

潘保柱, 韩谓. 长江与黄河两大流域水生态问题剖析 [J]. 风景园林, 2020, 27 (8): 18-23.

长江与黄河两大流域水生态问题剖析

Analysis of Aquatic Ecological Issues in the Yangtze and Yellow River Basins

潘保柱 韩谓
PAN Baozhu, HAN Xu



中图分类号: TV882
文献标识码: A
文章编号: 1673-1530(2020)08-0018-06
DOI: 10.14085/j.fjyl.2020.08.0018.06
收稿日期: 2020-04-21
修回日期: 2020-07-01

潘保柱 / 男 / 博士 / 西安理工大学水利水电学院教授、博士生导师 / 西北旱区生态水利国家重点实验室成员 / 研究方向为淡水生态、生态水利、生态修复
PAN Baozhu, Ph.D., is a professor and doctoral supervisor in the School of Water Conservancy and Hydropower, Xi'an University of Technology, member of the State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China. His research focuses on freshwater ecology, ecological hydraulics and ecological restoration.

韩谓 / 男 / 西安理工大学水利水电学院在读硕士生 / 研究方向为淡水生态
HAN Xu is a master student in the School of Water Conservancy and Hydropower, Xi'an University of Technology. His research focuses on freshwater ecology.

摘要: 对流域水生态的研究由传统单一的水质评价逐渐转变为河流生态质量的评价, 基于河流健康保障的流域生态保护与发展已成为国际性趋势。长江、黄河两大流域内的生态保护与发展也是重大国家战略。以长江、黄河两大流域为研究对象, 对两大流域水生态环境问题进行分区概述, 并从河流湖库问题治理的关键是注重流域的整体性的角度, 分析为维系两大流域水生态健康可开展的研究工作, 最后将生态修复与景观设计结合考虑, 提出注重景观价值的流域生态保护策略。

关键词: 流域生态安全; 河流健康保障; 长江; 黄河; 水生态环境问题; 景观价值

基金项目: 国家自然科学基金 (编号 51939009, 51622901)

Abstract: The research on water ecology of drainage basins has gradually changed from the traditional single evaluation of water quality to the assessment of ecological quality of the rivers. The ecological conservation and development of river basins, based on river health security, has become an international trend. In China, the ecological conservation and development in the Yangtze and Yellow River basins are major national strategies. This research targets the Yangtze and Yellow River basins, and summarizes their aquatic ecological environments. On a basis of the concept that the core of the basin management is to focus on the integrity of the basin, it analyzes the research works that are available to maintain the aquatic ecological health of the two basins. Finally, the landscape-value-oriented strategy of ecological protection is put forward taking into consideration of ecological restoration and landscape design.

Keywords: basin ecological security; river health security; the Yangtze River; the Yellow River; aquatic ecological environment issues; landscape value

Fund Items: The National Natural Science Fund of China (No. 51939009, 51622901)

自 20 世纪末, 河流健康问题开始得到关注, 对流域水生态的研究由传统单一的水质评价逐渐转变为河流生态质量的评价。美国环保署于 1989 年制定了快速生物评价协议^[1], 于 1990 年制定环境监测评价计划^[2], 并于 1999 年快速生物监测协议^[3]中增加了水生生物的监测与评价方法标准。英国于 20 世纪 90 年代建立河流保护评价系统^[4], 之后于 1998 年提出“河流保护评价系统”, 而中国于 2005 年出台了健康长江评价指标体系^[5]。同时, 为了解河流健康状况以保障流域生态安全与发展, 多国专家

针对天然河流生态系统也展开了一系列调查研究^[6-9], 近 20 年来有关河流健康的报道逐渐增多^[10], 基于河流健康保障的流域生态保护与发展已成为热点问题。长江和黄河是中国两大重要河流, 几千年来, 两大河流一直处于自然演变状态。随着近代气候变化影响, 同时, 拦河筑坝、引水工程、挖沙采石、点源污染等人类活动加剧, 对流域生态健康产生了诸多不利影响。自 20 世纪 50 年代以来, 长江湖泊与湿地面积显著下降, 生物多样性降低, 而自 20 世纪 70—90 年代黄河频繁断流, 河口三角洲生态环

境遭到破坏。目前,长江流域部分区域水污染加剧、水生态受损等问题依然突出,黄河流域内仍存在部分支流水环境质量较差、工业污染未得到全面有效控制等问题。因此,两大流域生态亟待采取针对性措施进行保护与修复。

