

黄河内蒙古河段水文情势变化及生态效应初探

米玮洁¹, 张 舜², 胡 俊¹, 高少波¹, 胡菊香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, 湖北 武汉 430079;

2. 武汉工程大学, 湖北 武汉 430205)

摘要: 选择月均流量、日均流量变幅、极端流量和脉冲延时4个水文情势指标, 采用IHA-RVA(水文情势变化指标-变化范围法)分析黄河干流内蒙古河段水文情势的时空变化特征, 辨析黄河鱼类生态习性与径流组分的响应关系, 探讨内蒙古河段流量过程、极端流量变化的生态效应。黄河干流上游河段水利工程运行后, 内蒙古河段的水文情势明显改变, 进而改变该河段的生态水文联系过程。黄河内蒙古河段枯水期月均流量增加(1、2月份月均流量增幅超过70%)、最小日均流量增加(石嘴山断面最小日流量增幅超过50%), 保障了河道流水栖息生境, 有利于鱼类越冬。该河段日均流量变幅降低, 有利于粘性卵孵化。但是内蒙古河段汛期月均流量减小(7–10月份月均流量降幅接近50%), 大、小洪水持续时间缩短, 不利于扩展横向栖息地; 最大流量出现时间在上游河段延迟超过2个月、在中下游河段提前约1个月, 洪水脉冲刺激时间紊乱可能影响鱼类繁殖行为。研究可为黄河内蒙古河段鱼类栖息地保护以及上游水库生态调度提供技术支持。

关键词: 流量过程; 水文情势; 鱼类; 生态效应; 黄河内蒙古河段

中图分类号: X143 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2024)00-0042-08

黄河是中国的第2大河, 流域水资源丰富。水资源开发为黄河流域带来福祉的同时, 也改变了河流的水文、水系特征以及河流的理化性质, 干扰了自然状态下河流泥沙和生源物质的输移, 进而对生物和生态环境产生影响, 并产生连带的生态效应(李想等, 2021)。近30年来, 黄河鱼类物种多样性和资源量均呈明显下降趋势, 黄河水量、栖息生境、纵向连通性的改变是导致鱼类变化的主要原因(茹辉军等, 2010)。水文情势在河流和河漫滩的生物群落多样性形成和生态系统完整性维持方面具有极其重要的作用。河流年内周期性丰枯变化, 造成河流–河漫滩系统呈现干涸–枯水–涨水–侧向漫溢–河滩淹没的时空变化特征, 对丰富多样的栖息地形成起着关键性作用。这种水文过程与生物过程之间形成了相互适应、调节的耦合关系(杜强和王东胜, 2005)。当河道基流减少甚至断流时, 土著生物种类减少(Kupferberg et al, 2012), 陆生植物入侵河岸带(Stromberg et al, 2007); 当坝下

泄水改变河流的丰枯节律后, 生物种群数量和物种丰度减少(Casas-Mulet et al, 2015; Schmutz et al, 2015)。

内蒙古龙羊峡–刘家峡河段是黄河上游水电梯级开发最为集中的河段, 上游水电站运行导致中下游水文情势过程发生了显著改变。为此, 本文选择黄河内蒙古河段, 结合龙羊峡、刘家峡水电站的运行, 采用生态水文情势指标, 深入分析该河段流量变化的时空特征, 结合黄河干流鱼类生态习性与径流组分响应关系, 探讨上游两座水电站建设运行对内蒙古河段生态水文效应的影响, 旨在为该河段栖息地保护和上游水库生态调度提供技术支持。

1 研究区域概况

黄河内蒙古河段是黄河上游的最下段, 地处黄河流域最北端, 从右岸宁蒙界都思兔河入黄口处入境, 于准格尔旗马栅乡出境, 河段长度为843.5 km。受两岸地形控制, 该河段形成峡谷与宽河段相间出现的格局。黄河内蒙古河段是流经区域的重要水源, 黄河鄂尔多斯段黄河鲢国家级水产种质资源保护区几乎覆盖了整条河段。

龙羊峡和刘家峡水库是黄河上游具有重要调节作用的水利工程。其中, 刘家峡水库于1968年蓄水, 龙羊峡水库于1986年蓄水。根据黄河干流龙羊峡、刘家峡水库的联合调度过程, 将研究时段划分为3个阶段: 1967年以前, 黄河内蒙古河段为自然状态;

收稿日期: 2022-05-20 修回日期: 2023-06-15

基金项目: 国家自然科学基金(U21A2002:42007433)。

作者简介: 米玮洁, 1980年生, 女, 副研究员, 主要从事水生生态研究工作。E-mail: miweijie@mail.ihe.ac.cn

通信作者: 胡俊, 1977年生, 男, 研究员, 主要从事生态水文与水环境研究。E-mail: jhu@mail.ihe.ac.cn

1968–1985年,刘家峡水库运行阶段;1986年以后,刘家峡、龙羊峡水库联合运行阶段。

2 研究方法

2.1 径流组分

河流流量是河流生态系统演变的关键因子。以受人类活动影响较小的1957年石嘴山断面日径流过程线(图1)为参考样本,日径流过程线在年内可分为低流量、流量脉冲、高流量及洪水等不同组分,每一个流量组分对河流形态、生态过程都起着关键性作用。

