

梯级开发鱼类洄游通道恢复决策支持系统构建 ——以湘江干流梯级开发为例

龚昱田¹, 王翔¹, 陈锋¹, 刘懿², 乔晔¹

(1. 水利部中国科学院水工程生态研究所, 水利部水工程生态效应与生态修复重点实验室, 武汉 430079;

2. 华中科技大学, 武汉 430074)

摘要: 河流梯级水电开发是我国在未来一段时间应对能源需求与结构问题的重要手段, 如何缓解其对渔业资源的影响成为决策者不能回避的难题。本研究尝试将决策支持系统技术应用到这一领域, 为鱼类洄游通道的恢复工作提供决策辅助。研究以湘江干流梯级开发为例, 分析了梯级开发鱼类洄游通道恢复所面临的问题, 构建了以空间基础数据库、决策模型库、知识库以及人机交互平台为基础的湘江干流鱼类洄游通道恢复决策支持系统。系统通过对湘江干流梯级开发的辅助决策, 展现了良好的实用性。

关键词: 梯级开发; 洄游通道恢复; 决策支持系统; 湘江

中图分类号: N945. 12, S956 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2013)04-0043-10

水电工程的修建导致了河流纵向连通性的丧失, 使得河流上下游之间的连通由双向性转变为有限的单向性, 形成了阻隔效应(董哲仁, 2003; 史云鹏, 2011)。阻隔效应主要体现在物理环境的阻隔和生物群落的阻隔两个方面: 一方面阻隔了水流行进通道, 使得水文过程不再呈连续性分布; 另一方面阻隔了水库上下游生物种群之间的基因交流, 对物种的长期进化产生不利影响(Zhong Y & Power G, 1996; 常剑波等, 2006)。阻隔效应还使得部分鱼类不能有效到达其重要栖息地, 无法完成生活史。另外, 当大坝水头差超过一定值时, 洄游的幼鱼通过大坝下行会受到高速水流的冲击(或者通过水轮机), 成活率大幅下降。这些均会导致鱼类资源量的下降甚至物种消亡。因此, 作为修复河流生态系统结构和功能的重要工程补偿措施的鱼类洄游通道恢复势必进行(常剑波等, 2006; 张东亚, 2011)。

国外鱼类洄游通道恢复工作始于17世纪, 法国西南部的贝阿(Bearn)省要求在坝、堰上建造供鱼上下行的通道。19世纪末和20世纪初, 西方经济的快速发展推动了对水电能源的需求, 同时水利水电工程对鱼类资源的影响也日益突出, 对于鱼类洄游通道的恢复研究和建设也随之得到发展, 这一阶段

美国、加拿大、前苏联、英国和日本修建了大量的过鱼设施(王兴勇和郭军, 2005; 白音包力皋等, 2011)。进入21世纪后, 全球社会经济发展与资源环境的矛盾加剧, 促使了鱼类洄游通道恢复工作的进一步发展。在整个鱼类洄游通道恢复发展历程中, 欧盟、美国、日本、澳大利亚等在鱼类洄游通道恢复设计建设方面积累了许多先进、成熟的经验(胡望斌等, 2008; 曹庆磊等, 2010)。我国鱼类洄游通道恢复建设与研究历史较短, 在20世纪60年代才开始相关研究, 最早在富春江七里垅水电站首次修建鱼道, 并进行了一系列试验和水生态环境调查, 但该鱼道由于其他原因最终没有运行(王兴勇和郭军, 2005)。1980年初修建的洋塘鱼道效果良好, 以1981年为例, 共观察计数65 d、1 350.5 h, 鱼道总计过鱼52余万尾, 平均385尾/h(徐维忠和李生武, 1982)。据统计, 我国已建和正在设计建设的过鱼设施超过40座, 以鱼道为主。我国鱼类洄游通道恢复研究在20世纪80-90年代基本陷于停滞状态(陈大庆等, 2005; 王兴勇和郭军, 2005)。进入21世纪以后, 随着我国经济的飞速发展和水利水电开发程度的不断加深, 水体富营养化、渔业资源退化、水生生物多样性下降、珍稀鱼类濒危程度加剧等水生态系统健康和安全问题不断凸现(董哲仁, 2003; 常剑波等, 2006; 王东胜和彭静, 2007; 吴晓青, 2011; 常仲农, 2012), 沟通河流系统连通性、恢复鱼类洄游通道的作用逐渐被重新认识。新颁布的《中华人民共和国水法》、《中华人民共和国渔业法》和《中国水生生物资源养护行动纲要》等明确提出在水生生

