

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.10.008

分合可控的生态河湖系统方案研究

万 鹏, 王志华, 朱方毅, 龚 正

(中国市政工程西南设计研究总院有限公司, 四川 成都 610081)

摘 要: 针对目前国内部分已建人工湖泊存在河湖系统构建方式单一、水质不达标、水质反复恶化、重水生态轻外部制约因素调控、水质保障手段缺乏系统性等问题,从流域角度开展了分合可控的生态河湖系统方案研究,以此作为人工水生态系统构建的基础,为河湖系统规划、设计提供科学支撑。结合成都市杨柳河流域河湖系统构建与水质保障系统设计案例,探讨了特征识别、外部制约因素分析、水质目标可达性分析等,提出了可控分离的生态河湖一体设计方案,以期为国内新建河湖系统和现有河湖系统改造规划设计提供参考。

关键词: 河湖系统; 生态河湖; 水质保障

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)10-0052-06

Research on the Scheme of Separating and Combining Controllable Ecological River and Lake System

WAN Peng, WANG Zhi-hua, ZHU Fang-yi, GONG Zheng

(Southwest Municipal Engineering Design & Research Institute of China, Chengdu 610081, China)

Abstract: Currently, some of the constructed artificial lakes in China are facing challenges such as the single way of the river and lake system construction, inadequate water quality, repeated deterioration of water quality, and prioritization of water ecology over external constraint regulation, and lack of systematic means of guaranteeing water quality. Therefore, there is an urgent need to investigate controllable ecological river and lake system schemes from a watershed perspective, serving as the foundation for constructing artificial water ecosystem. This research aims to provide scientific support for the planning and design of the river and lake system. By examining the design case of the river and lake system construction and water quality assurance system for Yangliu River watershed, discussions on characteristics recognition, analysis of external factors, and assessment of water quality target attainment were facilitated. Furthermore, an integrated design scheme of ecological river and lake system which is controllably separated is proposed to provide a reference for the new river and lake system design and the existing river and lake system reconstruction planning.

Key words: river and lake system; ecological river and lake; water quality assurance

湿地湖泊除了具有净化环境、调节小气候、维护生物多样性等生态功能外^[1],还具有景观、文化、娱乐等城市社会功能^[2]。随着城市的发展,湿地湖泊作为城市的稀缺资源越来越受到人们的青睐。但是人工湖泊构建过程中存在河湖系统构建方式

单一、水质不达标、水质反复恶化、重水生态轻外部制约因素调控、水质保障手段缺乏系统性等问题^[3],导致水质恶化^[4],从而严重影响周边居民生活质量、降低城市形象品质。

如何结合当地的现有资源,梳理恢复区域的水

系统、构建分合可控的生态河湖系统以及恢复河湖生态自净功能等,是生态河湖系统设计的关键。这就需要从流域角度^[5]开展分合可控的生态河湖系统方案研究,以此作为人工水生态系统构建的基础。

1 项目概况

杨柳湖为湿地类湖泊,在成都市“双核、双轴、一区、多点”的大空间结构下,位于规划打造的两个副中心之一的杨柳湖副中心(双流区)。

湿地湖区位于杨柳河右岸,水源为杨柳河设闸壅高取水,退水排至杨柳河,为了确保进入湖区水源的水质,湖体前端设有前置湿地系统,对原水进行沉淀、过滤、初净化。设计湖体水面面积约 $44\times 10^4\text{m}^2$,湖区水深为0.5~2.5 m,水体体积约 $68\times 10^4\text{m}^3$ 。在湿地湖泊范围内,现状河道水质为地表水Ⅲ类~Ⅳ类标准。

杨柳河流域水系较发达,流域集雨面积约 320km^2 ,多年平均流量 $4.9\text{m}^3/\text{s}$,春灌正常流量 $10\text{m}^3/\text{s}$,行洪流量 $100\sim 200\text{m}^3/\text{s}$ 。汇入的主要河渠有:白河、喇叭堰一支渠、红旗一支渠、红旗二支渠、老杨柳河、杨柳槽、杨柳河四支渠等。流域范围内多为过境水,主水源为江安河,次水源为金马河—大朗堰。

