

DOI :10.3969/j.issn.1004-6933.2011.05.015

平原河网地区水利工程水生态环境效应评估指标构建

韩龙喜^{1,2},贾更华²,杨钟凯¹,杨磊¹,孙明园¹

(1.河海大学环境学院,江苏 南京 210098;2.水利部太湖流域管理局,上海 201100)

摘要 :以太湖流域平原河网地区为例,从河流开发与保护的流域水生态安全概念出发,基于平原河网地区水系的水文水动力、水生态环境特征,根据水利工程的开发建设及运行状况,及其对水生态环境产生的不同影响,对水利工程进行分类,分别辨析不同水利工程对水文水动力、水环境质量、水生生物、底栖生物的影响,提出水利工程水生态环境影响评价的主要评价指标,构建平原河网地区水利工程水生态环境效应评估指标体系。

关键词 :平原河网;水利工程;水文水动力;生态效应;指标体系

中图分类号 :TV213.4;X820.3 **文献标识码** :A **文章编号** :1004-6933(2011)05-0065-05

Evaluation index system of ecological environmental impact of water conservancy projects in plain river network area

HAN Long-xi^{1,2}, JIA Geng-hua², YANG Zhong-kai¹, YANG Lei¹, SUN Ming-yuan¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Taihu Basin Authority, Ministry of Water Resources, Shanghai 201100, China)

Abstract :Taking the plain river network area of the Taihu Lake Basin as an example, starting from the basin water ecological safety concept of river development and protection, and based on the hydrology and hydrodynamics; the characteristics of the water ecological environment of the water system in the plain river network area; the development, construction, and operation conditions of water conservancy projects; and the effects on the water ecological environment, the water conservancy projects were classified, and the effects of different water conservancy projects on the hydrology and hydrodynamics, water environment quality, hydrobios, and benthos were identified. The main evaluation indexes of the water ecological environmental impact assessment of the water conservancy projects were put forward. The evaluation index system of the water ecological environment of water conservancy projects in the plain river network area was established.

Key words :plain river network; water conservancy; hydrology and hydrodynamics; ecological effect; index system

水是人类生产和生活必不可少的宝贵资源,但其自然存在的状态并不完全符合人类的需要。水利工程是河流功能开发的主要手段,只有修建水利工程,才能控制水流,防止洪涝灾害,并进行水量的调节和分配,以满足人民生活和生产对水资源的需要。同时,水是自然生态系统的决定性因素,水工程是河流功能开发的主要手段,也是影响流域生态状

况的主要动因。水利工程的建设必然影响水生态系统,而如何准确评价分析水利工程对水生态环境的影响,一直是水利工程、水生态环境科研领域十分关注的热点问题。平原河网地区是我国水资源非常丰富的地区,密布的河网为社会经济的快速发展提供了宝贵资源和不懈动力^[1]。水利工程的建设将不可避免地对水

文水动力、水环境质量、水生生物、底栖生物等生境因子产生不同程度的影响,而从众多的可能影响因子中筛选出主要影响因子,是开展水利工程生态环境效应评估的前置工作,但目前学术界在该方面缺少系统、深入的研究^[2]。

我国对水利工程的生态效应研究始于 20 世纪 70 年代末,通过生态效应评估,可以确定采取防治措施的必要性以及减少负面效应的具体措施,避免生态环境的恶化。文献[3]以长江下游东部河网地区作为研究平原河网健康的典型,依据指标体系建立的原则,从河网的结构、生态环境功能和社会服务功能角度构建了包含多重层次的生态评价指标体系,所建立的指标体系并未针对水利工程的生态效应;文献[2]从河流开发与保护的流域生态安全概念出发,基于驱动力-压力-状态-影响-响应(DPSIR)的模型方法,构建了水工程规划设计的关键生态指标体系,但对于平原河网地区该指标体系缺乏针对性;文献[4]分析了河流建造大坝对其生态系统的环境影响,主要适用于山区型河流;文献[5-6]主要分析了拦河闸运行过程中可能对生态环境造成的影响,提出了具有建设性的对策和措施。综合国内外研究现状,现有研究成果缺乏对河网地区不同类型水利工程的生态影响指标体系的系统研究。笔者从流域生态安全的角度出发,辨析不同类型水利工程对水文水动力、水环境质量、水生生物、底栖生物的影响,构建符合平原河网地区水生态环境、水利工程运行特征的生态影响指标体系,对有效、有针对性地开展该类区域水利工程环境影响效应评估具有重要意义。

