] 黄强,晏毅,范荣生,等.黄河干流水库联合调度模拟优化模型及人机对话算法[J].水利学报,1997(4):57-62.
- [28] WU L Z, BAI T, HUANG Q. Tradeoff analysis between economic and ecological benefits of the inter basin water transfer project under changing environment and its operation rules [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 248.

**Ecological Flow Optimization in Water Diversion Area of  
Hanjiang-to-Weihe River Diversion Project during Initial Operation Period**  
GOU Shaojie<sup>1</sup>, BAI Tao<sup>1</sup>, LI Xiaofeng<sup>2</sup>, WEI Jian<sup>3</sup>, MU Pengfei<sup>4</sup>, LI Guanghe<sup>1</sup>

- (1. *State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;*  
2. *Hanjiang-to-Weihe River Valley Water Diversion Project Construction Co., Ltd, Shaanxi province, Xi'an 710010, China;*  
3. *China Northwest Water Conservancy & Hydropower Engineering Consulting Co., Ltd., Xi'an 710100, China;*  
4. *Shaanxi Water Conservancy Electric Power Reconnaissance Design Research Institute, Xi'an 710001, China*)

**Abstract:** In response to the actual problems that strong human activities such as inter-basin water transfer projects have severely affected river ecology, the medium and long-term operation model of the three estuaries of the multi-year regulating reservoir at the initial stage of the project was established and solved by taking the Hanjiang-to-Weihe River Diversion Project as the research object. A set of scenarios under different ecological water demand constraints was set, quantifying and evaluating the satisfaction of water supply and ecology in the initial operation of the project, and recommended the best scheduling scheme and optimized ecological flow process. The results show that: (1) When the ecological water demand is the ecological base flow (design scheme), the guarantee rates of water supply and ecological base flow meet the design requirements, which verifies the rationality of the model and method; (2) When the ecological water demand is the appropriate ecological flow, the guarantee rates of water supply and ecological base flow are 65% and 98% respectively, indicating that there is a competitive relationship between water supply and ecology; (3) When the ecological water demand is the modified ecological flow, the guarantee rates of water supply and ecological base flow are 95% and 100% respectively. While meeting the water supply target, the monthly average flow in the river is increased by 47% compared with the design plan, Recommends the scheme and ecological flow process as the best scheme and the optimal ecological flow process. The research results have important practical significance and application value for the construction of ecological watersheds and the improvement of the comprehensive benefits of inter-basin water transfer projects.

**Keywords:** medium and long-term operation; ecological flow process; multi-scenario comparison; inter-basin water transfer; guarantee rates

(上接第 56 页)

**Design and Implementation of Aerial Water Quality Fixed-Point Stratified Sampling Device**

CHEN Cheng<sup>1</sup>, ZHOU Xingwei<sup>2</sup>, FANG Weihua<sup>3,4</sup>, HAN Jiwei<sup>3,4</sup>, YANG Haodong<sup>3,4</sup>

- (1. *Nanjing University of Information Science and Technology School of Automation, Nanjing 211800, China;*  
2. *Huaiyin District Huai'an city water conservation management service Center, Huai'an 223001, China;*  
3. *Nanjing Automation Institute of Water Conservancy and Hydrology, Ministry of Water Resources, Nanjing 210012, China;*  
4. *Hydrology and Water Resources Engineering Research Center for Monitoring, Ministry of Water Resources, Nanjing 210012, China*)

**Abstract:** In order to improve the level of automation, precision and information of water quality monitoring this paper proposed an unmanned aerial vehicle technology to replace the traditional water quality sampling method. The device consists of unmanned aerial vehicle, hoist device and water containers. In the sampling process, the sampling depth is set to flipping the switch button on the remote control, and then the latitude and longitude are input on the ground station so that the unmanned aerial vehicle can fly to the designated sampling location. Then, the one-button sampling button on the remote control is moved, and the return button on the remote control is moved again to make the unmanned aerial vehicle return automatically. Compared with the traditional methods, this method has the advantages of high security and low cost, which can promote the development of the modernization of hydrological instrument.

**Keywords:** unmanned aerial vehicle; water quality sampling unit; water container