杨柳河全长59.65 km,取水于江安河杨武堰,由上游至下游依次流经温江区、双流区、新建区,最终汇入金马河,其中双流段长18.15 km。

2 特征识别及设计目标

2.1 特征识别

① 构建与自然本底相协调的水系统

以人为本,以生态为本,杨柳湖湿地公园与周边地块联动建设,从规划、策划、景观层面综合考量,遵从区域自然本底,减少人为干扰,构建集水生态、水平衡、水景观、水文化于一体的综合性生态河流和湖泊。

② 湿地湖泊水质稳定达到地表水Ⅲ类标准

杨柳湖范围内河道现状水质为地表水Ⅲ类~Ⅳ类标准,建成后的湖区水质要求稳定达到地表水Ⅲ类标准。

③ 提出水系构建时序的保障措施

水生态系统的成功构建和长效运行关键在于边界条件的控制,水系构建时需要注意建设时序,

先做好边界条件控制(新开引水渠、限流闸门、控制面源和点源污染,控制进湖雨水和污水,减少外围生态压力),再蓄水做水生态。

④ 水景观与防洪功能、水生态结合

河道水系景观应结合湿地湖泊形成开合有序的水面,在满足防洪要求和亲水安全的前提下,对河岸进行合理改造,保持其自然空间层次和季相的变化。

从生态角度出发,利用景观美学原理进行优化,契合人与自然、人与环境之间的生态审美观。对整体的水生态景观进行统筹设计,形成水下森林、水下草原等清澈见底的美好水景,提升项目的整体景观性。

⑤ 人工控制演替为自然清水型湿地湖泊

采用科学生态的方式构建安全、健康的生物群落结构,完善水生态系统,从而达到生态系统的平衡,最终实现人工构建水生态系统向自然清水型湖泊的演替。

2.2 设计目标

① 河湖系统:提出适合杨柳湖的河湖系统构建方案。

② 水质指标:湖区水体COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP、DO等主要指标及其他检测指标稳定达到地表水Ⅲ类标准。

③ 水体感官指标:湖区水体清澈透亮、无异味,水体透明度 $\geq 1.2\text{m}$,或清澈见底,无蓝绿藻暴发、水体黑臭现象。

④ 水生态效果:除暴雨期外,湖区水体全年清澈透亮;水生植物保持四季常绿;水生动、植物丰富,水生态系统结构完整、功能完善、具有自净能力,且具备一定的抗污染能力,暴雨期7~10 d内恢复水体透明度。

3 外部制约因素分析

构建长期健康运行的河湖系统,需要对生态水资源、年水量平衡、年入湖污染物总量、生态补水量等外部制约因素进行分析研究。

3.1 生态水资源分析

① 双流区年内降雨分布不均匀,6月—8月降雨量较大,占全年降雨量的61%;5月—10月降雨量占全年降雨量的88%,11月—次年4月降雨量只占全年降雨量的12%,因此可充分利用湿地湖泊容积对区

域降水进行资源化调蓄利用。

② 全年蒸发量较大,每年10月—次年6月蒸发量大于降雨量,亟需雨水资源调蓄容积。

③ 双流区人均水资源量为成都市的62%,水资源量严重不足,为典型的工程型缺水,亟需结合生态修复新建蓄水设施。

④ 杨柳河流域内生态用水量较少,仅占杨柳河流域可用水资源量的2%。河道水资源利用不足,需拓展生态水资源利用途径。

3.2 年水量平衡分析

在假定湖区处于非人工控制调节且库容稳定的情况下,计算得到湖区水量平衡如表1所示。

表1 非人工控制湖区水量平衡

Tab.1 Non-manual control of the lake water balance

项目	面积/m ²	年降雨量/mm	径流系数	年蒸发量/mm	年蒸发损失量/ 10 ⁴ m ³	年渗漏损失量/ 10 ⁴ m ³	年入湖水量/ 10 ⁴ m ³	年均出湖水量/ 10 ⁴ m ³
湖区	444 689	982	1	1 020	45.36	66.87	43.67	36.53
集雨区	3 690 000	982	0.29				105.09	