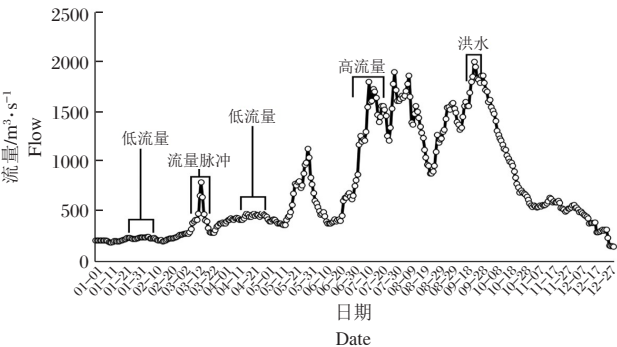


图1 石嘴山断面1957年日径流过程线
Fig.1 Daily flow at Shizuishan hydrological station in 1957

2.2 分析方法

采用水文情势变化指标-变化范围法(Indicators of Hydrologic Alteration-Range of Variability Approach, IHA-RVA),通过选择并计算关键生态水文指标的变化程度(Richter et al, 1998),根据生态水文联系特征,分析河流水文情势的改变趋势,探讨水文情势改变对河流水生生物尤其是鱼类生长与繁殖的影响。该方法目前主要用于分析水文情势变化对鱼类繁殖的影响(曹艳敏等,2019;黎晓东等,2021)。

本文基于黄河内蒙古河段石嘴山、三湖河口、头道拐断面水文站50年以上长序列的日水文数据,选择月均水量等4个与水生态系统关联较强的指标构建水文情势变化指标IHA(表1)。通过分析1958–2014年日流量数据,统计不同断面1958–1967年、1968–1985年、1986–2014年的IHA参数,以未受人类活动影响的自然状态(1958–1967年)为基准,计算每个参数的水文变化率及水文综合改变度,分析刘家峡水库运行(1968–1985年)、刘家峡–龙羊峡水库联合运行(1986–2014年)条件下该河段的生态水文情势改变程度。

表1 IHA参数以及对水生生态系统的影响
Tab.1 IHA parameters and impacts on aquatic ecosystems

IHA 指标	参数	对水生生态系统影响
月均水量	各月流量均值(12个参数)	(1)影响水生生物的栖息地环境
		(2)低流量维持生态系统最基本生态功能
年极端流量及出现时间	年最小、最大1、3、7、30、90日流量均值(10个参数) 年最大、最小1日流量发生时间(2个参数)	(3)高流量改善水生生物栖息生境
		(1)增强横向连通性,增加栖息地多样性
		(2)促进河流和漫滩的养分交换,增加养分输入
		(3)影响漫滩植物群落生长与分布
高、低脉冲延时	每年发生大洪水、小洪水持续天数(2个参数) 每年发生低流量、极低流量持续天数(2个参数)	(4)是鱼类迁徙、产卵的信号
		(1)影响多样的栖息生境维持时间
		(2)影响陆源养分输入的维持时间
		(3)影响鱼类产卵、鱼苗成活
流量变幅	1、3、5日日均流量变幅(3个参数)	(4)影响漂流性卵苗孵化
		(1)影响粘性卵苗孵化

注:大洪水定义为大于干扰前 $P=10\%$ 日均流量;小洪水定义为介于干扰前 $P=10\%\sim 30\%$ 日均流量;低流量定义为小于干扰前 $P=80\%$ 日均流量;极低流量定义为小于干扰前 $P=90\%$ 日均流量。
Note: A major flood is defined as a flood that is greater than the average daily flow before the disturbance ($P=10\%$); Small flood is defined as the average daily flow between $P=10\%$ and 30% before disturbance; Low flow is defined as less than the average daily flow before interference ($P=80\%$); Very low flow is defined as less than the average daily flow before interference ($P=90\%$).

2.3 鱼类资源调查

黄河内蒙古河段鱼类资源调查以现场捕捞为主,辅以市场调查、走访渔民等方式,现场捕捞渔具以水下延绳钓钩为主,辅以虾笼、刺网等。

3 结果与分析

根据IHA-RVA方法的计算结果,受上游水电站运行的影响,黄河内蒙古河段1–2月和7–10月月均流量最大、最小流量出现时间、小洪水和低流量、极低流量持续天数等属于高度改变指标;最大、最小1、3、5、30、90日日均流量属于中度–高度改变指标。水文综合改变度在不同断面表现出差异,从内蒙古河段上游至下游(石嘴山断面–三湖河口断面–头道拐断面),水文情势的综合改变程度呈减弱的趋势。

3.1 流量过程变化特征

3.1.1 月均流量变化 与自然状态(1958–1967年)相比,1968–1985年丰水期(6–11月)内蒙古河段月均流量降低,1986–2014年月均流量进一步降低,其中7–10月月均流量降低近50%。枯水期(12月至次年5月)

与自然状态相比,1968–1985年内蒙古河段月均流量增加,其中1、2月月均流量增加超过70%;与1968–1985年相比,1986–2014年月均流量变化不明显(图2)。

