

黄河河口鱼类春季生态需水

于守兵¹, 张朝晖², 徐丛亮³

(1. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003;

2. 自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 3. 黄河口水文水资源勘测局, 山东 东营 257091)

摘要:黄河河口鱼类春季生态需水主要满足河道淡水鱼类栖息地及产卵场、河道洄游鱼类上溯通道和近海洄游鱼类低盐产卵场需求。综合考虑鱼类生活习性, 径流传播以及与近海淡水混合时间和小浪底水库运行以来月均流量特征, 鱼类需水应重点关注3—5月。依据河道淡水鱼类和洄游鱼类的生活习性, 从洄游通道的全程连续性出发, 需要的低流量为 $240 \text{ m}^3/\text{s}$ 。结合自然时期流量脉冲特征, 每年需要一次4月中旬持续8 d的峰值为 $890 \text{ m}^3/\text{s}$ 的流量脉冲; 在此条件下, 春季入海径流量为 21.6 亿 m^3 , 已满足近海洄游鱼类低盐产卵环境要求的 21 亿 m^3 冲淡水。小浪底水库运行以来, 平均春季径流量已达到 21 亿 m^3 。通过优化年内或年际调度模式, 满足鱼类春季生态需水具有很大可行性。

关键词:黄河河口; 鱼类; 生态需水; 春季; 小浪底水库

中图分类号: TV123

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2020)02-0001-07

Spring ecological water requirement for fishes in Yellow River Estuary // YU Shoubing¹, ZHANG Zhaohui², XU Congliang³ (1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, YRCC, Zhengzhou 450003, China; 2. First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China; 3. Yellow River Estuary Bureau of Hydrology and Water Resources, Dongying 257091, China)

Abstract: Spring ecological water requirement for the fishes in the Yellow River Estuary should meet the needs of the habitat and spawning ground of freshwater fishes, channel of migratory fishes, and spawning ground of offshore migratory fishes. According to the living habit of fishes, the time of runoff propagation, the mixing time of fresh water and salt water, and the discharge feature since the operation of the Xiaolangdi Reservoir, key attention should be paid to the water requirement from March to May. A minimum ecological flow discharge of $240 \text{ m}^3/\text{s}$ is needed according to the living habit of fishes and the continuity of the migration channel. A flow discharge pulse with a peak of $890 \text{ m}^3/\text{s}$, lasting for 8d in the middle stage of April is also needed considering the pulse characteristics in nature period. In this condition, the runoff in spring is $21.6 \times 10^8 \text{ m}^3$, satisfying the requirement of $21 \times 10^8 \text{ m}^3$ for the low salt spawning condition of offshore migratory fishes. The mean annual spring runoff is $21 \times 10^8 \text{ m}^3$ since the operation of the Xiaolangdi Reservoir. It is of great feasibility to satisfy the fish ecological water requirement by optimizing the annual or the interannual operation modes.

Key words: Yellow River Estuary; fishes; ecological water requirement; spring; Xiaolangdi Reservoir

黄河河口及邻近海域是黄、渤海重要渔业洄游物种的产卵场、育幼场和索饵场。每年4—6月为主要渔业物种的产卵期和育幼期。历史上, 该时期恰逢黄河上游宁蒙河段冰凌消融形成的桃汛洪水。大量的冲淡水和营养盐被输送至河口, 造就了著名的莱州湾渔场。20世纪80年代中期以来, 黄河干流多座大型水库的建成及运用以及下游两岸引水量剧增显著改变了其自然径流过程^[1-2]。黄河口春季径流量下降, 洪水减少, 流量脉冲消失^[3-4]。鲤鱼等河道鱼类栖息地丧失, 鲟鱼、鳊鱼等鱼类的洄游通道被

截断, 近海洄游鱼类因盐度升高产卵场被破坏^[5]。2008年近海鱼卵和仔稚鱼种类、数量较1982年、1993年明显下降^[6]。1999年黄河启动水量统一调度, 实现了功能性不断流并增加了入海冲淡水量。与黄河下游断流最严重时期相比, 鲤鱼和鳊鱼等品种数量有所增加, 鲟鱼等洄游鱼类重新出现, 近海鱼类资源得到一定程度恢复^[7]。然而目前的水文情势尚不能满足春季河口鱼类适宜生态流量、流量脉冲和近海冲淡水需求^[8]。因此, 研究春季鱼类需水过程, 通过水库调度在一定程度上恢复天然水文情