注: 1.集雨区地表径流系数是综合《室外排水设计标准》中径流系数、综合径流系数和以往公园绿地综合径流系数后的取值。2.集雨区面积为双流区批复的防洪规划数据。

3.3 年入湖污染物总量分析

外部污染源主要包括上游来水、降雨、地表径流、内源污染四类。

自然条件下,根据湖区水量平衡数据,年入湖污染物总量预测结果如表2所示。

表2 入湖污染物预测

Tab.2 Forecast of pollutant into lake

项目	入湖水量/ (10 ⁴ m ³ ·a ⁻¹)	总氮TN			总磷TP		
		入湖浓度/(mg·L ⁻¹)	入湖总量/(t·a ⁻¹)	占比/%	入湖浓度/(mg·L ⁻¹)	入湖总量/(t·a ⁻¹)	占比/%
上游来水	182.5	1.50	2.74	37.6	0.30	0.55	51.9
湖区降雨	43.67	1.97	0.86	11.8	0.15	0.07	6.6
集雨区地表径流	105.09	3.07	3.23	44.4	0.38	0.40	37.7
底泥释放			0.45	6.2		0.04	3.8
总计			7.28	100		1.06	100

注: 底泥中营养物质释放量根据文献^[6]的研究结果并结合成都市双流区部分新开挖景观湖泊的检测数据而得出。

3.4 生态补水量分析

从安全角度,考虑到湖面降水量的不均匀性,湖体生态补水量只有湖体蒸发和湖体渗漏两项因素,在蒸发和渗漏合计总耗水量基础上,综合水动力、水生态需求及不可预见因素(取1.6的系数),得到1月—12月的设计补水量为3 700~6 310 m³/d,全年平均生态补水量约为5 000 m³/d。

4 水质目标可达性分析

4.1 设计水生态净化量

根据青草沙水库、滴水湖D港等项目的研究成

果,在正常的水下森林生长季节,其水生态系统净化效率约为2 800 kgN/(hm²·a),磷净化效率为400 kgP/(hm²·a)。

上海市和成都市纬度基本相近,根据《全国各省地级市光照条件分析表》得知,上海市的水平面年均光照时间为2 175 h,成都市的水平面年均光照时间为914 h,成都市的水平面年均光照时间为上海的42%,因此杨柳湖的水生态系统净化效率按照上海青草沙水库净化效率的42%计算,即:杨柳湖的水生态系统氮年均净化效率为1 176 kgN/(hm²·a),磷年均净化效率为168 kgP/(hm²·a)。

在湖区构建完善水生态系统后,其净化能力计算公式如下:

$$W=C \cdot S \cdot P \quad (1)$$

式中:W为设计水生态系统净化量,t/a;S为设计布置面积,km²;C为净化效率,kg/(hm²·a);P为净化程度,由于从人工水生态系统到稳定自然水生态的演替周期较长,故净化程度取0.3~1.0。

从水质安全角度,水生态净化程度取低值0.3,湖泊水生态系统对TN的净化能力约为15.69 t/a,即平均月净化能力约1.31 t;对TP的净化能力为2.24 t/a,即平均月净化能力约0.18 t。

4.2 设计入湖污染物总量

在实际工程中,流域内的污染物产生量是实时变化的,其与降雨量、降雨强度、下垫面等情况相关。为了保证湖区水质实时达标的基础上进行简化计算,在河湖可控分离条件下对全年各月开展污染物分析计算,结果见表3。

表3 月入湖污染物总量分析

Tab.3 Analysis of monthly pollutants into the lake

项目	月均降雨量/mm	该月降雨量占比/%	月均入湖TN量/t	月均入湖TP量/t
1月	7	0.74	0.04	0.01
2月	11.1	1.17	0.06	0.01
3月	21.5	2.27	0.12	0.02
4月	52.6	5.55	0.30	0.06
5月	84.2	8.89	0.48	0.09
6月	106.4	11.23	0.61	0.12
7月	256.3	27.06	1.47	0.28
8月	212.9	22.48	1.22	0.24
9月	132.6	14.00	0.76	0.15
10月	39.5	4.17	0.23	0.04
11月	17.2	1.82	0.10	0.02
12月	5.8	0.62	0.03	0.01
合计	947.1	100	5.42	1.05