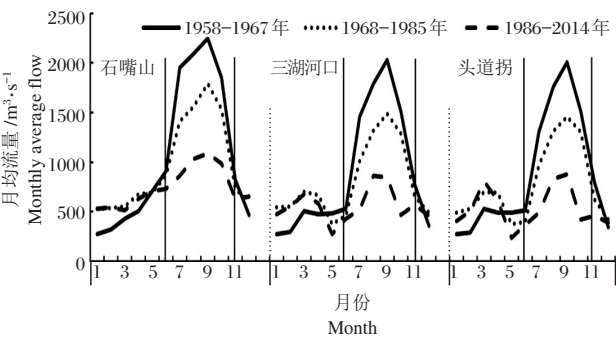


图2 黄河内蒙古河段月均流量的时空变化特征
Fig.2 Spatial and temporal variation of the monthly average flow in Inner Mongolia reach of the Yellow River

自然状态下(1958–1967年)内蒙古河段从上游至下游(石嘴山断面至头道拐断面)丰水期(6–11月)月均流量逐渐降低,1968–1985年、1986–2014年从上游至下游月均流量逐渐降低;枯水期(12月至次年5月)各断面月均流量无明显差异;但1968–1985年、1986–2014年3月下游三湖河口、头道拐断面月均流量高于上游石嘴山断面。

3.1.2 流量变幅变化 与自然状态(1958–1967年)相比,1968–1985年内蒙古河段1、3、5日日均流量变幅均有所降低,1986–2014年日均流量变幅进一步降低(表2)。自然状态下,内蒙古河段石嘴山至三湖河口断面日均流量变幅降低,三湖河口至头道拐断面流量变幅增加;1968–1985年、1986–2014年石嘴山与三湖河口断面的流量变幅变化不明显,三湖河口到头道拐断面流量变幅增加。

表2 黄河内蒙古河段流量变幅特征 m³/s
Tab.2 Flow alteration characteristics of different time spans in Inner Mongolia reach of the Yellow River

流量变幅	断面	1958–1967年	1968–1985年	1986–2014年
1日流量变幅	石嘴山	-93.2~138.3	-51.9~82.1	-47.7~44.6
	三湖河口	-90.9~54.5	-73.6~66.6	-39.9~46.0
	头道拐	-138.2~88.3	-150.3~48.4	-116.0~29.6
3日流量变幅	石嘴山	-136.0~215.1	-78.1~104.3	-55.6~71.5
	三湖河口	-104.1~155.6	-123.8~107.2	-72.9~57.1
	头道拐	-332.0~138.8	-232.6~79.5	-206.6~55.7
5日流量变幅	石嘴山	-198.1~328.4	-118.2~168.7	-89.9~111.1
	三湖河口	-175.0~263.6	-184.8~147.0	-130.2~88.9
	头道拐	-515.3~216.5	-264.3~127.2	-242.7~96.4

3.2 极端流量变化特征

3.2.1 日均流量极值变化 与自然状态(1958–1967年)相比,1968–1985年内蒙古河段1、3、7、30、90日最大日均流量均降低,降幅约20%;1986–2014年最大日均流量进一步降低,与自然状态(1958–1967年)相比,降幅超过50%。1968–1985年内蒙古河段最小日均流量的变化特征在不同断面表现出差异,石嘴山断面最小日均流量增加,增幅达59%~97%;三湖河口断面除7日最小日均流量降低外,其余均增加;头道拐断面除30日、90日最小日均流量增加外,其余均降低。1986–2014年最小日均流量较1968–1985年进一步降低(图3)。

3.2.2 极值出现时间变化 自然状态下(1958–1967年),石嘴山断面年最小流量出现在第2天;1968–1986年最小流量出现时间差异不大,在第1天;1987–2014年最小流量推迟到第74天。自然状态下(1958–1967年),三湖河口断面年最小流量出现在第138天;1968–1986年最小流量出现时间差异不大,在第143天;1987–2014年最小流量提前到第130天。自然状态下(1958–1967年),头道拐断面年最小流量出现在第140天;1968–1986年最小流量出现时间差异不大,在第145天;1987–2014年最小流量提前到第133天(图4)。

自然状态下(1958–1967年),石嘴山断面年最大流量出现在第208天;1968–1986年最大流量延迟至第260天;1987–2014年最大流量保持在第260天。自然状态下(1958–1967年),三湖河口断面年最大流量出现在第262天;1968–1986年最大流量出现时间差异不大,在第263天;1987–2014年最大流量提前到第229天。自然状态下(1958–1967年),头道拐断面年最大流量出现在第263天;1968–1986年最大流量出现时间差异不大,在第264天;1987–2014年最大流量提前到第234天(图4)。

3.2.3 流量脉冲延时变化 自然状态下(1958–1967年),内蒙古河段年大洪水持续时间一般超过40 d,年小洪水持续时间约25 d;1968–1985年该河段年大、小洪水持续时间分别降低至26 d和23 d左右;1986–2014年进一步降低至4 d和10 d左右(图5)。自然状态下(1958–1967年),内蒙古河段年低流量持续时间超过60 d,年极低流量持续时间超过40 d;1968–1985年持续时间分别降低至26和15 d以下;1986–2014年年低流量、极低流量持续时间有所增加。