1 指标体系构建原则

水工程对生态系统的效应是多层次、多因素的,不同指标对生态环境压力和响应的敏感性存在显著差异,在指标体系中的重要性也不尽相同,必须关注重要的和主要的指标。选取原则有:

- a. 科学性和综合性原则 指标体系应建立在科学的基础上,指标概念必须明确,具有明确的科学内涵,能客观反映生态系统客观特征,度量不同类型水工程对水网地区水生态系统的效应,尽量量化。
- b. 完备性和代表性原则 指标体系作为一个整体,要比较全面地反映被评价区域的发展特征,既能反映环境质量状况,也能反映未来的发展特征。同时指标设置力求少而精,选取的指标应具有较高的代表性,有效反映不同水工程对生态环境的影响,能客观反映水利工程建设和水生态环境质量的关系。
- c. 独立性原则 度量水工程水生态环境质量影响的指标往往存在信息上的重叠,所以要尽量选择

那些具有相对独立性的指标,指标含义不重复。

d. 可比性和实用性原则 指标应简明、直观,与现有国家统计指标体系相衔接,易于获取,方便实用。适应地方监测力量、数据资料及技术设备,尽可能利用现有统计指标或可通过调查、监测获得的数据。

2 平原河网地区水生态环境影响因子识别

2.1 平原河网地区水生态安全

水生态安全主要表现在水量安全、水质安全、水生态环境安全和与水有关的经济安全 4 方面。水量安全是指水资源供给能够满足生产、生活、生态和生命体的需要,主要是从水资源供需和可持续利用的角度来考察的,反映的是水资源多功能特性;水质安全是针对水污染而言的,是指水资源污染的程度被控制在环境自净能力之内,经济社会发展不因水质变化导致的生态破坏和水质性缺水而受损,反映了水资源的质量特征;水生态环境安全是指人们在获得安全用水的设施和经济条件的过程中^[7],所获得的水能满足清洁生态和健康环保的要求,既满足生活和生产的需要,又使自然环境得到妥善保护的一种社会状态;与水有关的经济安全是指保障经济社会发展不因水资源及水环境问题而受损或受到威胁,反映了水资源的社会属性。根据平原河网地区水生态、水利工程基本特征及可能引起的水生态安全问题,主要从水量、水质、水生态环境 3 个方面构建境效应评估指标体系。

2.1 水利工程建设及分类

平原河网地区水利工程,就建设内容而言主要包括堤防整治工程、河道疏浚工程、枢纽调节工程、湖泊疏浚工程等。以我国典型的平原河网区域太湖流域为例,1949 年后陆续兴建了沿江河道工程(开挖、拓浚主要入江河道 14 条)、望虞河工程(开挖河道 37.6 km;长江口门节制闸 1 座,支流节制闸 13 座,套闸 12 座,船闸 1 座,水流立交工程、泵站)、太浦河枢纽工程(太浦闸等节制闸多座,河道拓浚,北窑港水利枢纽,抽水站)、环太湖大堤工程(堤防整治 282.0 km;节制闸、套闸、船闸多座)、杭嘉湖南排工程、湖西引排工程、东西苕溪防洪工程、武澄锡引排工程、杭嘉湖北排工程、黄浦江治理工程(两岸约 270 km 防洪堤)、新沟河延伸拓浚工程、苏州市东太湖综合整治工程。根据太湖流域水利工程建设内容、性质及其可能对水生态环境产生的影响,将工程内容按生态影响的不同,分为枢纽工程、河道整治工程、湖泊疏浚工程,不同类型工程内容及其生态影响特征见表 1。