河流生态系统是指以河流为主体,且包含陆地、河岸带以及湿地沼泽的复合生态系统,河流的水资源、水生态、水环境和水灾害集中反映流域内各部分之间的联系过程^[11],因此,评估和保护流域生态系统健康的关键是河流生态。水生态是指环境水因子对生物的影响和生物对各种水分条件的适应,河流生态系统健康包括生态系统结构的完整性、稳定性^[12]与社会服务的发挥状态^[13],把脉河流生态健康水平有 2 点要求:1) 空间尺度上要包括干流及典型支流自源区至入海口全河段;2) 全物质通量包括水文、泥沙、水环境、生物等全方面的同步调查。2014—2019 年期间,倪晋仁研究团队、潘保柱研究团队联合对长江干流及数条典型支流、黄河干流及数条典型支流开展了共 10 次自源区至入海口全河段全物质通量的系统调查,某些研究成果在下文中有所提及。笔者以长江、黄河两大流域为研究对象,对两大流域水生态环境问题进行分区概述,分析为维系两大流域水生态健康可开展的研究工作,并提出注重景观价值的流域生态保护策略。

1 长江与黄河两大流域的水生态环境问题

1.1 长江流域的水生态环境问题分区概述

1.1.1 长江源区

长江源区位于青藏高原腹心,此区域河网水系发达^[14],水系平面形态呈现平行式水系格局。近年来,受到气候变暖与人类活动的影响,长江源区内产生了一系列问题:1) 冰川呈明显退缩趋势,1990—2010 年期间长江源区冰川面积由 2 527.6 km² 减少到 1 581.4 km²^[15],影响到区域水循环与水资源条件;2) 随着人口与放牧规模的不断扩大,超载放牧已使某些地区草地生态系统功能失调,生态系统遭受破坏^[16];3) 据 2011 年第一次

全国水利普查结果显示,长江源区水土流失面积占总面积的 44.51%^[17],区域气候变化及冻土环境变化导致的区域植被退化,以及所叠加的人为活动共同导致源区水土流失面积扩大,引起河道淤积,破坏水体水质;4) 冻土溶解层增加,导致江源储水量(主要是固态水)减少,地下水水位降低,造成植被退化和湿地萎缩,使源区涵养水源能力降低,显著改变江源地区生态环境状况^[18]。长江源区地处高寒、自然条件严酷,此区域的水生生物多样性较低,如潘保柱等^[19]于 2009—2010 年对长江源区 7 个河段调查发现大型底栖动物仅 29 种;韩涛等^[20]于 2018 年对长江源区干支流 10 个河段 2 次调查仅采集到浮游植物 58 种。综上,长江源区人类活动干扰弱,但因地处高寒,生态脆弱。

1.1.2 金沙江流域

通天河在玉树接纳巴塘河后进入西藏自治区与四川省交界处的高山峡谷之间,称为金沙江。由于河流的侵蚀下切作用,金沙江流域内谷坡陡、谷底窄,多呈“V”型,谷坡不稳定^[21]。流域内水能资源丰富,是中国最大的水电能源基地,而由于其流域内特殊的地貌条件以及人类活动影响,金沙江流域内产生了一系列问题:1) 金沙江干热河谷区降水不均且多暴雨,流域内开荒伐林也加剧了水土流失,导致局部区域滑坡和泥石流等灾害频发^[22];2) 梯级开发改变了鱼类繁殖所需的水文水力条件,导致原本连续的急流流水生境被分割、渠化,同时鱼类洄游通道受阻,不利于鱼类种群繁衍及珍稀特有鱼类多样性维持^[23];3) 水位随着大坝的高度不断抬高,导致金沙江中游河段淹没植被面积约占总面积的 13%,外源营养盐输入随之增加^[24]。金沙江流域内频发的地质灾害以及大量的梯级开发导致水生生物多样性下降,如朱朋辉等^[25]根据分析典型泥石流沟底栖动物对河床结构的量化响应关系发现泥石流频发的河流中生物多样性及丰度较低;高少波等^[26]于 2008—2011 年对金沙江下游干流调查发现鱼类资源呈衰退趋势且个体小型化与低龄化明显。综上,金沙江流域受气候与地形地貌以及一系列梯级开发的影响,生态健康受损。