自然状态下(1958–1967年),黄河内蒙古河段上游到下游年大洪水持续时间呈先降低后增加的趋势;1968–1985年、1986–2014年3个断面年大洪水持续时间没有明显差异。自然状态下从上游到下游年小洪水

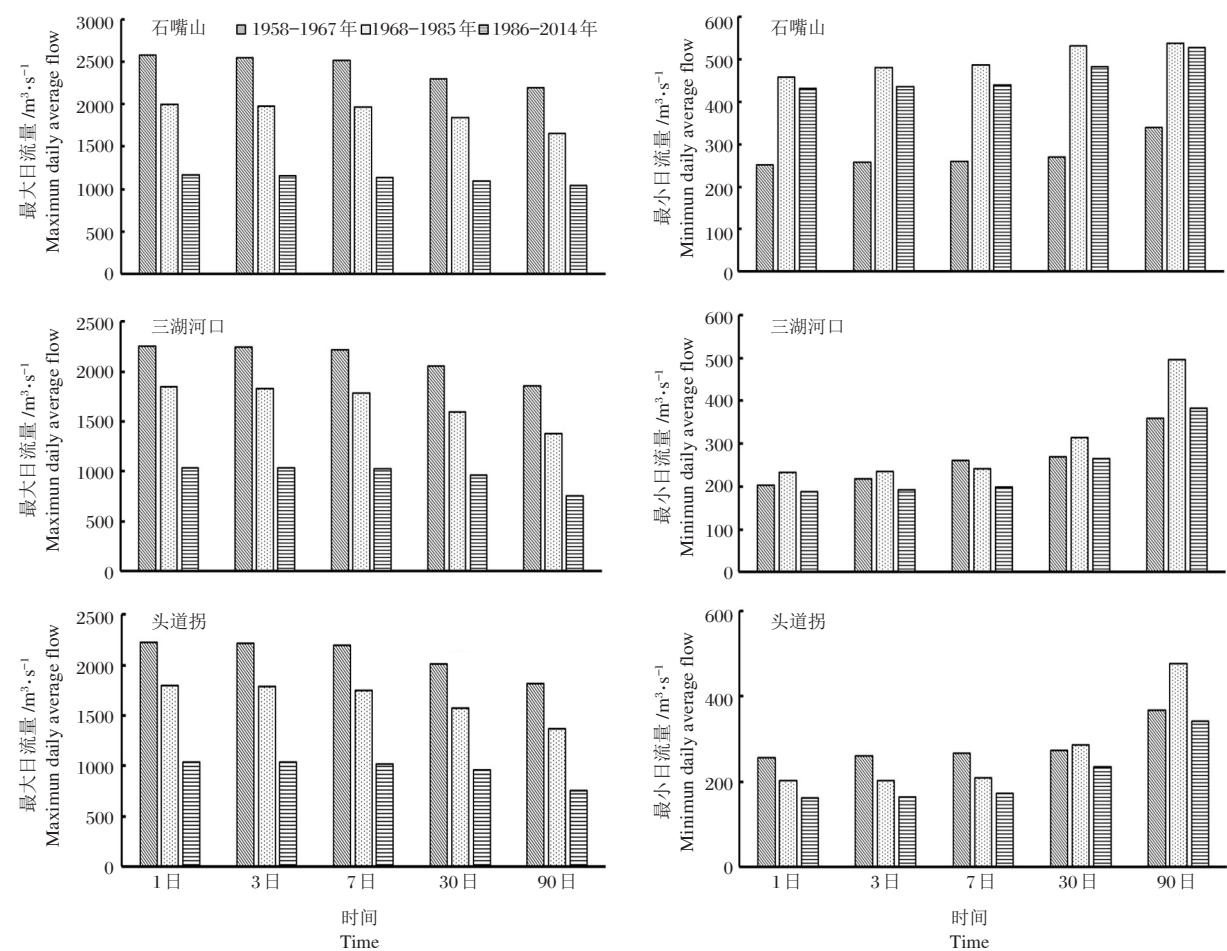


图3 黄河内蒙古河段日均流量极值的时空变化特征

Fig.3 Spatial and temporal variations of daily average flow extremes in Inner Mongolia reach of the Yellow River

持续时间呈先增加后降低的趋势;1968-1985年断面年小洪水持续时间没有明显差异;1986-2014年呈先增加后降低。自然状态下从上游到下游年低流量持续时间呈先降低后增加的趋势,年极低流量持续时间呈增加趋势;1968-1985年、1986-2014年从上游到下游年低流量、年极低流量持续时间的变化趋势保持一致。

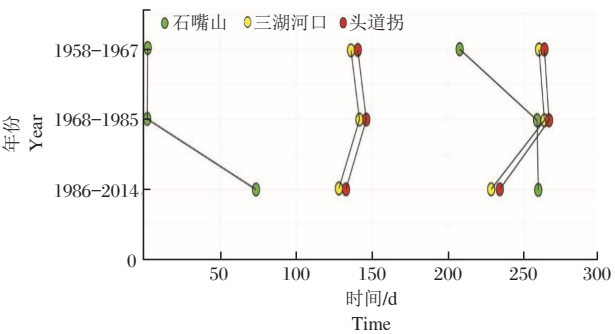


图4 黄河内蒙古河段极端流量出现时间的时空变化特征

Fig.4 Spatial and temporal variations in the occurrence time of daily average flow extremes in Inner Mongolia reach of the Yellow River