势,对维持黄河口及邻近海域的鱼类产卵场功能和生态系统健康具有重要意义。

水利工程的修建改变了河流自然水文情势,造成生态功能减弱^[9]。面对这些挑战,河流生态需水成为水资源研究的前沿和热点^[10-11]。其计算方法大体可分为水文学法、水力学法、栖息地法和整体法^[10]。这些方法已用于黄河生态需水研究^[12-15]。其中涉及到河道鱼类生态需水的主要有物理栖息地模拟法^[16-17]、流量恢复法^[18]、典型鱼类生境法等。近海鱼类生态需水研究成果主要有:①根据鱼虾生长条件,20世纪80年代中期黄河水资源规划提出的4—6月入海水量为60亿m³或枯水年4月20亿m³;②按照恢复至20世纪90年代初的目标,得到5—6月入海水量为21亿m³^[18];③根据河口适宜盐度得到的春季水量为5.63亿m³^[21]和4—10月的124亿m³^[22];④依据鱼卵密度调查资料提出的1—5月水量50亿m³^[23]。

由于利津水文站(以下简称利津站)距口门尚有110km,且该断面为窄深断面,从鱼类洄游通道的全程性需要考虑利津站以下各断面要求的鱼类生境条件。另外,径流自利津站传播至口门以及出口门后与近海咸水混合需要一定的时间,近海鱼类需水的时机需要提前。本文根据鱼类生活习性,结合已有近期和历史时期近海鱼卵和仔稚鱼密度调查资料,提出维持河道鱼类栖息地、洄游通道和近海产卵场的春季低流量、流量脉冲和径流量指标。

1 区域概况和数据来源

黄河河口指的是以山东省垦利县宁海为顶点,北起徒骇河口,南至支脉沟河口之间的扇形地域以及划定的容沙区范围(东经118°30′~119°15′,北纬37°10′~38°05′)。目前行洪流路为清水沟,1996年5月之前口门向东南,之后人工改向北偏东(图1)。黄河河口多年平均(1950—2016年)径流量为296亿m³,来沙量为6.8亿t,含沙量为23kg/m³。近50年来黄河干流上修建了10余座大型水利枢纽工程,重要的有三门峡水库、龙羊峡水库和小浪底水库。这些水库的运用再加上黄河下游两岸引水量的剧增等显著改变了进入黄河下游及河口的水文过程。

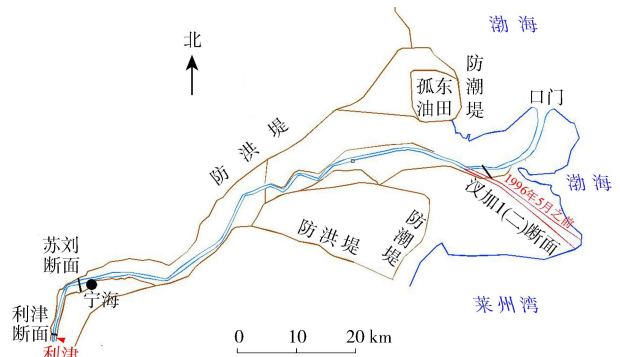


图1 黄河河口现行清水沟流路概况

本文中的春季采用气象部门的划分标准,指的是3—5月,是万物复苏生长发育的关键时期。采用的资料为黄河水利委员会统一发布的利津站1950—2016年实测水文数据、黄河下游引水量数据、2017年汛后黄河河道统测大断面数据。同时还引用了莱州湾海域1982年^[24]、2007—2009年^[23-25]、2014—2016年鱼卵、仔稚鱼密度调查资料^[26]。

2 黄河河口水文情势

黄河下游处于整体性水资源紧缺状态。随着沿黄地区经济社会快速发展,黄河水资源总量供需矛盾日益突出。黄河下游年均引水量则一直呈增加态势,由1950—1973年的31亿~40亿m³增加至2003—2016年的116亿m³,进入黄河口的年径流量整体呈减少趋势(表1)。在1950—1973年的自然时期和三门峡水库蓄清排浑运用前大于440亿m³,之后减少至1974—1985年的341亿m³,并在1985年之后进入长期连续枯水年,径流量减少为132亿m³。2002年以后随着小浪底水库运行,年径流量有所回升,为178亿m³。