1.1.3 川江流域

长江在四川宜宾至湖北宜昌之间为川江,其流域内上段为四川盆地,下段为长江三峡。川江上段为珍稀鱼类的保护区,此区域主要受到上游梯级开发带来的影响,如刘孟凯等^[27]以 2012 年长江上游水文数据为基础建立分析模型,结果表明:为了更好地满足保护区河道的生态保护需采取水库群联合生态调度。而下段三峡大坝的存在也给生态环境带来一些问题:1) 三峡库区蓄水导致水体流速下降,削弱了水体自净能力,某几条入汇支流的库湾甚至发生藻类水华^[28];2) 三峡大坝的蓄水改变了自然水文情势^[29],大坝的物理阻隔使得库区内洄游鱼类减少^[30]。数据显示,20 世纪 80 年代前,三峡库区江段共有 140~200 种鱼类^[31],而 2010—2015 年期间调查出的鱼类仅剩 80 余种^[32-33];3) 三峡库区淹没土地,水面扩张,导致大量陆生动植物的栖息环境被破坏,另外也增加了外源营养盐输入^[34]。长江干流川江段的水电开发对水生生物多样性产生了一定的负面影响,如叶麟等^[35]于 2015 年对三峡 23 条支流库湾及 18 个干流断面调查出藻类仅 61 种;王宝强等^[36]于 2012 与 2013 年对三峡水库 5 个断面底栖动物群落结构特征调查发现建坝后底栖动物密度与生物量均趋于减少。综上,川江流域内主要受到梯级水电开发的影响,流域内的珍稀鱼类保护区生境遭到一定威胁。

1.1.4 长江中下游

长江干流从湖北宜昌至江西湖口区间为长江中游,湖口以下为长江下游。长江中下游水系复杂,河湖密布,湿地资源丰富。历史上这些湖泊皆与长江干流自然连通,形成了特殊的江湖复合系统^[37]。同时,长江中下游也是江豚主要栖息地,作为长江生态系统的旗舰物种,其生存状况预示着长江生态系统的兴衰存亡,研究表明长江江豚数量由 20 世纪 90 年代的 2 700 头左右降至目前的 1 000 头左右^[38-39]。目前全国 1/3 的人口聚集于长江中下游地区,人类活动干扰强度大,引发了一系列问题:1) 截至 2009 年,长江流域已经建成各类水库 47 000 座^[40],河湖连通受阻,江湖复合系统破碎化加剧;2) 植被破坏导致的

泥沙淤积以及大量的围湖造田,导致湿地萎缩严重,洞庭湖和鄱阳湖于2000—2010年期间水域面积降幅分别为11.9%和13.4%^[41];3)城市污水和工业废水的大量排放,以及农业面源污染^[42],导致长江中下游水质恶化。长江中下游区域人口密集,江湖阻隔,对水生生物多样性产生负面影响,如潘保柱等^[43]于2008年报道了天鹅洲和老江河2个长江故道底栖动物生物量较20世纪90年代大幅下降;陈秀粉等^[44]于2014年期间对宜昌至武汉段调查发现该江段以中等敏感类群和耐污类群为主,这与经济社会的发展在一定程度上引起长江水质的下降有关。综上,长江中下游流域人类活动干扰强度较大,一定程度上长期存在影响,导致生境破碎化、湖泊富营养化。

1.1.5 长江河口

长江河口是中国最大的河口,年径流量大,自徐六泾以下三级分叉、四口入海,其水域内盐淡水交混剧烈,是一个复杂且特殊的自然综合体^[45]。近几十年来,由于人类活动加剧,长江河口区域面临的生态压力与日俱增:1)长江、钱塘江等每年携带大量污染物进入长江口海域,导致河口区域水质整体下降^[46],有机污染物由1986年的115种增加到21世纪初的308种^[47];2)渔业发展对河口生态系统的压力增大,加之水利工程建设和上游工农业用水量增加,渔业资源量衰退明显^[48];3)长江口生境斑块化^[49],气候变化引起的海平面上升以及人类活动也加剧了河口区盐水平倒灌^[50]。目前,长江河口区域的水生生物多样性状况也不容乐观:陈耀辉等^[51]对近30年来长江口海域生态系统健康状况进行研究发现长江口海域鱼类浮游生物种类数由1986年的29种下降到2016年的19种;蔡文倩等^[52]于2009年对长江口海域23个站点调查发现大型底栖动物69种,底栖动物群落的物种数与生物量都处于较低水平。综上,长江河口水环境质量较差,生境遭受破坏,亟待采取保护与修复措施。