4.3 方案可行性分析

根据表3结果,全年最高月均降雨量入湖TN、TP量均超过了水生态系统对TN和TP的平均净化能力,需要采取措施对入湖污染物进行控制。而且一年中最高日降雨量比最大月月均降雨量大,更加

需要控制入湖污染物总量。若要满足实时达标要求,还需要设置外部污染物控制措施。

综合分析,湖区水质在分离可控条件下能达到设计目标。

5 可控分离的生态河湖一体化设计

人工湖泊从水生态构建到水生态平衡需要一定时间,为保证水生态系统发挥理论自净能力前的水质可控,在水生态构建的同时需要设计外部污染源控制、水质预处理等工程措施。

5.1 河湖构建方式论证

目前,常规的河湖系统构建主要有两种设计方案:一是河湖连通方案,二是河湖分离方案。据统计分析,成都市周边已建和在建人工湖采用的是河湖分离模式。为此,从水安全、水环境、水生态、水景观和水管理角度对杨柳湖河湖连通和河湖分离方案进行了对比分析,结果见表4。可以看出,两种方案各有利弊,综合考虑水生态构建及所受外源污染与威胁众多,水生态系统的稳定性较差,汛期景观效果也较差等因素,河湖分离方案较河湖连通方案安全可控。

表4 河湖连通与河湖分离两种方案的对比分析

Tab.4 Comparative analysis of river-lake connection and river-lake separation

类型	影响因素	河湖连通方案	河湖分离方案
水安全	湖泊类型	不可控的自然湿地湖泊	典型的可控人工湿地湖泊
	调洪能力	较好	较好
水环境	沉淀底泥污染	河水挟带大量污染物进入湖泊,污染物沉积在底泥,之后底泥缓慢耗氧并向水体释放N、P等污染物,生态净化压力较大	仅有湖区沉淀底泥污染,可通过湖区水生态系统净化
	面源污染	上游河道周边有大面积的道路和居住区,大量泥沙、污染物等随着河水直接进入湖泊,对湖泊水体造成一定污染	集雨面积较小,仅考虑湖区周边,污染量少,可通过湖区水生态系统净化
	市政雨污混流污染	河道上游城市管网建设相对不完善,部分排水管线错接乱排,雨污混流,致使城市生活污水随河水入湖,降低湖泊水质	湖区周边新建雨污管网,可实现污染物的管控
	洪水期行洪	洪水期河道行洪,大量泥沙、垃圾入湖,造成水体浑浊且覆盖沉水植物叶片,水体交换量激增	不受行洪影响,湖泊水生态系统稳定
	水质效果	湖体水质受河道水质的影响,水质不稳定,变动幅度较大	湖体水质稳定,主要富营养指标可保持在地表水Ⅲ类水平
水景观	景观效果	非汛期湖泊水面大,景观效果好;汛期河道需降水位,水面分离,露出混凝土坝,景观效果较差	湖区水面积减小,但是可长效保持设计水面景观,且不受行洪影响
水生态	危害物种入侵	大量危害物种随河水进入湖泊,如野杂鱼、福寿螺、水葫芦、杂草等,交界区域管控较难	河湖分离,危害物种入侵较少,管控简易
水管理	维护管理	后期维护中河道由省厅管理,而湿地湖区由区水务局管理,双方权责不明确	河湖权责分明,同时不受建设分期影响,可较快呈现较好水质