利津站春季径流量占全年径流量比例由1950—1973年的15%~18%减少至1974—2016年的12%以下。春季日均流量由1950—1973年的790~940m³/s减少至1974—1985年的540m³/s、1986—2016年的200m³/s。流量脉冲频率由1950—1985年的1.1~2.4次/a减小为1986—2016年0.6~0.8次/a(表2)。平均历时在小浪底水库运行后有所增加。平均峰值由1950—1973年的2000m³/s以上减少为1974—1985年的940m³/s、2003—2016年的710m³/s。平均峰值出现日期先提前后推迟。

表1 黄河利津站径流量和流量变化特征

时段	年径流量/ 亿m ³	春季径流量/ 亿m ³	春季径流量 占比/%	春季日均流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	6月日均流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	主要水库状态
1950—1959年	480	70	15	790	940	自然时期
1960—1973年	442	80	18	940	780	三门峡水库蓄清排浑运用前
1974—1985年	341	33	10	540	330	三门峡水库蓄清排浑运用
1986—2002年	132	14	10	200	200	三门峡、龙羊峡水库联合运用
2003—2016年	178	21	12	200	950	小浪底水库运行

表2 黄河利津站春季流量脉冲特征

时期	累计次数	年均次数	平均历时/d	平均峰值/ (m ³ ·s ⁻¹)	平均峰值 出现日期	主要水库状态
1950—1959年	16	1.1	7.8	2 020	4月13日	自然时期
1960—1973年	22	2.4	9.3	2 120	4月16日	三门峡水库蓄清排浑运用前
1974—1985年	18	1.5	11.0	1 070	4月6日	三门峡水库蓄清排浑运用
1986—2002年	14	0.8	9.1	940	4月1日	三门峡、龙羊峡水库联合运用
2003—2016年	9	0.6	13.8	710	4月30日	小浪底水库运行

3 黄河河口鱼类春季生态需水

3.1 鱼类生活习性和春季生态需水时机

黄河河口鱼类依据生境要求大体分为3类:河道淡水鱼类、河道洄游鱼类和近海洄游鱼类。河道淡水鱼类以鲤科为主,主要有黄河鲤、赤眼鲮、鲫鱼、黄条鱼、青鱼等。河道洄游鱼类经历海水和淡水两种不同生境。从海洋向江河进行溯河生殖洄游的有鲟鱼等,从江河到海洋进行降海生殖洄游的有鳊鱼等。依据鱼类的商业和遗传价值,以及对流量变化的敏感程度,选择鲤鱼、鲟鱼和鳊鱼作为黄河下游典型河道淡水鱼类和洄游鱼类^[18]。其春季生活习性要求河流具有一定的低流量和流量脉冲(表3。表中 H 为水深, v 为流速)。低流量主要为鱼类生存和洄游提供栖息地和通道。流量脉冲有利于扩展栖息地面积和食物来源,刺激鱼类洄游和产卵。近海洄游鱼类有39种鱼类在本海区产卵并育幼,超过40种以上的幼鱼在此索饵。每年4—5月游入渤海产卵繁殖,具有低盐河口近岸产卵的特性。大部分要求水深1~10 m,盐度1.8%~3.2%,温度12~25℃。有35种鱼在10℃以上水温的5—8月产卵,6月份产卵鱼种数多达25种。莱州湾的盐度主要受人海径流量影响^[27]。

河口鱼类产卵旺季在4—6月,春季生态需水时机重点关注3—5月,其原因主要为以下方面:①3月需要一定的低流量以满足鲤鱼越冬生存栖息地和鳊鱼洄游需求。②3—5月日均流量自1950年以来呈显著下降趋势,由1950—1973年的790~940 m³/s下降至1974—1985年的540 m³/s和1986—2016年的200 m³/s。而6月日均流量在小浪底水库运行以来(2003—2016年)为950 m³/s,已达到自然时期(1950—1959年)水平。③盐淡水混掺塑造近海低盐产卵场需要一定时间。由于利津站为

黄河干流最后一个控制站,一般需水指标采用利津站流量过程。利津站至口门河长约110 km,径流传播需要2~3 d。1996年5月清水沟入海方向由东南改至东北(图1),冲淡水不能直接注入莱州湾,而是主要在余流作用下向莱州湾方向扩散并与近海咸水混合。春季莱州湾余流流速约为0.05 m/s^[28],流向偏向西南。口门至莱州湾中心约40 km,以此估计需要18 d。因此,若以利津为控制站,需要在3—5月有适宜的径流量入海,经过约1个月的时间传播和扩散,在莱州湾塑造适宜的低盐产卵幼场。