1.2 黄河流域的水生态环境问题分区概述

1.2.1 黄河源区

黄河源区水系呈羽毛状分布,多以弯曲和辫状河流为主^{[14][62]},其冲积河型具有多样

性^[53],属于高原湖泊沼泽地貌。近年来,在气候变化和人为活动的影响下,黄河源区出现了一系列问题:1)积雪和冰川呈现持续消融状态^[54],使得径流量在长时间尺度上不断减少^[55],不利于生态环境的平衡与稳定;2)径流量减少导致以扎陵湖和鄂陵湖为中心的湖群面积缩小甚至干涸,水位下降2m以上^[56],湿地面积萎缩,水源涵养功能降低^[57];3)各种类型湿地的退化以及不合理的人类活动,使得黄河源区沙漠化与景观破碎化加剧^[58],至2008年黄河源区退化草地约占总面积的1/3^[59],而陆生生态系统的退化也是区域水循环与水文过程变化的主要原因^[60]。黄河源区地处青藏高原腹地,自然条件恶劣,此区域水生生物多样性较低,如潘保柱等^{[19][37]}于2009—2010年对黄河源区7个河段调查出大型底栖动物仅48种;张军燕等^[61]于2006年对黄河源区玛曲段9个河段调查仅采集到浮游植物23种;洪欢^[62]于2014与2015年对黄河源区14个河段2次调查仅采集到鱼类32种,其中土著鱼类24种。综上,黄河源区地处高寒,自然条件恶劣,生态脆弱,同时也受到一定程度的人为干扰。

1.2.2 黄河上游甘宁蒙段

黄河干流自唐乃亥水文站至内蒙古河口镇为上游,流域内河段地形复杂,河型由峡谷河段过渡至平原河段^[63]。黄河上游甘宁蒙段作为重要的能源、矿产和冶炼基地,沿岸化工企业众多,对黄河的水生态产生了一系列的负面影响:1)黄河上游经济快速发展,用水量以及工农业废水排放不断增加,加剧了水资源短缺矛盾,同时也损害着水生生态系统^{[64][58]},其中河套灌区的水污染最为严重^[65];2)主槽萎缩导致甘宁蒙段冰凌灾害频繁^[66],同时高流量事件发生的减少加剧了河道淤积,使得河流生态朝不利方向演化;3)水利工程改变了原有河道水文条件,导致黄河珍稀土著鱼类不断下降,目前甘宁蒙土著鱼类仅22种,较历史时期减少了42.1%^[67-68]。黄河上游甘宁蒙段工业众多,流域内河套灌区是中国面积最大的灌区,对水生生物多样性产生了诸多影响,如冯慧^[69]于2005—2008年期间对黄河上游龙羊峡—刘家峡河段30多个采样点调查

出鱼类仅35种,珍稀土著鱼类种类呈衰退趋势;潘保柱研究团队于2019年枯水期与平水期对黄河干流全河段44个断面进行系统的调查,其浮游植物生物评价结果表明甘宁蒙段大多断面为中度污染。综上,由于流域内众多工农产业的负面影响,黄河上游甘宁蒙段水体质量整体下降,珍稀鱼类生境正遭受破坏。

1.2.3 黄河中下游

黄河干流自内蒙古河口镇至河南郑州市桃花峪为中游,流域内河口镇至龙门为黄土高原,是黄河流域水土流失重点治理区^[70]。河南桃花峪以下为黄河下游,其内近800km河道为“地上悬河”,具有“善淤、善决、善徙”的特性^[71]。近年来,由于自然地质灾害与人类活动,黄河中下游出现了一系列问题:1)黄河中游的水土流失既增加了旱涝洪灾发生的概率,又导致水库淤塞,降低水库的防洪能力与使用寿命,同时还影响水体自净能力,破坏生态系统^[72];2)下游河道不断向“二级悬河”发展,河床高出地面4~6m,部分河段达10m以上^[73],一旦发生超标准洪水,易危及堤防安全^[74],同时下游游荡型河道也增大了堤防冲决和溃决的危险性;3)黄河中下游人口众多,但年均径流量却不达全国河川径流量的2%,缺水危机迫在眉睫。黄河中下游自然灾害及人类活动对流域内水生生物也产生了诸多负面影响,如朱国清等^[75]于2011年黄河小浪底水库调水调沙期间对黄河中游4个断面调查发现调水调沙后鱼类平均资源量损失均在50%以上,种群多样性指数大幅下降;谢元等^[76]于2015年对黄河主要支流湟水、汾河、渭河和洛河调查发现,洛河底栖动物物种数最多,也仅为28种。综上,黄河中下游面临着缺水危机,同时,地上悬河威胁着两岸安全。

1.2.4 黄河口

黄河口具有来沙量大、淤积与造陆速度快、改道频繁的演变特点^[77],属于多沙摆动频繁的堆积性河口。因水沙条件改变及人工干预,黄河三角洲湿地及河口出现了一系列问题:1)近年来,由于小浪底水库拦沙,来沙量大幅减少,目前入海泥沙量大致维持在