3.3 鱼类资源特征

本研究现场共调查到鱼类28种。鲫、赤眼鳟、鲂居渔获物重量的前3位,分别占渔获物重量的19.94%、17.36%、12.47%;其后依次为草鱼(10.43%)、麦穗鱼(10.06%)、鲤(7.64%)、鳊(5.34%)、兰州鲇(4.70%)、乌鳢(3.98%)、圆筒吻鲈(1.29%)。这10种鱼合计占渔获物重量的93.23%,是该河段主要的捕捞对象。通过对该河段主要捕捞对象的生物学测定分析表明,中小型鱼类如赤眼鳟、麦穗鱼、鲫、鲮等在渔获物中数量占比较大,年龄构成以1~2龄鱼为主,3龄以上鱼类所占比例不大,内蒙古河段鱼类资源呈小型化、低龄化趋势。

2009年宁蒙河段共调查到鱼类24种,小型鱼类占2/3,为该河段鱼类构成的主体。该河段鱼类群落多样性偏低、稳定性不高,优势种主要有鲤、鲂、瓦氏雅罗鱼、鲫、棒花鱼;常见种主要有麦穗鱼、兰州鲇、草鱼、鲮、黄魮鱼、高体鲃、黄河鲇。鱼类种群年龄结构低龄化、个体小型化严重(冯慧娟,2010)。2013-2016年在黄河干流内蒙古河段共采集鱼类

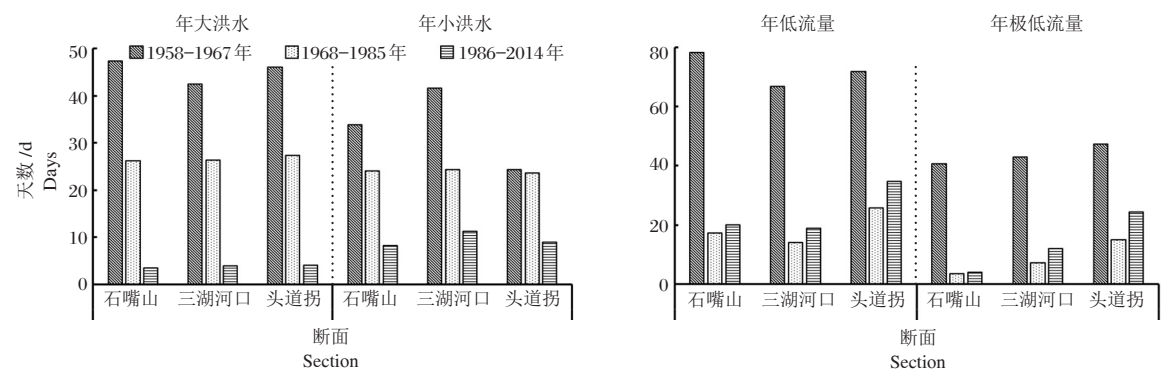


图5 黄河内蒙古河段极端流量延时的时空变化特征

Fig.5 Spatial and temporal variations of the duration of daily average flow extremes in Inner Mongolia reach of the Yellow River

20种,分别为鲫、鲤、草鱼、鲢、鳙、赤眼鳟、寡鳞鲃、鳊、似鲮、高体鳊、花鲢、麦穗鱼、南方鲇、圆筒吻鲈、棒花鱼、平鳍鳅、泥鳅、鲇、黄河鲇、圆尾斗鱼(景升利,2020)。

结合历史资料与现状分析,黄河内蒙古河段鱼类以小型鱼类为主,该河段2009年优势种为鲤、鲇、瓦氏雅罗鱼、鲫、棒花鱼,而此次调查中鲫、赤眼鳟、鲇、草鱼、麦穗鱼为渔获物生物量主要组成部分,近年来该河段鱼类组成发生了较大的变化。

4 讨论

流量过程对河流生态系统中的水生生物尤其是鱼类至关重要,是鱼类选择栖息地、繁殖行为调节及生长发育的决定性因素。水文过程年度内呈现出不同的生态流组份,如极端低流量、低流量、高流量、小洪水、大洪水等。这些组份具有不同的流量特征,包括流量、出现时间、频率、持续时间及变化速率等(葛怀凤,2013;张洪波等,2012)。水文指标与生态因子之间存在紧密的联系,例如流量过大易冲走鱼类饵料,但促进水系连通;流量过小易出现河段脱水现象,破坏物种的生存环境;峰值流量出现时间点的改变会扰乱鱼类的产卵行为等(陈凯麒和陶洁,2015);鱼类捕捞产量、鱼苗丰度、鱼卵密度与高流量脉冲历时、涨水率等特征有关(班璇等,2019;陈诚等,2020)。Poff和Zimmerman(2010)综述分析流量变化与生态响应的关系时发现,不管流量是增加还是减小,鱼类丰度、多样性等都会降低。