收稿日期: 2013-04-16

基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费项目(编号: 200901010)。

通讯作者: 乔晔

作者简介: 龚昱田, 1982年生, 男, 助理研究员, 研究方向为河流生态环境监测。E-mail: bengyt@hotmail.com

物洄游通道上建闸筑坝应修建过鱼设施。2000年后我国鱼道的建设以垂直竖缝式和仿自然通道的鱼道为主(陈凯麒,2012)。

1 梯级开发鱼类洄游通道恢复面临的问题

梯级开发鱼类洄游通道的恢复面临两个层面的问题。第一个层面是通过完善单个电站鱼类洄游通道恢复相关技术,使其能达到所设定的洄游通道恢复效果,内容包括洄游通道类型优选、建设位置优选、进出口设计、通道内设计、运行时段调整、鱼类游泳能力测试与模拟、过鱼效果监测与评价等(德国水资源与陆地改良学会,2009)。第二个层面是通过合理的规划,使各个梯级鱼类洄游通道的恢复满足并最大化整体洄游通道恢复效果,内容包括流域整体渔业资源保护目标在各梯级的响应以及各个梯级鱼类洄游通道恢复优先级判断。相对于单个电站鱼类洄游通道恢复相关技术已进行了很多的研究(Burt,2001; Aarestrup et al, 2003; Henriette & Kenneth, 2003; Tersi et al, 2006; Ulrike et al, 2006), 围绕合理的规划梯级鱼类洄游通道的恢复所展开的研究还很有限。

流域整体渔业资源保护目标在各梯级的响应是一种自上而下对过鱼目标进行的分解,这里需要通过两点来评价过鱼目标是否完成:过鱼效率(efficiency)用来描述通过洄游通道的鱼类数量与待通过洄游通道鱼类数量之比;过鱼效能(effectiveness)用来描述洄游通道是否能满足特定物种通过的需求(Michel, 2008)。鱼类洄游通道各个电站因修建位置不同,其对河流生态系统的阻隔效应也不同,加之洄游通道类型的选择会受到水文地形等因素的影响,各个梯级的过鱼目标不能一概而论。自上而下的对过鱼目标进行分解就是需要对各个梯级所能完成的过鱼效率和过鱼效能进行准确估计。虽然围绕鱼类洄游通道效果的监测与评估有很多(Stuart & Cooper, 1999; Winter & Densen, 2001; Agostinho et al, 2002),但还没有形成系统的结论,不足以支撑对过鱼目标的准确理解,这里只能简单的将过鱼目标理解为过鱼效能。本研究在此提出一种分解过鱼目标的思路:首先考虑流域层整体面需要保护的目标物种,弄清楚目标物种的重要生境分布情况,以此为基准确定哪些梯级的鱼类洄游通道需要对保护物种进行针对性设计,然后结合各个梯级控制区域内所筛选出的其他过鱼目标,最终确定各个梯级过鱼目标。其难点在于对鱼类生境分布的确定和在此基础

之上的鱼类重要生境分布与水电站建设位置的空间位置关系判断。

河流生态系统自河源至河口,生态功能因沿途地貌水文条件的不同而各异,各个梯级处在不同的生态功能区,对河流生态系统的阻隔影响强度也不同,因此有序的对梯级开发鱼类洄游通道进行恢复是必要的。对于这一点,欧洲在水电开发上虽然与我国不处在同一阶段,但他们的经验同样值得我们学习。欧洲大部分河流都分布着大量的大坝、水闸等阻碍鱼类洄游的障碍物,完全消除这些障碍实现鱼类的自由洄游没有必要,经济上也不能承受。欧盟国家一般根据河流流域鱼类洄游通道恢复目标,在充分调查河流障碍物类型、分布、对鱼类阻隔程度以及目标鱼类洄游特性、洄游线路等的基础上,由生物学家、工程师、水文学家、水资源管理者、计划制定专家等组成的团队确定河流鱼类洄游通道恢复的优先水域。荷兰、捷克、比利时等国目前都建立了覆盖全国的鱼类洄游通道恢复优先水域空间信息库,信息库包含障碍物分布、优先水域、近期恢复水域、远期恢复水域、不需恢复水域等信息。综上,对各个梯级鱼类洄游通道恢复优先级判断的关键是对洄游通道恢复重要性影响因子的识别,而这一点则是建立在充分的数据以及丰富的专业知识基础之上的。

鱼类洄游通道恢复所涉及数据以空间数据为主,包括地形、水文、电站分布、鱼类分布等,对这些数据的有效展示是掌握流域整体河流生态系统特点、理清鱼类物种分布与各梯级空间位置关系、明确梯级洄游通道恢复目标的基础。随着空间数据库及空间数据处理技术的发展,利用地理信息系统构建一个集数据储存、浏览与分析为一体的操作平台来对空间数据进行管理已被证明是有效的(Babak, 1995; Quinn & Hanna, 2003; Asheesh et al, 2013; 杨志峰等, 2011; 王俊, 2012)。将其应用在鱼类洄游通道恢复中,不仅可以使研究人员从各类软件、数据和文档中解放出来提高工作效率,同时还能有效的对各类数据进行管理。决策支持系统(Decision Support Systems, DSS)的理念涵盖了以上几点,其核心结构包括数据库、模型库和人机交互平台。数据库用于数据存储和管理,模型库用于各种模型的存储和管理,人机交互平台用于用户指令的输入和分析结果的输出。在国外,将决策支持系统技术用于鱼类洄游通道恢复的相关工作已经逐渐开展起来,最初的决策支持系统仅仅是单一的数据库,如比利时鱼类洄游瓶颈数据库(www.vismigratie.be)、鱼类