0.3 亿 t/a^[79]。但按照入黄水沙演进规律,待小浪底水库淤满之后,对黄河下游河道防洪减淤又将产生负面影响;2)自黄河调水调沙以来,河口生态系统虽呈较明显的正向演替趋势,但其植被与湿地总面积仍呈萎缩趋势,河口湿地生态状况依然不容乐观^[79];3)由于干流诸多的水库工程,黄河入海冲淡水不断减少,河口海水表层盐度随之不断增大,削弱了海域渔业生产力,渤海鱼类种数从 20 世纪 50 年代的 146 种降至 90 年代的 73 种^[80]。在这些不利条件下黄河口生物多样性遭受威胁,如王新艳等^[81]于 2015 年对黄河口调查发现,底栖动物密度随水文连通强度的增强而上升,而人类活动与气候变化的双重作用却使湿地的水文连通受阻;张芮等^[82]于 2013—2014 年期间对黄河口 24 个站位调查发现黄河口鱼类生物完整性较 20 世纪 80 年代初期呈下降趋势。综上,由于黄河自身演变特征以及人为干扰,黄河口生境依然不容乐观。

2 维系长江与黄河两大流域水生态健康需开展的研究工作

长江、黄河两流域源区皆存在冰雪消融、水源减少的问题,两流域中游受到工业及人类生产生活的污染及自然影响,且中游地区水流较急大多为山区,树木砍伐过度导致水土流失严重。两流域下游受工业污染,且因水流平缓而造成河道堵塞、河床上升。而两大流域的状况也存在诸多不同之处,长江流域内梯级水库众多,含沙量较小,流域雨季较长,受其影响长江汛期较长,生态环境相对较好。黄河最大的特点就是“水少沙多、水沙异源”,且相比于长江流域,黄河流域内地形地貌复杂多变、水资源分布不均匀且生态脆弱问题十分突出。因此,对于长江与黄河两流域干支流、上下游不同特点,有必要采取针对性的措施。

2.1 长江流域可开展的研究工作

长江源区地处高寒,自然条件恶劣,生态环境极其脆弱且生物多样性独特。依据河谷形态及河流地貌选取长江源区代表性河流,调查与收集其水文、水质、生物、河流地貌等方面资料。1)在河流层面上,研究自然演

变河流结构分布规律,掌握水生生物群落结构特点并进行水质生物评价。2)在流域层面上,揭示长江源区水生态环境对自然条件演变的响应规律,研究高寒地区生态系统服务形成过程、自然环境与人类活动驱动机制^[83]。

金沙江流域内水库众多,地质条件不稳定,自然地质灾害频发。通过选取金沙江流域干热河谷区典型干支流断面及泥石流沟,收集其水质、泥沙、生物、地质地貌等方面的资料。1)在河流层面上,掌握不同水文期不同河床结构特征,研究河流生境演变影响下水生生物群落演替规律,识别水生生物关键生境因子并评价生物栖息地质量。2)在流域层面上,结合气候、地质地貌、水环境等构建物种分布模型,探究梯级开发与自然灾害影响下水生生物对河道生境变化的响应规律^{[21]76}。

川江,其上段是众多濒危鱼类保护区,其下段为三峡水库,流域生态系统稳定性受制约。选取典型河道断面及水库断面,1)在河流层面上,掌握水生生物群落特征,明晰水库水温变化对水生生物影响机制,探究水电开发对保护区内水生生物群落的影响规律。2)在流域层面上,构建水文-环境-生物生态系统过程反馈模型,建立生态系统健康评价体系,探究梯级水库对水沙过程影响规律,揭示流域生态系统变化的内在驱动力,明晰流域生态保护目标与环境约束机制。

长江中下游河湖密布,点源与面源污染严重,江湖阻隔,湖泊富营养化加剧。通过选取长江中下游典型河流、湖泊、湿地,1)在河流层面上,掌握长江中下游河湖水文、水质、水生生物群落特征,研究大型通江湖泊生态水文季节性变化规律与调控机制,厘清水文连通性及其与生物多样性的关系,探究江湖阻隔对生物生长发育及其体内污染物累积转化过程影响规律^{[40]72}。2)在流域层面上,着眼于生态系统整体性与长江流域系统性,探究江湖连通性变化下流域不同生态系统间的关系,研究水陆交错带包括湿地在内的生境演变机理与修复方法,同时构建海绵城市水文模型,研究其对城市面源污染控制及河道水质影响。

长江口是中国最大的河口,盐淡水交混

剧烈,长三角地区经济发达,人口稠密,淡水需求量大,受到人类活动的显著影响。选取长江口自然河流河段、湖泊、湿地及邻近海域典型样点,1)在河流层面上,通过对长江口水文、水质、水生生物等特征及其与河口健康状况关系的研究,掌握河口水生生物群落特征。2)在流域层面上,探究鱼类、浮游生物对环境变化的响应,分析评价长江口生态系统健康变化趋势,构建数学模型以分析长江口盐水入侵的响应特征。