4.1 流量均值过程变化的生态效应

流量均值过程变化主要影响水生生物栖息地环境特征,如湿周、流速、栖息地面积等。其中,月流量反映不同生命周期水流的流量水平,低流量是维持河流生态系统最基本生态功能的需求。流量过程紊

乱增加栖息生境的不稳定性,打乱生物的生命周期与节律等;流量过程均化降低栖息生境多样性,脉冲减弱影响鱼类生长与繁殖。研究表明三峡水库蓄水后多年平均流量减少,中华鲟和四大家鱼的产卵量下降(郭文献等,2011);蓄水后河道洪水过程趋于均一化和单一化,使四大家鱼产卵的信号减弱或消失(李清清等,2012)。塔里木河中水库建设运行导致干流多数月份的月均流量减少,年发生低流量次数增加,影响洪泛区树林生长,并对下游河道水生生物栖息生境等产生不利影响(薛联青等,2017)。

对黄河干流内蒙古河段流量均值过程的变化分析发现,上游刘家峡水库运行后,内蒙古河段汛期月均流量减小、枯期月均流量增加,流量过程变异程度降低,呈坦化趋势;刘家峡-龙羊峡水库联合运行后加剧了坦化趋势。与林梦然等(2019)研究结果类似,受龙羊峡水库径流调节作用影响,坝下河段年内径流过程趋于一致化。上游水利工程运行导致黄河内蒙古河段汛期流量减小,流量变异程度降低,使得鱼类栖息地数量、多样性下降。

11月至次年3月是黄河的低流量过程,也是鱼类越冬期。上游水利工程运行导致黄河内蒙古河段11月至次年3月低流量增加,低流量、极低流量持续天数减少。枯期流量增加有利于鱼类越冬。进一步分析日均最小流量的变化发现,水电站运行尤其是刘家峡-龙羊峡水库联合运行后,内蒙古河段上游最小日均流量增加,下游最小日均流量下降,越冬期流量增加对鱼类越冬的有利影响在上游更明显。黄河下游花园口河段,受小浪底水库运行的影响,冬季低流量减少,降低了河流低洼处的水深,不利于鱼类越冬(蒋晓辉等,2010)。

黄河内蒙古河段现场调查的10种主要捕捞鱼类中,鲫、鲇、麦穗鱼、鲤、兰州鲇5种均为产粘性卵鱼类,粘性卵附着在基质上,水位波动对鱼类产卵及其

卵孵化十分重要。通常,粘性卵孵化时间需3~7 d,卵孵化后鱼苗需要3~4 d稳定水流过程。黄河兰州鲇产卵期多年平均流量日变幅为 $\pm 50 \text{ m}^3/\text{s}$,黄河鲤产卵期多年平均流量日变幅为 $\pm 100 \text{ m}^3/\text{s}$ (王东胜等,2010)。上游水利工程运行后,黄河内蒙古河段日均流量变幅降低,水流条件趋于稳定,有利于粘性卵鱼类孵化。

4.2 极端流量变化的生态效应

极端流量变化主要包括极端日均流量、极端流量发生时间、频率以及延时变化等特征。极端流量发生时间通常是水生生物特定生命周期或生命活动的信号,持续时间是影响生物栖息和产卵过程的关键因素,发生频率及变化承载着水生生物生存与繁衍的周期信号(张洪波,2012)。例如,高流量改善生境条件,洪水流量增强河道与湿地、支流的连通性,促进了主河道与河漫滩区的营养物质交换,有利于扩展栖息地面积和食物来源,形成浅滩、沙洲等新栖息地,为仔鱼或幼鱼生长提供良好的繁育所(Thomaz et al,2007)。洪水的发生时机和持续时间是很多鱼类完成生活史的必要条件,对鱼类的繁殖与生长有着重要作用(Junk,1982)。研究表明,长江宜昌江段涨水过程有效刺激四大家鱼自然繁殖活动(李博等,2021),持续涨水时间是影响四大家鱼繁殖的重要生态水文参数(徐薇等,2020)。因此,洪水特征的变化对鱼类生长繁殖产生显著影响。例如,三峡水库对中小洪水的调度削弱了天然洪峰过程,导致四大家鱼产卵繁殖所需的水文刺激减弱,三峡水库运行初期长江四大家鱼资源量持续下降(李朝达等,2021)。流量低脉冲历时和流速高脉冲历时的改变,也不利于刺激四大家鱼产卵繁殖活动(曹艳敏,2019)。

应用IHA方法对黄河源区(周毅等,2017)、上游(李建等,2013)及中下游河段(常俊超,2022)的水文情势变化分析发现,黄河源区中大洪水事件逐渐消失,流量结构组成趋于单一,源区生物多样性呈下降趋势;兰州段水文情势高度改变,对该河段水沙、生物种群数量、幼苗比例、栖息地环境等产生较大影响;花园口河段高流量事件在流量量级、历时及频次3个方面均有所减少。根据黄河内蒙古河段极端流量的变化特征分析,上游水利工程建成运行后,减少了该河段年大洪水、年小洪水的持续时间,并对年最大流量出现时间有较大影响:刘家峡水库运行后石嘴山断面年最大流量出现时间延后;刘家峡-龙羊峡水库联合运行后三湖河口、头道拐断面年最大流量出现时间提前。林梦然等(2019)研究发现,龙羊峡