2.2 水生生态属性分析及要素划分

水利工程建设是人类进行河流开发利用的主要手段,同时也对流域生态安全产生直接而深刻的影响。按内部逻辑关系分析水利工程建设对流域生态系统的影 响,水工程建设改变了河流自然循环和社会水循环两个过程,其中河流自然循环主要表现在物理形态、水文水动力、水环境质量、水生态和底栖生物生境形态。平原河网地区水工程生态效应的关键水生态指标体系从河湖物理形态、水文水动力、水环境质量、水生生物生境和底栖生物生境形态等 5 个方面进行构建。

2.2.1 河湖物理形态

水工程建设可改变河流原有的几何形态特征,如河道上修建水库、堤防将改变河流的纵向和横向连通性,影响库岸、河流岸坡的稳定性等。河流地貌属性主要包括河流特征、连通性和稳定性等要素,主要考虑河流断面尺寸(如宽度、深度、边坡等)、河底坡降、岸坡稳定性、河道人工改造的情况、河岸植被覆盖情况等,同时要考虑河网的水流连通性、鱼类洄游通道连通性等。

2.2.2 水文水动力

水工程建设可调节水资源的时间、空间分布,使汛期高峰流量减少,非汛期枯水流量增加,此外调水工程等还会引起河段流域内及不同流域间水资源的变化,水工程导致的水文过程变化是影响河流生态系统的首要因素,是河流地貌演变 的直接动力,可在不同时空尺度上影响其生态过程。水文情势的改变又会进一步引起水体水动力特征等重要水生生境因子的改变。描述水文水动力的因子主要包括水位、流速、流向、流量等,可通过平原河网地区水动力模型,采用情景分析方法,分析工程运行调度对水文水动力因子的影响。

2.2.3 水环境质量

水环境质量是自然环境中最基本的组成要素,也是流域生态安全的重要组成部分,由河湖水体、生物繁衍栖息地以及纳入水体的各种物质等组成,是流域能量和物质交换的重要载体,具有易破坏、易污染的特点。水环境质量属性一般包括水温、水质等要素,如 COD、NH₃-N、TP、TN、SS、石油类等。可通过平原河网地区水质模型,采用情景分析方法,分析工程运行调度对主要水质因子的影响。

2.2.4 水生生物生境

河流、湖泊等水体可为众多水生生物提供适合生存的环境,这些生物在河湖中觅食、繁殖形成生物群落。大量资料表明,生物群落多样性与非生物环境的空间异质性存在正相关关系,这种关系反映了

生命系统与非生命系统之间的依存与耦合关系^[7]。河流水文条件、水环境和河流地貌构成了水生生物栖息地的自然边界,其完整性是水生生物正常完成生活史的必要条件。在不同的生活史阶段,水生生物对流量、流速、水质、水深、水温等有不同 的要求和耐受程度,只有在其耐受范围内,水生生物才能正常完成生活史^[8]。

水工程改变上述生境要素,进而影响生物量和物种组成。水生生物及栖息地可通过生物多样性、水生植物特征、生态敏感区及鱼类栖息地等多要素进行表征。可通过长系列调查对比分析、类比分析、数学模型、专家咨询等方法,分析评估水利工程对水生生境的影响。

表 1 平原河网地区水利工程内容分类及其生态影响特征

工程类别	主要水生态影响要素
枢纽工程(闸、泵站)	物理形态、水文水动力、水质、水生生物生境
河道拓浚、堤防整治工程	物理形态、水文水动力、底栖生物生境
湖泊疏浚工程	水文水动力、水质、底栖生物生境

2.2.5 底栖生物生境

河道、湖泊底泥中的营养盐、重金属含量是衡量底泥质量的重要指标,生活在河底的底栖动物群落具有重要的生态学作用。水利工程特别是疏浚工程、河道整治工程可能对底栖生物生境产生影响,底栖生物生境因子主要包括底泥质量、底栖动物生物量、多样性,可通过工程前后调查对比分析、类比分析、数学模型、专家咨询等方法,分析评估水利工程对底栖生境的影响。