2.2 黄河流域可开展的研究工作

黄河源区地处青藏高原腹地,气候寒冷,地广人稀,其冲积河型具有多样性,生态环境十分脆弱。依据河谷形态及河流地貌选取黄河源区代表性河流,基于宏观生态学理论,调查与收集其气候水文、水环境、生物、河流地貌等方面资料。1)在河流层面上,厘清黄河源区水文循环规律及机理,掌握水生生物群落结构特征并进行水质生物评价。2)在流域层面上,明晰黄河源区气候水文变化特征,探索流域内陆生生态系统与气候变化的时空耦合关系,分析气候变化影响下黄河源区高寒生态系统变化对水文过程的影响。

黄河上游甘宁蒙段河流地形复杂,沿岸工业众多,且流域内有中国面积最大的河套灌区,河流环境污染较为严重,生态系统面临多重威胁。通过选取干支流河道及水库断面,调查其环境本底值。1)在河流层面上,研究河流生境演变影响下水生生物群落演替规律,识别影响其生境的关键因子。2)在流域层面上,从产沙输沙以及水沙调控的角度,对比分析不同水库运行时期黄河上游甘宁蒙段水沙关系及水文情势变化^{[69]1},分析各因素对黄河上游河床演变特征的影响,揭示梯级水库群运行对流域生态的影响,同时,根据上游流域生态系统特征,构建突发性水污染事故预测预警模型^{[69]63}。

黄河中游是水土流失的重点治理区,下游有“地上悬河”,流域内洪涝灾害频繁,生态安全遭到威胁。选取典型自然河道断面及水库断面,调查与收集其水文、水质、泥沙、生物等方面的资料。1)在河流层面上,掌握水生生物群落结构特征,结合水生生物群落