3.2 河道鱼类春季生态需水流量

黄河利津站及以下河道共布设水文测验大断面41个。2017年汛后实测断面资料分析(图2)表明,利津断面主槽宽度和面积分别为353 m和1 608 m²;苏刘断面主槽宽度和面积最大,分别为650 m和2 514 m²;汉加1(二)断面主槽宽度和面积最小,分别为264 m和649 m²。主槽宽度和面积计算时根据测验断面与主槽断面的夹角并进行修正。由于鱼类洄游通道要求全程连续性,选择利津断面、苏刘断面、汉加1(二)断面计算洄游通道要求的流量。水面比降取黄河口河床平均比降0.008%^[29],流量小于1 000 m³/s时河道糙率取0.035^[30]。

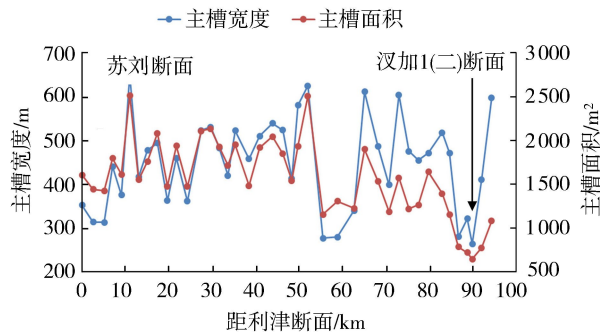
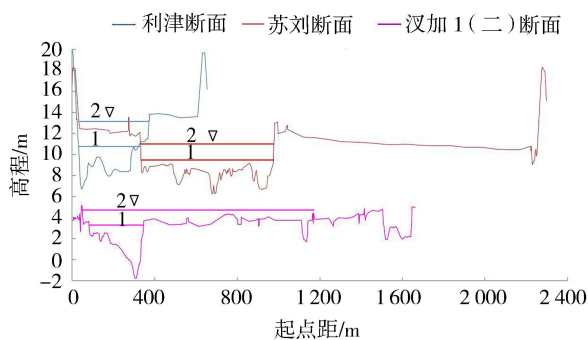


图2 黄河口利津站以下河道2017年汛后主槽宽度和主槽面积

表3 黄河口典型河道淡水鱼类和洄游鱼类生活习性^[17]

种名	生态目标	流量	水力指标	时间
鲤鱼	生存栖息地	低流量	$H > 1.5 \text{ m}$, $0.1 \text{ m/s} < v < 0.8 \text{ m/s}$	11—3月越冬,4—6月产卵
鲤鱼	产卵刺激	流量脉冲	$1 \text{ m} < H < 2 \text{ m}$, $v < 0.3 \text{ m/s}$ 的缓流或静水	4—6月,产卵持续1~3 d
鲟鱼	上溯洄游通道	低流量	$H > 0.6 \text{ m}$, $v < 1.0 \text{ m/s}$	4—6月自河口上溯
鲟鱼	洄游刺激	流量脉冲	$1 \text{ m} < H < 2 \text{ m}$, $0.5 \text{ m/s} < v < 0.8 \text{ m/s}$	4—6月
鳊鱼	上溯洄游通道	低流量	$H > 1.0 \text{ m}$, $0.3 \text{ m/s} < v < 0.5 \text{ m/s}$	2—5月自河口上溯

低流量主要满足鲤鱼栖息地和鲟鱼、鳊鲴洄游通道要求(表3)。鲤鱼生活在靠近岸滩 $H>1.5\text{ m}$ 的缓水或静水中,要求流速 $0.1\text{ m/s}<v<0.8\text{ m/s}$ 。鳊鲴和鲟鱼洄游要求 $H>1.0\text{ m}$,流速 $0.3\text{ m/s}<v<0.5\text{ m/s}$ 。栖息地和洄游通道的河宽一般要求在 50 m 以上。以这3个控制条件进行3个断面水力计算,由于水深与流速具有一定关联性,优先满足 $H>1.0\text{ m}$ 和 $H>1.5\text{ m}$,河宽 50 m 要求,其次保证平均流速在 0.3 m/s 左右。3个断面要求的流量分别为 $100\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $240\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $50\text{ m}^3/\text{s}$ (表4)。从洄游通道的全程连续性考虑,生态流量宜选择苏刘断面的 $240\text{ m}^3/\text{s}$,此时利津和汉加1(二)断面的平均流速为 0.4 m/s ,略大于鲤鱼栖息地要求的最大流速。由于天然河道流速垂向和横向分布的不均匀性,在平均流速为 0.4 m/s 时,在宽度 $259\sim 290\text{ m}$ 的河槽中仍有适合的栖息场所(图3)。