2.3 枢纽工程水生态环境影响因子识别

2.3.1 河湖物理形态

a. 水流连通性。闸、泵站等河道枢纽工程的挡蓄作用破坏了水系的连通性,造成水流阻隔。部分拦河闸在整个枯水期基本关闭,大大降低了河道间的水流交换,同时可能改变部分河道的流向。

b. 鱼类洄游通道连通性。闸、泵站等枢纽工程的建设阻断了河道,使得某些洄游鱼类的洄游通道被切断,无法上溯到产卵场繁殖,在枢纽工程上游孵化的鱼苗随着水流卷进水轮机,因受到强大的水压力冲击而大量死亡。拦河建筑物使河流水生生境片断化,阻隔鱼类洄游通道,阻碍上下游鱼类种质交流^[9]。根据枢纽工程在不同水文时期的运行调度情况,洄游性鱼类可能被迫改变洄游迁移线路。

2.3.2 水文水动力

枢纽工程引水、排水,增加了流域河网和连通湖泊所需的水量,而且加快了河网和湖泊水体的流速,缩短了湖泊水体的置换周期。枢纽工程的建设,使

得具有天然河流特征的水文状态发生改变,如水位流量关系的变化、河网局部水流流向的改变等。同时,河流水文情势、水动力特征的改变也是水环境质量、生态环境影响等一系列变化的主要原因^[8]。

a. 水位、流量、流速。闸、泵站可以改变河流的自然流态,具有引水排涝、调节水量时空分配的能力。在枢纽工程运行时期,通过闸、泵站的调度,河网内部、河网与外部水体水量交换的时间、空间分布特征发生较大变化,如闸、泵站引水期间,河网水量较天然无调控状态下大幅增加,具体表现在引入区水体水位、流量、流速的大幅增加,其周边河道水位、流速、流量也会较天然状况发生较大变化。同样地,泵站排水期对排涝区及周边河网水位、流量、流速产生较大影响。在非运行期,通过关闭闸门,能有效地保持闸前后的水位差,保持较小流量和流速。与此同时,由于水利枢纽工程的运行调度,河网季节性洪峰流量、急流状态丧失。同时,在枢纽工程运行调度期间,河网内水位急剧变化,改变了河网原有水流流态,并造成河网局部区域的流向发生改变。

b. 泥沙输移特征。一个水文年中的大部分时段,平原河网水流往往较为平缓,因此含沙量较小。但是对于河网引水工程,水源往往来源于河网外部(如太湖望虞河引水枢纽引水来自于长江),引水水源流速较大,含沙量大大高于河网内部水体,相对高含沙的水体引入河网后,一方面引起河网水体含沙量的显著增加,另一方面,由于流速的减小,泥沙沉淀,进一步引起河床的几何形态改变。

2.3.3 水环境质量

枢纽工程运行调度改变了河流的水文、水动力特征,相应的对水环境质量产生间接但显著的影响。

a. 好氧性有机物。枢纽工程非运行期,水流流速、流量较小,水体停留时间较长,水体对污染物的稀释作用不显著;同时,由于泵站、闸的关闭而导致水流流速减小,降低了水、气界面溶解氧交换的速率,复氧能力减弱,使得水体自净能力减弱。而在泵站、闸等枢纽工程的引水期间,河网水流流速、流量较大,水体稀释作用明显。一般情况下,引水水质好于河网内水质,河网内好氧性有机物如 COD、BOD 等浓度出现显著下降。

b. 营养盐。枢纽工程的非运行期,河网水体流速缓慢,滞留时间较长,有利于悬浮物的沉降,可使水体的浊度、色度降低,透明度增大,从而利于藻类光合作用。蓄积数月的水体,因藻类大量生长,可能导致富营养化。悬移物质沉积于水底,长期累积,不易迁移,其中含有的 TN、TP 会形成次生污染源^[9];引水期间,随着水量的增长、流速的加快,稀释作用