- 况评价及保护战略[J]. 环境科学与技术, 2014, 37 (9) : 174-179, 204.
- [23] 骆辉煌, 李倩, 李翀. 金沙江下游梯级开发对长江上游保护区鱼类繁殖的水温影响[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2012, 10 (4) : 256-259, 266.
- [24] 邓敏, 刘圆, 严佩升. 金沙江中游河段水电开发对陆生生态环境的影响及对策研究[J]. 赤峰学院学报(自然科学版), 2018, 34 (1) : 52-54.
- [25] 朱朋辉, 潘保柱, 李志威, 等. 云南小江流域典型泥石流沟中底栖动物群落特征及其对河流地貌的响应[J]. 湖泊科学, 2019, 31 (3) : 869-880.
- [26] 高少波, 唐会元, 乔晔, 等. 金沙江下游干流鱼类资源现状研究[J]. 水生态学杂志, 2013, 34 (1) : 44-49.
- [27] 刘孟凯, 潘保柱, 黄明海, 等. 长江上游铜鱼产卵流速特性分析[J]. 水力发电, 2017, 43 (7) : 5-9.
- [28] 梁福庆. 三峡库区生态环境建设成效与保护对策[J]. 人民长江, 2010, 41 (13) : 28-32.
- [29] ZHANG X, DONG Z, GUPTA H, et al. Impact of the Three Gorges Dam on the Hydrology and Ecology of the Yangtze River[J]. Water, 2016, 8(12): 590.
- [30] 王建柱. 三峡大坝的修建对库区动物的影响[D]. 北京: 中国科学院研究生院(植物研究所), 2006.
- [31] FAN X, WEI Q, CHANG J, et al. A Review on Conservation Issues in the Upper Yangtze River: A Last Chance for a Big Challenge: Can Chinese Paddlefish (*Psephurus gladius*), Dabry's Sturgeon(*Acipenser dabryanus*) and Other Fish Species Still be Saved?[J]. Journal of Applied Ichthyology, 2006, 22(S1): 32-39.
- [32] 杨志, 唐会元, 朱迪, 等. 三峡水库 175m 试验性蓄水期库区及其上游江段鱼类群落结构时空分布格局[J]. 生态学报, 2015, 35 (15) : 5064-5075.
- [33] 董纯, 杨志, 龚云, 等. 三峡库区干流鱼类资源现状与物种多样性保护[J]. 水生态学杂志, 2019, 40 (1) : 15-21.
- [34] 屈波, 谢世友, 邹红. 三峡库区生态安全问题与对策[J]. 生态环境, 2004 (1) : 146-148.
- [35] 叶麟, 谭路, 蔡庆华. 三峡水库水生态系统健康评价[J/OL]. 水生生物学报, 2020: 1-7[2020-04-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1230.Q.20200122.1635.014.html>.
- [36] 王宝强, 刘学勤, 彭增辉, 等. 三峡水库底栖动物群落结构特征及其与蓄水前资料的比较[J]. 水生生物学报, 2015, 39 (5) : 965-972.
- [37] 王洪铸, 刘学勤, 王海军. 长江河流—泛滥平原生态系统面临的威胁与整体保护对策[J/OL]. 水生生物学报, 2020: 1-26[2020-07-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1230.Q.20200122.1657.038.html>.
- [38] 张麟, 周海翔, 王小强. 寻觅江豚: 2012 年长江淡水豚考察[J]. 生命世界, 2013 (5) : 32-37.
- [39] 王琦琪. 农业农村部举行发布会 长江江豚数量约为 1012 头, 保护工作将进一步升级[J]. 农村工作通讯, 2018 (15) : 60.
- [40] 潘保柱. 长江泛滥平原水体底栖动物的宏观生态格局研究[D]. 武汉: 中科院水生生物研究所, 2009.
- [41] 陈凤先, 王占朝, 任景明, 等. 长江中下游湿地保护现状及变化趋势分析[J]. 环境影响评价, 2016, 38 (5) : 43-46.
- [42] ZHONG X, ZHOU S, ZHAO Q. Spatial Characteristics and Potential Ecological Risk of Soil Heavy Metals Contamination in the Yangtze River Delta: A Case Study of Taicang City, Jiangsu Province[J]. Scientia Geographica Sinica, 2007, 27(3): 395.
- [43] 潘保柱, 王海军, 梁小民, 等. 长江故道底栖动物群落特征及资源衰退原因分析[J]. 湖泊科学, 2008 (6) : 806-813.
- [44] 陈秀粉, 夏炜, 潘保柱, 等. 长江中游宜昌至武汉段底栖动物群落结构特征研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2017, 53 (5) : 973-981.
- [45] 周春煦. 长江口盐水入侵特征及规律[J]. 长江科学院院报, 2018, 35 (12) : 28-33.
- [46] 杨颖, 徐轲. 近 30 a 来长江口海域生态环境状况变化趋势分析[J]. 海洋科学, 2015, 39 (10) : 101-107.
- [47] 孔定江, 李道季, 吴莹. 近 50 年长江口的主要有机污染的记录[J]. 海洋湖沼通报, 2007 (2) : 94-103.
- [48] 王远超, 梁翠, 钱薇薇, 等. 基于生态通道模型的长江口及邻近海域生态系统能流动态分析[J]. 海洋科学, 2018, 42 (5) : 54-67.
- [49] 杨红, 刘广平. 长江口生态系统服务功能价值评估[J]. 海洋环境科学, 2008, 27 (6) : 624-628.
- [50] QIU C, ZHU J. Influence of Seasonal Runoff Regulation by the Three Gorges Reservoir on Saltwater Intrusion in the Changjiang River Estuary[J]. Continental Shelf Research, 2013, 71: 16-26.
- [51] 陈耀辉, 刘守海, 何彦龙, 等. 近 30 年长江口海域生态系统健康状况及变化趋势研究[J]. 海洋学报, 2020, 42 (4) : 55-65.
- [52] 蔡文倩, 孟伟, 刘录三, 等. 长江口海域底栖生态环境质量评价: AMBI 和 M-AMBI 法[J]. 环境科学, 2013, 34 (5) : 1725-1734.