数据库(www.fishbase.org)、英国鱼类诱导系统(www.fish-guide.com)等。将单一数据库扩充为针对鱼类洄游通道恢复这一问题的综合数据库,是对鱼类洄游通道恢复决策支持的一次重要推进。如美国哥伦比亚河鱼道中心网站(<http://fpc.org>),针对流域内鱼类洄游通道恢复过程中会遇到的问题,组织收集和分析数据。近年来,随着公众对生态环境的日益关注,系统的设计上也逐渐加入公众参与的元素,如意大利鱼道网站(www.passaggiiperpesci.it),展示了大量鱼类洄游及鱼道设计的信息,包括图片、照片和项目信息等,吸引公众参与一起推进鱼类洄游通道的恢复。因此,构建以辅助梯级开发鱼类洄游通道恢复相关决策为目的的决策支持系统将是处理这些问题可行的方法。

2 湘江干流梯级开发鱼类洄游通道恢复决策支持系统构建

2.1 研究区域

湘江又名湘水,河源段称白石河,位于洞庭湖水系东面,广西壮族自治区东北部和湖南省东部,是洞庭湖水系流域面积最大的河流。东安至永州萍岛为湘江上游段,属中低山地貌,两岸峰险山峻、谷深林密、河道顺直,一般为V型河谷;萍岛至衡阳为中游河段,两岸为低山丘陵地貌,河谷开阔,两岸阶地发育不对称;衡阳至洞庭湖入口为下游河段,两岸地形为丘陵平原,河道蜿蜒曲折,河谷宽阔,两岸阶地发育,地形平坦,呈典型的河流堆积地貌。湘江流域属亚热带季风湿润气候,雨量丰沛,降水多集中在春夏之间(中国水力资源复查工作领导小组,2004)。

湘江流域分布有鱼类155种(亚种),其中下游是长江水系除干流之外最大的四大家鱼产卵场分布区。洞庭湖是长江流域最大的四大家鱼种质资源和种群规模维系区域,其四大家鱼鱼苗来源于长江干流的荆江以上河段和湘江的中下游河段。在长江干流,三峡水库的蓄水,使由松滋河漂流进入洞庭湖的鱼苗资源减少了90%以上。因此,湘江产卵场繁殖的鱼苗对洞庭湖四大家鱼资源的补充作用将会显得越来越重要。湘江干流规划有8座梯级电站(图1),其中有5座已经建成、2座在建、1座已通过规划(湖南省环境保护科学研究所,2010),这些电站都是径流式大坝,水位落差多在10m左右,非常适合进行梯级鱼类洄游通道恢复。

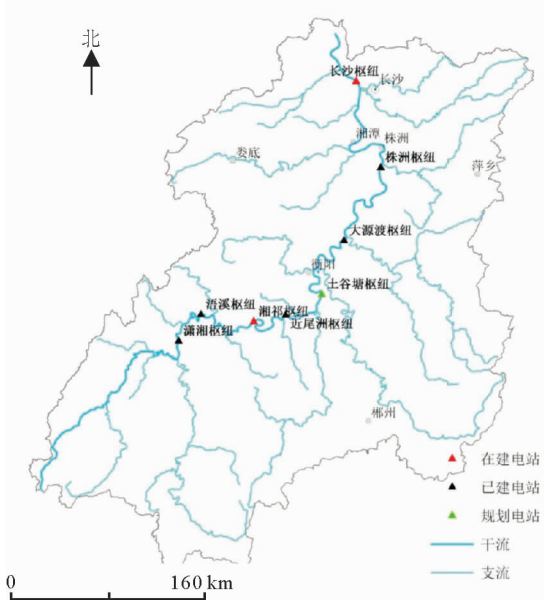


图1 湘江干流的梯级开发

Fig.1 Cascade development in Xiangjiang River

2.2 决策支持系统框架

鱼类洄游通道恢复决策支持系统主要构成要素为人机交互平台、模型库、空间基础信息数据库以及专家知识库(图2)。研究人员通过人机交互平台可以调用模型库中的模型对数据进行运算或 directly 对空间数据进行浏览,在这个过程中还可以调用知识库对模型运算反馈的结果进行判断;模型库根据研究人员的调用指令,查询空间基础信息数据库并进行运算,然后将运算结果反馈给研究人员(任明仑等,2002)。

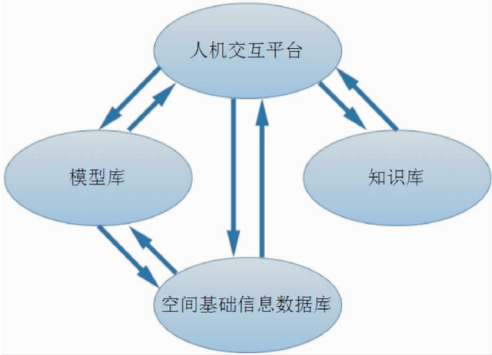


图2 鱼类洄游通道恢复决策支持系统框架

Fig.2 Framework of Fish Migration DSS

2.3 决策支持系统功能及效果

2.3.1 水电站基础数据查询 水电站基础数据包含了4个方面的数据,分别为工程概况、工程特性、水文水质以及工程相关的鱼类信息数据。8个级梯级水电站在地图上以圆点显示,用户点击浏览水坝的照片及详细信息,包括地理位置、电站结构、具体