1 为低流量水位; 2 为流量脉冲峰值水位

图3 利津、苏刘、汉加1(二)断面高程及低流量、流量脉冲峰值相应水位

流量脉冲主要刺激鲤鱼产卵和鲟鱼洄游。两种生态习性要求的水深均为 $1\sim 2\text{ m}$ 。前者要求流速 $v<0.3\text{ m/s}$ 的缓流或静水,后者要求 v 为 $0.5\sim 0.8\text{ m/s}$ 。由于鲤鱼产卵持续时间 $1\sim 3\text{ d}$,自然条件下流量脉冲在 $7\sim 11\text{ d}$,流量涨落过程中小流量时流速基本满足鲤鱼产卵需求。故水力计算时以流速 0.5 m/s 和水深 $1\sim 2\text{ m}$ 为控制条件。3个断面适宜的流量脉冲分别为 $580\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $890\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $300\text{ m}^3/\text{s}$,相应流速为 0.5 m/s (表4)。鉴于水深、流速具有一定关联

性,平均水深较大,为 $2.5\sim 2.7\text{ m}$ 。水深在 $1\sim 2\text{ m}$ 的连续河宽为 $63\sim 140\text{ m}$ 。综合考虑,流量脉冲峰值采用 $890\text{ m}^3/\text{s}$ 。该值接近 1986—2002 年小浪底水库运行前的平均值(表2)。此时利津断面和汉加1(二)断面流速为 0.6 m/s ,水深在 $1\sim 2\text{ m}$ 的连续河宽为 $60\sim 1069\text{ m}$ (图3),基本满足要求。其中,汉加1(二)断面水流漫滩,显著增加栖息地河宽。

自然时期黄河口流量脉冲主要由宁蒙河段冰凌解冻产生的桃汛洪水引起。1960 年之后,由于黄河干流三门峡水库、龙羊峡水库和小浪底水库等相机投入运用,在一定程度上改变了桃汛洪水出现特征(表2)。流量脉冲峰值出现的日期在 4 月 1—30 日之间,平均历时较自然时期增加 $1\sim 6\text{ d}$ 。参考自然时期的平均情况,流量脉冲出现时期建议为 4 月中旬的 9—16 日,持续时间为 8 d ,峰值为 $890\text{ m}^3/\text{s}$,频率为 1 a^{-1} 。

3.3 近海洄游鱼类需水量

近海洄游鱼类需要的冲淡水量主要依据莱州湾鱼卵和仔稚鱼密度调查资料确定。国内多家海洋生态研究单位已开展渤海渔业资源调查,但在调查日期、站位布置、统计结果等方面不尽相同。本文主要选择 1982 年、2007—2009 年、2014—2016 年莱州湾调查资料(表5)。这些资料基本上在 5 月中下旬至 6 月上旬开展,且统计结果均以“粒/ m^3 ”和“尾/ m^3 ”为单位,便于对比分析。从调查数据来看,这些年份鱼卵的密度变化范围为 $0.69\sim 2.39\text{ 粒}/\text{m}^3$,而仔稚鱼为 $0.020\sim 2.190\text{ 尾}/\text{m}^3$,后者的变幅远高于前者。另外,在鱼卵密度相差不大的年份,仔稚鱼密度却有很大变化。例如 2014 年和 2015 年鱼卵密度为 $2.24\sim 2.39\text{ 粒}/\text{m}^3$,而仔稚鱼密度相差近百倍。因此,本文分析以鱼卵密度为主,仔稚鱼密度为辅。

从鱼卵密度与利津站春季径流量关系来看,两者呈明显的正相关关系且存在跃升现象(图4)。除了 2008 年,其他年份鱼卵密度均随径流量的增加而升高,并在径流量 $20\text{ 亿}\text{ m}^3$ 前后出现跃升。具体而言,