水库径流调节作用导致坝下河段年最大流量显著减小且出现时间提前,年最小流量显著增大且出现时间延后。

黄河4~6月的高流量脉冲刺激鱼类产卵,7~10月的高流量过程淹没河漫滩区,对鱼类产卵、孵化、迁徙等有关键影响。小洪水脉冲虽然不是黄河鲤亲鱼产卵的必要条件,但一定水流刺激可以促进亲鱼产卵,而且小脉冲洪水可缩短黄河鲤产卵时间,提高亲鱼产卵率及鱼苗成活率(王瑞玲等,2020)。黄河内蒙古河段主要捕捞对象中赤眼鲮、圆筒吻鲈为产漂流性卵的小型鱼类,其繁殖对涨水的依赖程度较小(黎明政等,2019)。因此,石嘴山断面年最大流量出现时间延后,对鱼类繁殖行为有一定影响;但对于内蒙古河段的主要鱼类而言,大、小洪水的持续时间减少,导致鱼类产卵栖息地减少、幼鱼食物来源减少,不利于幼鱼生长。黄河下游河段水文情势变化也表现出相似的生态效应:4~6月流量脉冲消失或减少,黄河鲤产卵刺激减弱,产卵缺乏足够的产卵栖息地;7~10月漫滩洪水消失,黄河鱼类失去了从河滩地获得食物和栖息地的机会(蒋晓辉等,2010)。

生态水文联系是生态水文学研究的重点,可探索水利工程建设对关键物种栖息地、水力学要素和径流情势、物种群落等的影响特征,促进水利工程从传统防洪兴利调度向生态调度转变(夏军等,2020)。利用IHA等水文改变指标体系可以简便有效地评估水文情势变化及其生态效应(程俊翔等,2018)。生态水文情势改变对河流中产粘性卵鱼类产卵及生长、河流栖息地多样性、鱼类索饵越冬的影响,是生态水文学研究的难点及发展方向。本研究通过IHA-RVA方法辨析了黄河内蒙古河段水文情势改变程度较大的水文因子,初步揭示了水文情势改变对河流水生生物尤其是鱼类生长与繁殖的影响。但本研究缺少生态方面的数据补充和验证,缺乏水文因子与鱼类的直接定量分析,这些是下一步需要开展研究的内容。

参考文献

- 班璇, Panayiotis D, 吕晓蓉, 等, 2019. 长江葛洲坝下游鱼类资源量的关键水文指标识别[J]. 水利水电科技进展, 39(1): 15-20.
- 曹艳敏, 毛德华, 邓美容, 等, 2019. 日调节电站库区生态水文情势评价——以湘江干流衡阳站为例[J]. 长江流域资源与环境, 28(7): 1602-1611.
- 常俊超, 2022. 基于IHA/RVA法的黄河中游环境流量组分与水文情势变化研究[J]. 水电能源科学, 40(2): 17-21.