用途以及水坝的一些特征数据等,同时在地图上高亮显示出其控制范围。同样,用户可通过选择水文数据和工程相关鱼类数据浏览相应内容。水电站基础数据查询还包含多图层显示地图、地图的漫游和缩放、查询和搜索要素、显示航片或卫星影像、编辑显示图形要素、绘制描述性文本、空间属性要素的互查询等功能。查询界面如图3、图4。

2.3.2 鱼类生态学信息查询 通过鱼类生态学信息查询功能,用户可以按照鱼类科目分类找到湘江流域所分布的鱼类种类,查询其相关生态学数据(图5)。生态学数据根据鱼类洄游通道恢复设计需求分为基础数据和行为学数据。基础数据包括洄游

类型、产卵类型、繁殖季节、最小性成熟年龄、繁殖力、食性、经济价值、资源评估以及图片等信息;行为学数据则包括重要生境(产卵场、索饵场、越冬场)分布、鱼类游泳能力数据等,可直接用于过鱼目标的筛选。用户点击选择特定物种后,该物种的分布也将在地图上高亮显示。

2.3.3 决策模型运算 本部分为整个系统的核心,通过设计4个模型来辅助决策。首先设计鱼类洄游通道恢复必要性判别模型(图6)来判断具体工程修建鱼类洄游通道的必要性。具体判别依据包括工程对鱼类的影响(来源于环评报告)以及《中华人民共和国水法》、《中华人民共和国渔业法》等法律法规。