更为显著,根据来水的水质,河网内水体水质会得到一定程度改善,营养盐、富营养化水平也会出现下降趋势。

2.4 河道拓浚、堤防整治工程水生态环境影响因子识别

根据平原河网地区河道拓浚、堤防整治工程的特点及其对河道水生态环境的影响,分别从水文水动力、水环境质量、水生生物生境、底栖生境等 4 个属性层面筛选生态影响评价因子。

2.4.1 水文水动力

河道拓浚、堤防整治工程改变了河道的自然属性,使河流原有的流量、流速、水流结构等水文特征发生变化。如,河床床面物质的改变使原本粗糙的河床变得光滑,过水能力增大,同级别水位相应流量增大,流速也增大。河道拓浚、堤防整治工程通常还会使河宽、河道坡降等变得比较均匀,整治后的河床常用输水性能好又便于施工的梯形等单一且规则的断面形式,使得水流流速均一化,破坏了原有河道多样性的特征^[10]。但对于平原河网地区,河道众多,河道拓浚、加固工程对单一河道的水位影响微弱,因此选定流速、流量、水流结构作为河道拓浚、堤防整治工程生态效益评价的水文水动力评价因子。

2.4.2 水环境质量

河道拓浚、堤防整治工程不可避免地扰动了河道底质,原本已经达到平衡的底泥-水体的污染物交换平衡发生了改变,水体中的污染物浓度将会发生变化。由于河流水体及河滨地带的水生生物量减少,从而在一定程度上削弱了河流的自净能力,但是在流速增大的同时,自净系数也会随之加大,在一定程度上增加了河流的自净能力,水环境容量会发生一定程度的变化。考虑到河道拓浚、加固工程对污染物浓度的影响具有很大的不确定性,而环境容量可以最直观地反应工程实施前后的水环境变化情况,因此,选择环境容量作为水质效应的评价因子。

2.4.3 水生生物生境

河流形态多样性是生物物种多样性的前提,河流形态的规则化、单一化,在不同程度上对生物多样性造成影响^[8]。河流的水生植物主要生存在河流滨岸地带,河道拓浚、堤防整治工程的实施,破坏了原有的河滨地带水生植物群落,打破了原有的生态平衡,减少了河流水体及河滨地带的水生生物量,进而影响了水生生物的多样性。群落结构是指群落间物种的构成,包括营养结构、空间结构(垂直分布和水平分布)、时间结构(昼夜节律和季节变化)和物种结构等各个方面,能够较好地反应河道拓浚、加固工程实施后的影响,所以选择水生生物群落结构作为水

生生物生境的评价因子。

2.4.4 底栖生境

河道拓浚、堤防整治工程在一定程度上减少河道底泥的量,底栖生境被完全破坏,这种几年乃至几十年建立的生态系统一旦被破坏,将很难修复和重建^[5]。底栖生物的生物量将发生改变,部分物种有可能会消失,最终直接导致底栖动物群落结构发生变化,底栖动物多样性指数发生改变。河道拓浚、加固后,底栖动物群落开始重建,适应新环境的种群将成为优势种群,原有的群落结构平衡被打破,最终会形成新的底栖动物群落结构。因为底栖动物的情况可以间接地反应底泥质量,因此从指标选取的独立性原则出发,不单独考虑底泥质量,选择底栖动物群落结构作为底栖生境评价因子。

2.5 湖泊疏浚工程水生态环境影响因子识别

2.5.1 水文水动力

湖泊疏浚工程的实施,清除了大量的淤泥,变相地增大了湖泊的蓄水量。降低了湖泊及相连河网的水位,提高了防洪能力,延长了湖泊的寿命。再者,由于疏浚后平均水深及水下地形的变化,导致疏浚前后湖水流速也产生相应的变化。因此,选择蓄水量、流速作为湖泊疏浚工程水文水动力生态影响评价因子。