- [53] LI Z, WANG Z, PAN B, et al. Analysis of Controls Upon Channel Planform at the First Great Bend of the Upper Yellow River, Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Geographical Sciences, 2013, 23(5): 833-848.
- [54] CHANG G, LI L, ZHU X, et al. Influencing Factors of Water Resources in the Source Region of the Yellow River[J]. Journal of Geographical Sciences, 2007, 17(2): 131-140.
- [55] 郑子彦, 吕美霞, 马柱国. 黄河源区气候水文和植被覆盖变化及面临问题的对策建议[J]. 中国科学院院刊, 2020, 35 (1) : 61-72.
- [56] 钱云平, 林银平, 金双彦, 等. 黄河河源区水资源变化分析[J]. 水利水电技术, 2004 (5) : 8-10.
- [57] 吴海莲, 刘生明. 黄河源区生态环境形势[J]. 草业与畜牧, 2011 (7) : 42-43.
- [58] 胡光印, 董治宝, 谔军峰, 等. 黄河源区 1975—2005 年沙漠化时空演变及其成因分析[J]. 中国沙漠, 2011, 31 (5) : 1079-1086.
- [59] 贺有龙, 周华坤, 赵新全, 等. 青藏高原高寒草地的退化及其恢复[J]. 草业与畜牧, 2008 (11) : 1-9.
- [60] 王根绪, 李娜, 胡宏昌. 气候变化对长江黄河源区生态系统的影响及其水文效应[J]. 气候变化研究进展, 2009, 5 (4) : 202-208.
- [61] 张军燕, 张建军, 杨兴中, 等. 黄河上游玛曲段春季浮游生物群落结构特征[J]. 生态学杂志, 2009, 28 (5) : 983-987.
- [62] 洪欢. 黄河源干流梯级水电开发对河流形态及鱼类多样性的可能影响[D]. 昆明: 云南大学, 2016.
- [63] 余昭辉, 夏建新, 任华堂. 黄河甘宁蒙河段突发水污染事故预警模型[J]. 人民黄河, 2014, 36 (4) : 37-40.
- [64] 黄丽华, 胡志瑛, 舒艳, 等. 黄河中上游能源化工区重点产业发展战略生态风险评价[J]. 四川环境, 2011, 30 (2) : 57-63.
- [65] ZHU Y, WANG L, ZHAO X, et al. Accumulation and Potential Sources of Heavy Metals in Soils of the Hetao Area, Inner Mongolia, China[J]. Pedosphere, 2020, 30(2): 244-252.
- [66] 张红武, 方红卫, 钟德钰, 等. 宁蒙黄河治理对策[J]. 水利水电技术, 2020, 51 (2) : 1-25.
- [67] 冯慧娟. 黄河干流宁夏蒙河段鱼类群落多样性和生长特征研究[D]. 西安: 西北大学, 2010.
- [68] 韩艳利, 王新功, 黄文海, 等. 黄河黑山峡不同开发方案对鱼类的影响[J]. 水资源保护, 2011, 27 (5) : 92-96.
- [69] 冯慧. 黄河上游龙羊峡—刘家峡河段水生生物多样性研究及生态系统健康评价[D]. 西安: 西北大学, 2009.
- [70] 许炯心. 黄河中游绿水系数变化及其生态环境意义[J]. 生态学报, 2015, 35 (22) : 7298-7307.
- [71] 胡一三, 张红武, 刘贵芝, 等. 黄河下游游荡型河段河道整治[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1998.
- [72] 李小玲, 朱进锋, 黄玉景. 黄河中游生态环境建设探讨[J]. 河南科技, 2013 (5) : 163.
- [73] 张金良, 刘生云, 李超群. 论黄河下游河道的生态安全屏障作用[J]. 人民黄河, 2018, 40 (2) : 21-24.
- [74] LI J, JIANG E, XU L. Water and Sediment Graded Management to Alleviate the "Secondary Suspended River" in the Lower Reaches of the Yellow River[C]// MATEC Web of Conferences. Les Ulis: EDP Sciences, 2018, 246: 01037.
- [75] 朱国清, 赵瑞亮, 胡振平, 等. 小浪底水库调水调沙对黄河中游鱼类及生态敏感区的影响[J]. 水生态学杂志, 2012, 33 (5) : 7-12.
- [76] 谢元, 蒋晓辉, 王婷, 等. 黄河典型支流入干区底栖动物群落结构特征比较研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2018, 54 (5) : 1067-1076.
- [77] 郑珊, 王开荣, 吴保生, 等. 黄河河口冲淤演变及治理研究综述[J]. 人民黄河, 2018, 40 (10) : 6-11, 16.
- [78] 中华人民共和国水利部. 中国河流泥沙公报 2015[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016: 24-35.
- [79] SHENG H, WAN J, YIN S, et al. Study on Dynamic Change of Wetlands in Yellow River Estuary Based on Remote Sensing and GIS Technology[J]. Proceedings of SPIE the International Society for Optical Engineering, 2006, 6418:1-7.
- [80] 顾家伟. 黄河营养盐输送与河口近海生态健康研究进展[J]. 人民黄河, 2018, 40 (2) : 81-87.
- [81] 王新艳, 闫家国, 白军红, 等. 黄河河口滨海湿地水文连通对大型底栖动物生物连通的影响[J]. 自然资源学报, 2019, 34 (12) : 2544-2553.
- [82] 张芮, 徐宾铎, 薛莹, 等. 黄河口及其邻近水域鱼类生物完整性评价[J]. 中国水产科学, 2017, 24 (5) : 946-952.
- [83] GUO B, ZHOU Y, ZHU J, et al. Spatial Patterns of Ecosystem Vulnerability Changes During 2001-2011 in the Three-River Source Region of the Qinghai-Tibetan Plateau, China[J]. Journal of Arid Land, 2016, 8(1): 23-35.

图片来源 (Source of Figure):

图 1 由作者绘制。

(编辑 / 刘玉霞)