图3 工情数据查询
Fig.3 Review of engineering data

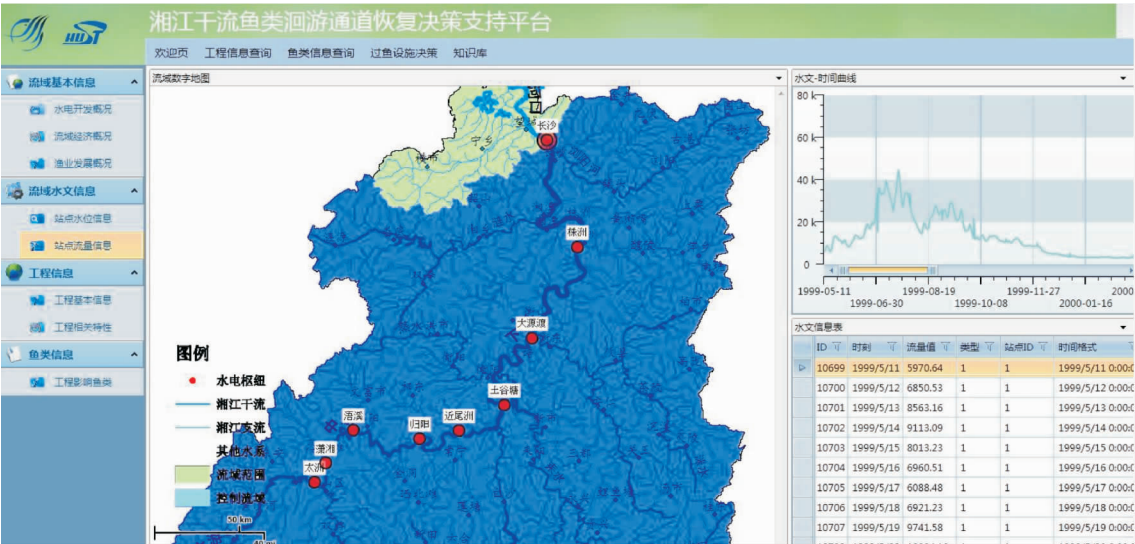


图4 水文数据查询
Fig.4 Review of hydrological data

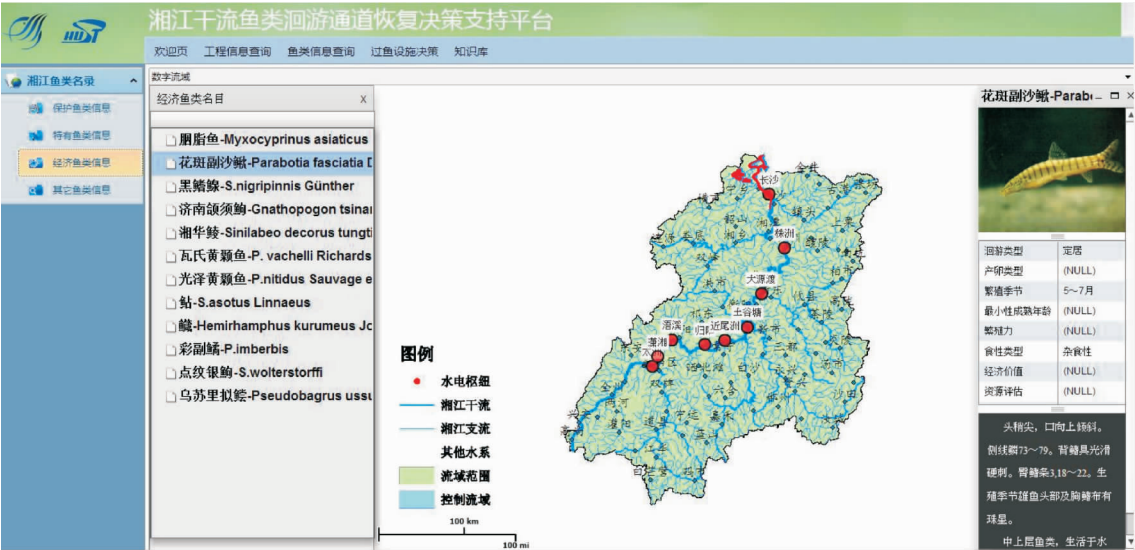


图 5 鱼类生态学信息查询
Fig.5 Review of fish ecological data



图 6 鱼类洄游通道恢复必要性判别模型界面

Fig.6 Interface of discriminant model for the necessity of fish migration recovery

然后对各个梯级影响范围内的鱼类进行过鱼目标筛选(这里仅考虑过鱼效力,即能通过的物种),设计过鱼目标优先级判别模型(图7)。根据鱼类资源调查和文献调研结果,考虑过鱼设施对鱼类的主要保护目的为完成生活史需求、保护其生物多样性价值和保护其经济价值需求。分析大坝影响区内所有鱼类的分布特点、生态习性、经济价值等指标,首

先筛选出大坝影响区内分布的洄游性鱼类,作为第一优先过鱼对象;其次筛选出除洄游性鱼类以外的珍稀特有保护鱼类,作为第二优先级过鱼对象;再次筛选出除洄游性鱼类、珍稀特有保护鱼类以外的经济鱼类,作为第三优先级过鱼对象(兼顾过鱼对象)。其中第一优先级过鱼对象中,大坝影响区内无重要生境分布或种群数量极少的种类降低为第二

优先级过鱼对象;第二优先级过鱼对象中,种群数量极少的种类降低为第三优先级过鱼对象。

接下来是对整个梯级开发洄游通道恢复优先级进行判断,设计鱼类洄游通道恢复优先级判别模型(图8)。这里考虑以下5点作为洄游通道恢复优先级影响因子:第一优先级过鱼对象种类数,第一优先级过鱼对象种群丰度,是否是鱼类洄游通道,大坝影响区内是否存在鱼类重要生境,鱼类洄游通道恢复与否是否影响其他洄游通道恢复效果。模型以层次

分析法(Analytic Hierarchy Process,AHP)为基础,用户通过人机交互平台调用本模型后,返回判别矩阵,在用户对各影响因子的相互权重进行判别后,得出最后优先级排序结果*。

最后是对具体工程鱼类洄游通道类型的选择,设计鱼类洄游通道类型比选模型(图9)。根据工程的阻隔类型以及过鱼目标的不同,所采取鱼类洄游通道类型也不一样,系统首先对常见的鱼类洄游通道类型进行介绍。



图7 过鱼目标优先级判别模型界面

Fig. 7 Interface of discriminant model for the priority of target

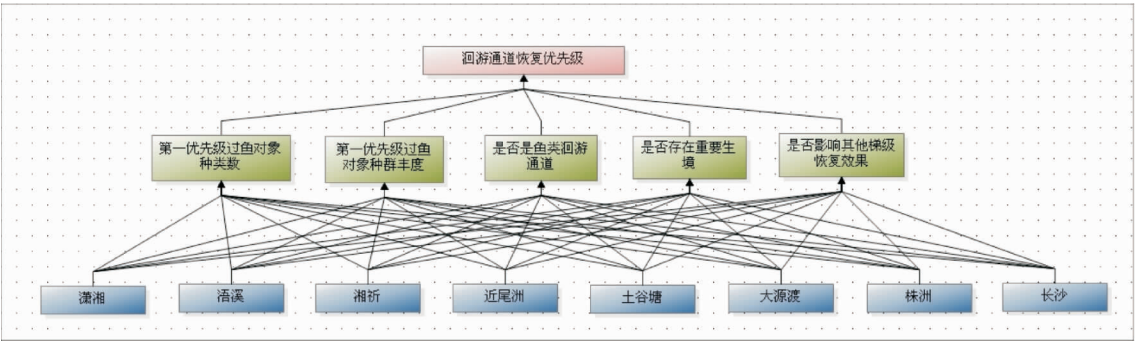


图8 鱼类洄游通道恢复优先级判别模型界面

Fig. 8 Interface of discriminant model for the priority of fish migration recovery

模型构建的目的是通过对过鱼效果和建设条件的分析,科学地选择现有条件下最为适合本工程的过鱼设施。模型对各种类型的鱼类洄游通道进行诱鱼能力、过鱼能力、鱼类适应程度、建造成本和运行维护等因素的赋分,比选得出适合本工程采用的过鱼设施类型(图10)。

2.3.4 知识库调用 知识库内容包括相关法律法规、鱼类洄游通道类型介绍(图片、文字、视频材

料)、国内外鱼类洄游通道恢复案例、鱼类洄游通道恢复重要文献以及鱼类洄游通道设计流程、数据需求等。用户可通过人机交互平台对相关内容进行浏览查询(图11)。

* 褚志鹏. 2009. 层次分析法(AHP)理论与实务. 国立东华大学企业管理学系教学讲义.