5.2 水系统构建

杨柳河片区水系丰富,且主要渠系均汇入杨柳河,为了保证杨柳河水质,从环境容量角度,通过控

制汇入污染物总量对各汇入渠系水质和水量进行监测和调控。

为保证杨柳湖湿地水质,在红旗二支渠及三支

渠—斗渠进入杨柳湖湿地水系前设闸,控制外界进入杨柳湖湿地的水量。

5.3 分合可控的河湖系统设计

针对河湖分离方案中河湖整体性较差、湿地湖泊面积较小、功能空间一体统筹较差、沿湖视野受限等问题,并为未来河道水质提升后,预留湿地湖泊河湖一体可能性,创新性地提出近期湖区与河道分离、远期一体的生态可控河湖系统设计方法,具体见图1。

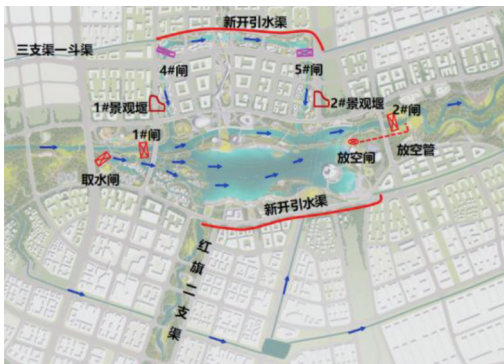


图1 杨柳河、杨柳湖水系构建示意

Fig.1 Schematic diagram of water system construction for Yangliu River and Yangliu Lake

① 新建构筑物 and 渠道

a. 近期方案

取水闸:控制进入中心湖区的水量。

1#闸为挡水闸,用于抬高河床水位,满足湿地用水和湖区用水需求。

2#闸为挡水闸,满足核心首开区水位需求,营造核心区水生态景观效果。

3#、4#闸控制三支渠—斗渠进水。

放空闸:中心湖区出现污染或其他突发情况时,通过放空管放空湖区水体。

临时新开引水渠:三支渠—斗渠、红旗二支渠上游未进行整治,渠道内水质较差。为保证核心区近期效果,建议三支渠—斗渠、红旗二支渠沿规划道路外侧新开生态排水渠,将渠道内的水引入杨柳河下游。

b. 远期方案

引水渠转为应急备用输水通道,5#闸用于远期控制红旗二支渠进水。

② 设计河湖运行工况

正常工况:关闭1#、2#闸,进行蓄水,打开取水闸进水——湿地湖泊水生态岛缺口溢流入河道。

主河道水质恶化应急工况:关闭取水闸,开启1#、2#闸,以降低河道水位。

支流水质恶化应急工况:关闭3#、4#或5#闸,支流通过新开引水渠道引流至下游河道。

③ 河湖中间连通道设计

为避免翻板闸等传统河湖分离设施在生态性和景观性方面存在的不足,采用间断生态岛形式对河湖进行连通设计。生态岛在水面以下0.5 m为整体土堤结构,水面下0.5 m至水面上0.5 m为间断缺口形式,缺口间距30~80 m,缺口宽度1~2.5 m,具体参数根据水力模型计算确定。生态岛缺口处近期采用钢化玻璃进行分隔,钢化玻璃上部种植藤蔓植物对其覆盖,使得生态岛外部呈现生态整体性。待远期河道水质改善后,取消分隔钢化玻璃,实现河流与湖泊的水量和水质自由交换,真正做到生态河湖系统的一体化。

④ 湖区外部水质保证措施

在河湖系统外部调节可控的前提下,于湿地湖泊前端单独设置前置湿地系统,以湿地良好的生态环境和多样化景观资源为基础,为动物提供栖息地的同时进一步保障入湖水水质。

四级生态湿地净化系统设计:一级净化系统采用前置塘+浸没式生物反应器+漂浮湿地,植物根系和人工载体及其附着的生物膜对水质起净化作用,通过浮叶植物、挺水植物提高水体DO浓度,改善后续单元动植物生长环境。二级净化系统采用表流湿地,依靠植物根茎的拦截作用以及根茎上生成的生物膜,降浊沉砂净化水质。三级净化系统采用强效脱氮潜流湿地,通过挺水植物、填料协同作用去除水体中的污染物,为后续稳定塘构建完整的生态链提供基础条件,并提高水中微生物数量。四级净化系统采用稳定塘,除植物本身的净化作用外,沉水植物也为微生物提供了良好的生存环境,为进入后续湿地湖泊提供生态过渡条件。