2.5.2 水环境质量

富营养化是平原河网地区湖泊主要的水生态问题,湖泊底泥中积聚大量的营养盐,是湖泊水体潜在的污染源。当外污染源受到控制后,底泥对上覆水体的影响就会突出表现出来,成为影响上覆水体水质的重要因素。平原河网地区的湖泊多为浅水湖泊,由风浪引起的沉积物再悬浮非常频繁,而沉积物的再悬浮过程能够导致沉积物营养盐的释放。但疏浚后的沉积物相对比较密实,含水率较低、孔隙率小,在疏浚后早期,疏浚后的新生表层不易发生沉积物再悬浮,从而能够减少由于沉积物再悬浮引起的氮、磷释放。

疏浚后湖泊的平均水深、水量、湖泊容积等都会发生相应的变化,流速也有一定的增加,从而使污染物自净能力增强,水环境容量及水环境承载能力增大,可在一定程度上改善湖泊水环境质量。综上,选择 TP、TN 等营养盐的底泥释放通量、湖泊水环境容量作为湖泊疏浚工程生态效应评价的水质因子。

2.5.3 底栖生境

底泥疏浚会导致沉积物理化性质(如粒度组成、有机质含量)的变化,底栖动物生活在沉积物的表

层,在疏浚过程中整个底栖生境必然受到破坏,湖泊底栖动物生物量会不同程度的降低。再者,湖泊疏浚后往往会彻底改变底栖生境,引起种群的更替,从而改变群落的组成。有研究表明,湖泊疏浚后湖泊底泥中具有较低丰度的或稀有的底栖生物种群将丧失。因此,选择底栖动物数量及多样性作为湖泊疏浚工程底栖生境生态影响的评价因子。

3 小 结

基于平原河网地区水利工程的基本特征、主要功能,笔者对平原河网地区的水生态属性进行了分析,对各种不同类型的工程可能产生的生态影响进行了初步识别,在此基础上,进行了基于生态影响的水工程分类。进一步地,分别对工程实践中最为常见的泵闸枢纽工程、河道拓浚及堤防整治工程、湖泊疏浚工程这 3 类工程进行了水生态影响辨析。基于平原河网地区水生态系统特征、环境现状,从河湖物理形态、水文水动力、水环境质量、水生生物生境、底栖生境等 5 个方面,分析了水利工程建设及运行的主要生态影响因子,研究成果可为平原河网地区水工程生态影响评价分析提供技术参考。

参考文献:

- [1] 林泽新.太湖流域防洪工程建设及减灾对策[J].湖泊科学,2002,14(1):12-18.
- [2] 朱党生,张建永.水工程规划设计关键生态指标体系[J].水科学进展,2010,21(4):560-566.
- [3] 单媛媛,李瑞,张骏芳,等.平原河网地区河流健康评价指标体系构建[J].水科学与工程技术,2010(4):17-19.
- [4] 祁继英,阮晓红.大坝对河流生态系统的环境影响分析[J].河海大学学报:自然科学版,2005,33(1):37-40.
- [5] 吕衡,梅传书,杨志刚.拦河闸对河道生态影响的对策研究[J].海河水利,2007(4):28-31.
- [6] 侯锐,刘恒,钟华平,等.基于 PSR 模型的水电工程生态效应评价指标体系构想[J].云南水力发电,2006,22(2):4-6.
- [7] 严立东,岳德军,孟慧君.城市化进程中的水生态安全问题探讨[J].中国地质大学学报:自然科学版,2007,37(1):57-61.
- [8] 董哲仁.探索水利生态工程学[J].中国工程科学,2007,9(1):1-6.
- [9] 操文颖,王瑞琳.清江水布垭水利枢纽生态环境影响分析[J].人民长江,2007,38(7):133-134.
- [10] 胡安焱,张自英,王菊翠.水利工程对汉江中下游水文生态的影响[J].水资源保护,2010,26(2):5-9.

(收稿日期 2011-06-30 编辑 徐 娟)