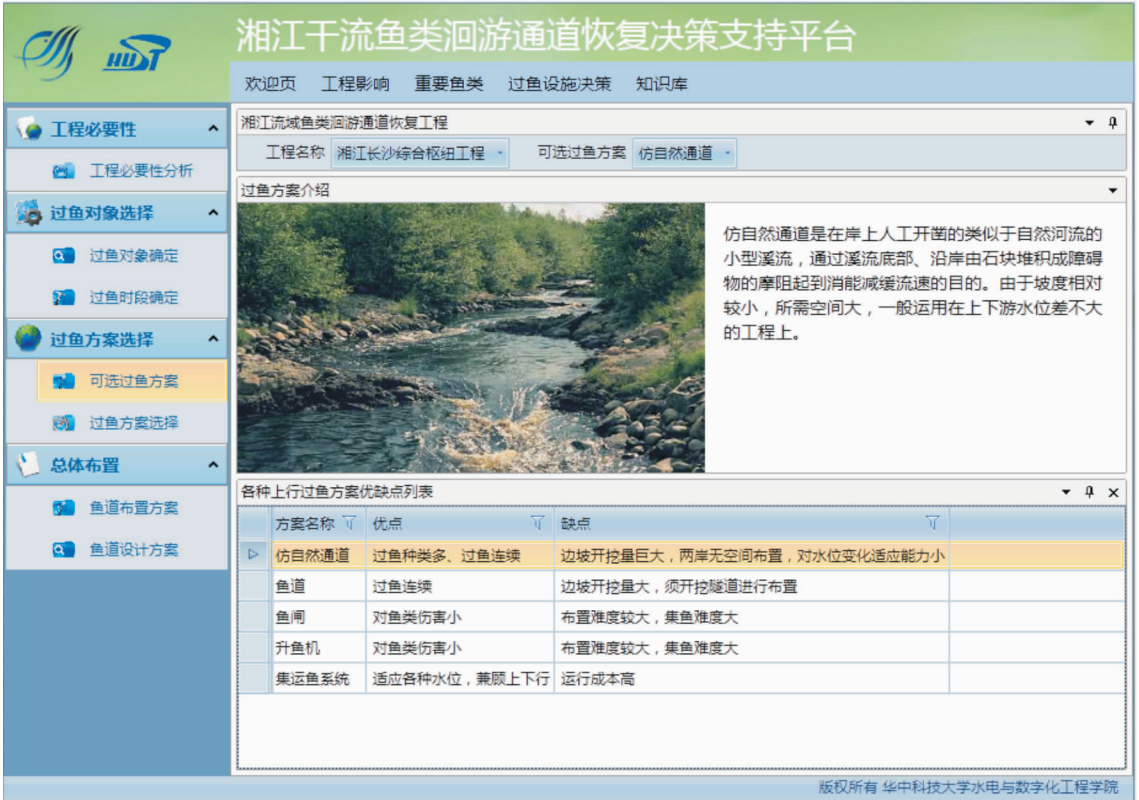


图 9 鱼类洄游通道类型浏览界面

Fig.9 Interface of review of the fish passage types



图 10 鱼类洄游通道类型比选模型界面

Fig.10 Interface of comparison and selection for fish passage types



图 11 知识库界面

Fig. 11 Interface of knowledge base

2.4 系统试用

通过试用系统,完成了对湘江干流梯级开发鱼类洄游通道恢复相关问题的决策。

湘江干流各梯级均涉及重要鱼类物种的保护,依据《中华人民共和国水法》、《中华人民共和国渔

业法》等法律法规,湘江干流 8 个梯级都需要进行鱼类洄游通道恢复。

结合流域整体渔业资源保护目标,各个梯级所需保护目标如表 1。

表 1 湘江干流梯级鱼类保护目标

Tab. 1 Fish migration targets for each cascade dam

梯级名称		第一优先过鱼对象	第二优先过鱼对象
潇湘	赤眼鳟、湖北圆吻鲴、似鳊		青鱼、草鱼、鲢、鳙、鳊、长薄鳅、湘江蛇鮈、叉尾斗鱼
	涪溪	鳊、长薄鳅、赤眼鳟、湖北圆吻鲴、似鳊	青鱼、草鱼、鲢、鳙、鳊、长薄鳅、湘江蛇鮈、叉尾斗鱼
湘祈	鳅、鳊、鳙、长薄鳅、赤眼鳟、湖北圆吻鲴、似鳊		青鱼、草鱼、鲢、鳙、岩原鲤、中华倒刺鲃、白甲鱼、稀有白甲鱼、瓣结鱼、湘江蛇鮈、叉尾斗鱼、月鳢
近尾洲	青鱼、草鱼、鲢、鳙、鳊、长薄鳅、中华倒刺鲃、赤眼鳟、湖北圆吻鲴、似鳊		鳅、鳊、岩原鲤、白甲鱼、稀有白甲鱼、瓣结鱼、湘江蛇鮈、叉尾斗鱼、月鳢、波纹鳅、暗鳅、长身鳅
土谷塘	青鱼、草鱼、鲢、鳙、鳅、鳊、鳙、鳊、长薄鳅、中华倒刺鲃、赤眼鳟、湖北圆吻鲴、似鳊		岩原鲤、月鳢、白甲鱼、稀有白甲鱼、瓣结鱼、湘江蛇鮈、叉尾斗鱼、波纹鳅、暗鳅、长身鳅
大源渡	青鱼、草鱼、鲢、鳙、短颌鲚、鳅、鳊、鳙、鳊、长薄鳅、中华倒刺鲃、赤眼鳟、湖北圆吻鲴、似鳊		刀鲚、白甲鱼、稀有白甲鱼、瓣结鱼、湘江蛇鮈、叉尾斗鱼、波纹鳅、暗鳅、长身鳅
株洲	青鱼、草鱼、鲢、鳙、刀鲚、短颌鲚、鳅、鳊、鳙、鳊、长薄鳅、赤眼鳟、湖北圆吻鲴、似鳊		白甲鱼、稀有白甲鱼、瓣结鱼、湘江蛇鮈、叉尾斗鱼、中华倒刺鲃、波纹鳅、暗鳅、长身鳅
长沙	青鱼、草鱼、鲢、鳙、刀鲚、短颌鲚、鳅、鳊、鳙、鳊、长薄鳅、赤眼鳟、湖北圆吻鲴、似鳊		中华鲟、胭脂鱼、鳊、波纹鳅、暗鳅、长身鳅、湘江蛇鮈、叉尾斗鱼

鱼类洄游通道恢复优先级由高到低排序为:长沙、株洲、大源渡、土谷塘、近尾洲、湘祈、涪溪、潇湘。且长沙、株洲、大源渡、土谷塘枢纽鱼类洄游通道恢