⑤ 河湖内部生态自净系统设计

湖泊和河道在自净系统构建上侧重点有所不同,湖泊侧重于前置预净化和湖区生态平衡系统的构建,河道则侧重于外部污染源的控制。生态湖区系统主要通过底质活化改良以及微生物群落、沉水植物群落、浮游动物群落、水生动物群落构建等来实现,生态河道系统主要通过水系连通、雨污分流、面源控制、内源整治、海绵城市构建、河道两岸傍河

湿地、河滩湿地恢复等来实现。

6 结语

① 对于高水质要求的湖泊,需从理论和经验双重维度保证水质常年达标,除了理论可行的内部水生态系统构建,还需要设计人为可控的外部水系统。

② 分合可控的生态河湖一体化设计方案融合了河湖连通和河湖分离两种方案的优点,对河湖分离方案中河湖整体性差、水面面积较小、功能空间一体统筹差等进行了优化,并为未来河道水质提升后预留湿地湖泊河湖一体的可能性。

③ 间断生态岛的设计是河湖连通的关键措施,既可以避免翻板闸等传统河湖分离设施在生态性和景观性方面的不足,又可以完成河流和湖泊水量和水质的交换,实现河湖系统的一体化。

参考文献:

- [1] 崔宁,于恩逸,李爽,等. 基于生态系统敏感性与生态功能重要性的高原湖泊分区保护研究——以达里湖流域为例[J]. 生态学报,2021,41(3):949-958.
CUI Ning, YU Enyi, LI Shuang, *et al.* Protection measures of plateau lake based on ecosystem sensitivity and importance of ecosystem function: the case of Lake Dalinor basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(3): 949-958 (in Chinese).
- [2] 樊贤璐,徐国宾. 基于生态—社会服务功能协调发展度的湖泊健康评价方法[J]. 湖泊科学,2018,30(5): 1225-1234.
FAN Xianlu, XU Guobin. Lake health assessment method based on the coordinated development degree of ecology and social service function [J]. *Journal of Lake Science*, 2018, 30(5): 1225-1234 (in Chinese).
- [3] 窦明,孟猛,毛豪林,等. 小型人工湖藻类变化特征及主要驱动因子研究[J]. 中国农村水利水电,2019(5):

77-81,90.

DOU Ming, MENG Meng, MAO Haolin, *et al.* Research on the variation characteristics and main driving factors of algae in small artificial lakes [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2019(5): 77-81, 90 (in Chinese).

- [4] 王丽娟,田泽斌,李莹杰,等. 洞庭湖近30年水环境演变态势及影响因素研究[J]. 环境科学研究,2020,33(5):1140-1149.

WANG Lijing, TIAN Zebin, LI Yingjie, *et al.* Trend and driving factors of water environment change in Dongting Lake in the last 30 years [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(5): 1140-1149 (in Chinese).

- [5] 万鹏,丁文静. 关于流域综合整治系统化方案编制的思考[J]. 中国给水排水,2019, 35(11):113-117.

WAN Peng, DING Wenjing. Thoughts on systematic programming of watershed comprehensive regulation [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(11): 113-117 (in Chinese).

- [6] 秦伯强,朱广伟,张路,等. 大型浅水湖泊沉积物内源营养盐释放模式及其估算方法——以太湖为例[J]. 中国科学(地球科学),2005,35(S2):33-44.

QIN Boqiang, ZHU Guangwei, ZHANG Lu, *et al.* Model and estimation of endogenous nutrient release from sediments of large shallow lakes—take Taihu Lake for example [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2005, 35(S2): 33-44 (in Chinese).

作者简介:万鹏(1986—),男,江西南昌人,硕士,高级工程师,主要从事市政给水排水、流域综合治理、综合管廊、环境工程的规划、设计与研究工作。

E-mail:434423065@qq.com

收稿日期:2022-01-10

修回日期:2022-02-25

(编辑:丁彩娟)