- 陈诚,黎明政,高欣,等,2020. 长江中游宜昌江段鱼类早期资源现状及水文影响条件[J]. 水生生物学报,44(5):1055–1063.
- 陈凯麒,陶洁,2015. 河流生物栖息地的生态水文学研究[J]. 水资源保护,31(6):52–56.
- 程俊翔,徐力刚,姜加虎,2018. 水文改变指标体系在生态水文研究中的应用综述[J]. 水资源保护,34(6):24–31.
- 杜强,王东胜,2005. 河道的生态功能及水文过程的生态响应[J]. 中国水利水电科学研究院学报,3(4):287–290.
- 冯慧娟,2010. 黄河干流宁蒙河段鱼类群落多样性和生长特征研究[D]. 西安:西北大学.
- 葛怀凤,2013. 基于生态-水文响应机制的大坝下游生态保护适应性管理研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院.
- 郭文献,王鸿翔,徐建新,等,2011. 三峡水库对下游重要鱼类产卵期生态水文情势影响研究[J]. 水利发电学报,30(3):22–26,38.
- 蒋晓辉,赵卫华,张文鸽,2010. 小浪底水库运行对黄河鲤鱼栖息地的影响[J]. 生态学报,30(18):4940–4947.
- 景升利,2020. 海勃湾水利枢纽的兴建对黄河内蒙古段鱼类资源的影响及保护措施[J]. 内蒙古水利,11:74–76.
- 黎明政,马琴,陈林,等,2019. 三峡水库产漂流性卵鱼类繁殖现状及水文需求研究[J]. 水生生物学报,43:84–96.
- 黎晓东,曹艳敏,王崇宇,2021. 湘江干流四大家鱼产卵期生态水文情势变化分析[J]. 人民长江,52(4):81–87.
- 李博,邵星晨,黄涛,等,2021. 三峡水库生态调度对长江中游宜昌江段四大家鱼自然繁殖影响分析[J]. 长江流域资源与环境,30(12):873–882.
- 李朝达,林俊强,夏继红,等,2021. 三峡水库运行以来四大家鱼产卵的生态水文响应变化[J]. 水利水电技术(中英文),52:158–166.
- 李建,夏自强,戴会超,等,2013. 三峡初期蓄水对典型鱼类栖息地适宜性的影响[J]. 水利学报,44(8):892–900.
- 李清清,覃晖,陈广才,等,2012. 长江中游水文情势变化对鱼类的影响分析[J]. 人民长江,43(11):86–89.
- 李想,刘睿,甘露,等,2021. 筑坝河流生态系统变化与响应研究[J]. 人民长江,52(8):63–70.
- 林梦然,董增川,贾一飞,2019. 龙羊峡水库对坝下河段生态水文情势影响研究[J]. 人民黄河,41(3):69–74.
- 茹辉军,王海军,赵伟华,等,2010. 黄河干流鱼类群落特征及其历史变化[J]. 生物多样性,18(2):179–186.
- 王东胜,王秀英,范权,等,2010. 黄河海勃湾段黄河鲤、兰州鲂栖息环境水力学特征研究[J]. 水力发电学报,29(1):1–6.
- 王瑞玲,黄锦辉,葛雷,等,2020. 基于黄河鲤鱼栖息地水文-生态响应关系的黄河下游生态流量研究[J]. 水利学报,51(9):1175–1187.
- 夏军,张永勇,穆兴民,等,2020. 中国生态水文学发展趋势与重点方向[J]. 地理学报,75(3):445–457.
- 徐薇,杨志,陈小娟,等,2020. 三峡水库生态调度试验对四大家鱼产卵的影响分析[J]. 环境科学研究,33(5):1129–1139.
- 薛联青,张卉,张洛晨,等,2017. 基于改进RVA法的水利工程对塔里木河生态水文情势影响评估[J]. 河海大学学报(自然科学版),45(3):189–196.
- 张洪波,黄强,彭少明,等,2012. 黄河生态水文评估指标体系构建及案例研究[J]. 水利学报,43(6):675–683.
- 周毅,崔同,郑鑫,等,2017. 基于IHA的黄河源区水文情势及环境流变化[J]. 人民黄河,39(7):61–65.
- Casas-Mulet R, Saltveit S J, Alfredsen K, 2015. The survival of Atlantic salmon (*Salmo salar*) eggs during dewatering in a river subjected to hydropowering[J]. River Research and Applications,31(4):433–446.
- Junk W, 1982. Amazonian floodplains: their ecology, present and potential use[J]. Revue d'Hydrobiologie Tropicale, 15(4):285–301.
- Kupferberg S J, Palen W J, Lind A J, et al, 2012. Effects of flow regimes altered by dams on survival, population declines, and range-side losses of California river-breeding frogs[J]. Conservation Biology,26(3):513–524.
- Poff N L, Zimmerman J K, 2010. Ecological responses to altered flow regimes: A literature review to inform the science and management of environmental flows[J]. Freshwater Biology, 55:194–205.
- Richter B, Baumgartner J, Braun D, 1998. Spatial assessment of hydrologic alteration within a river network[J]. Regulated Rivers,14:329–340.
- Schmutz S, Bakken T H, Friedrich T, et al, 2015. Response of fish communities to hydrological and morphological alterations in hydropowering rivers of Austria[J]. River Research and Applications,31(8):919–930.
- Stromberg J C, Lite S J, Marler R, et al, 2007. Altered stream-flow regimes and invasive plant species: the Tamarix case[J]. Global Ecology and Biogeography,16(3):381–393.
- Thomaz S, Bini L, Bozelli R, 2007. Flood increase similarity among aquatic habitats in river-floodplain systems[J]. Hydrobiologia,579(1):1–13.

(责任编辑 郑金秀)

Ecological Effects of Flow Regime Alteration in Inner Mongolia Reach of the Yellow River

MI Wei-jie¹, ZHANG Shun², HU Jun¹, GAO Shao-bo¹, HU Ju-xiang¹

- (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. Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, P.R. China)

Abstract: The Inner Mongolia reach of the upper Yellow River (Longyangxia–Liujiaxia section) is the river section with intensive hydropower development and the operation of hydropower station has led to significant changes of flow regime in the river section. In this study, we analyzed temporal and spatial alterations of the flow regime in Inner Mongolia, investigated the response relationship between the fish community and runoff, and discussed the ecological effects of hydrological alterations. The study was based on the long term hydrological data collected at Shizuishan, Sanhuhekou and Toudaoguai. Indicators of hydrologic alteration (IHA) and the ranges of variability (RVA) were used for the analysis. Results show that the flow regime of the Yellow River in Inner Mongolia changed significantly after the operation of hydropower stations in the upper reaches of the Yellow River, consequently altering river ecohydrology and continuity. During the dry season, the increases in average monthly discharge (> 70% in January and February) and minimum average daily discharge (> 50% at Shizuishan) was helpful for maintaining river flow and fish overwintering. The decreased range in daily discharge benefitted hatching of fish species with adhesive eggs. However, during flood season, average monthly discharge decreased by 50% (from July to October), as did the duration of flooding, and the occurrence of the maximum daily discharge was delayed by two months in the upper river and advanced by nearly a month in the middle and lower river, adversely affecting fish growth and reproduction. Our study provides support for ecological regulation and habitat protection in the Yellow River in Inner Mongolia.

Key words: flow regime process; water regime; fish; ecological effect; Inner Mongdia reach of the Yellow River