复的优先级权重显著高于上游 4 个梯级,急需恢复。以长沙枢纽为例,综合各项指标,认为在其右岸修建鱼道是最为合理的鱼类洄游通道恢复方法。

3 讨论

我国能源需求与结构决定了水电开发在未来很长一段时间都会继续得到发展,而梯级开发作为最重要的开发模式,对生态环境的影响将持续受到关注,如何有效缓解其影响已成为科研人员和决策者急需解决的难题。本研究围绕梯级开发鱼类洄游通道恢复展开,通过分析所需解决的问题,设计了梯级开发鱼类洄游通道恢复决策支持系统,并以湘江干流梯级开发为例进行了数据库、模型库与知识库的构建。系统对湘江干流8个梯级的鱼类洄游通道恢复必要性进行了判断,对各梯级过鱼目标进行了筛选,对梯级间的鱼类洄游通道恢复优先级进行了排序并对长沙枢纽的鱼类洄游通道类型进行了分析。

湘江干流鱼类洄游通道恢复决策支持系统是國內首次针对鱼类洄游通道恢复进行决策支持系统设计,系统通过对数据的展示、对具体问题的辅助决策展现了良好的实用性。对比完整的决策流程,系统在决策模型以及对数据的展示上还略显不足,用户还不能完全依据本系统对梯级开发鱼类洄游通道恢复中的所有问题进行决策。但以本研究为基础,可更为明确的制定进一步的工作目标,如:在数据浏览中增加空间数据的三维浏览、模型库中增加鱼类游泳能力、鱼类洄游通道效果模型等功能以提升系统辅助决策能力,并尝试将系统推向公众,设计公众参与模块,使更多关心环保事业的人能够参与到河流生态保护中。

参考文献

白音包力皋,郭军,吴一红. 2011. 国外典型过鱼设施建设及其运行情况[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 9(2): 116-120.

曹庆磊,杨文俊,周良景. 2010. 国内外过鱼设施研究综述[J]. 长江科学院院报, 27(5): 39-43.

常剑波,陈永柏,高勇,等. 2008. 水利水电工程对鱼类影响及减缓对策[C]//中国水利学会. 中国水利学会2008学术年会论文集:上册. 北京:中国水利水电出版社.

常仲农. 2012. 水利水电环境影响评价管理暨鱼类保护对策探讨[C]//环境保护部环境工程评估中心. 建设项目环境影响评价鱼类保护(鱼道专题)技术研究与实践. 北京:中国环境科学出版社.

陈大庆,吴强,徐淑英,等. 2005. 大坝与过鱼设施[R]. 北京:水电水利建设项目水环境与水生生态保护技术政策研讨会.

陈凯麒,常仲农,曹晓红,等. 2012. 我国鱼道的建设现状与展望[J]. 水利学报, 43(2): 182-188.

德国水资源与陆地改良学会. 2009. 鱼道——设计、尺寸及监测[M]. 李志华,王珂,刘绍平,等译. 北京:中国农业出版社.

董哲仁. 2003. 水利工程对生态系统的胁迫[J]. 水利水电技术, 34(7): 1-5.

湖南省环境保护科学研究院. 2010. 湘江高等级航电建设方案环境影响报告书:简本[R].

胡望斌,韩德举,高勇,等. 2008. 鱼类洄游通道恢复——国外的经验及中国的对策[J]. 长江流域资源与环境, 17(6): 898-903.

任明伦,杨善林,朱卫东. 2002. 智能决策支持系统:研究现状与挑战[J]. 系统工程学报, 17(5): 430-440.

史云鹏,曹晓红. 2011. 水利水电工程维持河流连通性的思考[J]. 中国水能及电气化, (12): 20-25.

王俊. 2012. 长江流域水资源综合管理决策支持系统研究[J]. 人民长江, 43(21): 6-10.

王兴勇,郭军. 2005. 国内外鱼道研究与建设[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 3(3): 222-228.

徐维忠,李生武. 1982. 洋塘鱼道过鱼效果的观察[J]. 湖南水产科技, (1): 21-27.

杨志峰,等. 2011. 白洋淀水生生态综合调控决策支持系统设计[J]. 环境保护科学, 37(5): 39-42.

张东亚. 2011. 水利水电工程对鱼类的影响及保护措施[J]. 水资源保护, 27(5): 75-77.

中国水力资源复查工作领导小组. 2004. 中华人民共和国(分流域)水力资源复查成果(2003年):第1卷:长江流域:下[M]. 北京:中国电力出版社: 863-878.

Angelo Antonio Agostinho, Luiz Carlos Gomes, Domingo Rodriguez Fernandes, et al. 2002. Efficiency of fish ladders for neotropicalichthyofauna[J]. River research and applications, 18:299-306.

Asheesh Sharma, Madhuri Naidu, AabhaSargaonkar. 2013. Development of computer automated decision support system for surface water quality assessment[J]. Computer & Geosciences, 51: 129-134.

BabakNegahban, et al. 1995. LOADSS: A GIS-based decision support system for regional environmental planning[J]. Ecological Engineering, 5:391-404.

C M Bunt. 2001. Fishway entrance modifications enhance fish attraction[J]. Fisheries Management and Ecology, 8:95-105.

Henriette I, Jager, Kenneth A Rose. 2003. Designing optimal flow patterns for Chinook salmon in a central valley, California, River[J]. North American Journal of Fisheries Management, 23:1-21.

H V Winter, W L T Van Densen. 2001. Assessing the opportu-

- nities for upstream migration of non-salmonid fishes in the weir-regulated River Vecht[J]. *Fisheries Management and Ecology*, 8:513 – 532.
- I G Stuart , M Mallen-Cooper. 1999. An assessment of the effectiveness of a vertical-slot fishway for non-salmonid fish at a tidal barrier on a large tropical/subtropical river [J]. *Regulated River: Research & Management*, 15:575 – 590.
- K Aarestrup, M C Lucas, J A Hansen. 2003. Efficiency of a nature – like bypass channel for sea trout (*Salmo trutta*) ascending a small Danish stream studied by PIT telemetry [J]. *Ecology of Freshwater Fish*, 12:160 – 168.
- Michel Larinier. 2008. Fish passage experience at small-scale hydro-electric power plants in France[J]. *Hydrobiologia*, 609: 97 – 108.
- N W T Quinn , W M Hanna. 2003. A decision support system for adaptive real-time management of seasonal wetlands in California[J]. *Environmental Modelling & Software*, 18:503 – 511.
- Teresa Teijeiro Rodriguez, JPuertasAgudo, Luis Pena Mosquera, et al. 2006. Evaluating vertical-slot fishway designs in terms of fish swimming capabilities[J]. *Ecological Engineering*, 27:37 – 48.
- Ulrike K, et al. 2006. Undulatory fish swimming: from muscles to flow[J]. *Fish and Fisheries*, 7: 84 – 103.
- Zhong Y, Power G. 1996. Environmental impacts of hydroelectric projects on fish resources in China[J]. *Regulated rivers: research and management*, 12: 81 – 98.
- (责任编辑 张俊友)

Fish Passage Decision Support System Construction in Cascade Development: A Case Study from Xiangjiang River

GONG Yu-tian¹, WANG Xiang¹, CHEN Feng¹, LIU Yi², QIAO Ye¹

- (1. Key Laboratory of Ecological Impacts of Hydraulic-Projects and Restoration of Aquatic Ecosystem of Ministry of Water Resources, Institute of Hydroecology, Ministry of Water Resources and Chinese Academy of Sciences. Wuhan 430079, P. R. China;
2. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract: Hydropower cascade development will still be the main method in the next period to deal with the energy and energy structural demand in China, and how to mitigate its impact on fishery resources becomes a significant problem that the decision makers cannot avoid. This study attempts to apply decision support system (DSS) to this field, provides decision support for the recovery of fish migration. Xiangjiang River cascade development was selected as an example, after analysis of the fish migration problems, a Xiangjiang river fish migration DSS which based on basic spatial database, model library, knowledge base and man-machine interaction platform was built. It shows good practicability.

Key words: cascade development; migration; decision support system; Xiangjiang River