表4 黄河口河道典型断面满足鱼类栖息地和洄游的水力条件

断面	流量类型	流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	河宽/m	断面面积/ m^2	水深/m	流速 $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	连续河宽/m
利津	适宜低流量	100	246	320	1.3	0.3	120($H>1.5\text{ m}$)
苏刘	适宜低流量	240	639	803	1.3	0.3	58($H>1.5\text{ m}$)
汉加1(二)	适宜低流量	50	103	149	1.5	0.3	50($H>1.5\text{ m}$)
利津	采用低流量	240	290	585	2.0	0.4	129($H>1.5\text{ m}$)
汉加1(二)	采用低流量	240	264	564	2.1	0.4	144($H>1.5\text{ m}$)
利津	适宜流量脉冲	580	342	902	3.1	0.6	63($1\text{ m}<H<2\text{ m}$)
苏刘	适宜流量脉冲	890	644	1768	2.7	0.5	79($1\text{ m}<H<2\text{ m}$)
汉加1(二)	适宜流量脉冲	300	264	649	2.5	0.5	140($1\text{ m}<H<2\text{ m}$)
利津	采用流量脉冲	890	343	1373	4.0	0.6	60($1\text{ m}<H<2\text{ m}$)
汉加1(二)	采用流量脉冲	600(主槽)	264	976	3.7	0.6	1068($1\text{ m}<H<2\text{ m}$)
		290(滩地)	1068	1109	1.0	0.3	

表5 莱州湾鱼卵、仔稚鱼密度资料与利津站春季径流量

调查日期	鱼卵密度/ (粒·m ⁻³)	仔稚鱼密度/ (尾·m ⁻³)	资料来源	春季径流量/ 亿m ³
1982年6月7—17日	2.22	0.289	文献[21]	20.53
2007年6月	0.82	0.057	文献[22]	14.61
2008年6月	0.71	0.350	文献[22]	26.37
2009年5月	0.74	0.093	文献[23]	14.49
2014年5月31日至 6月8日	2.34	0.020	文献[20]	31.97
2015年5月22—26日	2.39	2.190	文献[20]	45.85
2016年5月13—23日	0.69	0.160	文献[20]	10.59

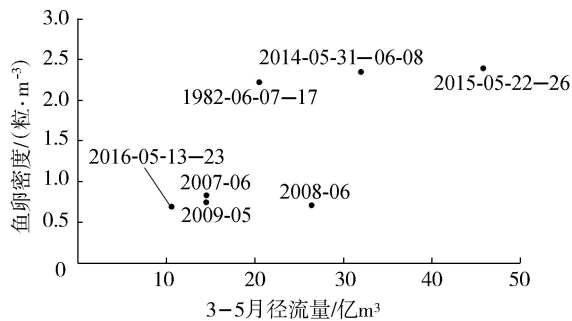


图4 莱州湾鱼卵密度与利津站春季径流量关系

2007年、2009年和2016年径流量小于15亿m³,鱼卵密度为0.69~0.82粒/m³,处于较低水平,且随径流量增加变化幅度不大。而1982年、2014年和2015年径流量均大于20亿m³,鱼卵密度为2.22~2.39粒/m³,约为前者的3倍;同样随径流量增加变化幅度不大。2008年鱼卵密度虽然相对于径流量偏低,但仔稚鱼的密度为0.350尾/m³,远高于1982年的0.289尾/m³和2014年的0.020尾/m³。2015年的鱼卵密度略多于2014年,但由于径流量多达46亿m³,仔稚鱼的密度高达2.190尾/m³。综合分析,黄河河口春季入海径流量取21亿m³,也即近于自然时期1982年的径流量。

3.4 河口鱼类春季生态需水指标

黄河河口春季生态流量需要兼顾河道淡水鱼类栖息及产卵要求、河道洄游鱼类上溯通道要求、近海洄游鱼类产卵要求,保障适当的低流量、流量脉冲和径流量。根据河道淡水鱼类和河道洄游鱼类生境需求,3—5月低流量为240m³/s,4月中旬(9—16日)塑造240—890—240m³/s的流量脉冲,合计入海径流量为21.6亿m³。在此条件下已满足近海洄游鱼类21亿m³冲淡水需求。

4 讨论

a. 于河道低流量,已有研究以利津断面水力计算得到的3月适宜流量为170m³/s,4月为190m³/s,5—6月为250m³/s^[18]。由于利津断面较为窄深,3—5月低流量和流量脉冲不能满足主槽面

积较大的苏刘断面需求。另有研究采用利津断面平均流速为0.6m/s,计算得到的适宜流量为371m³/s^[17]。由于利津和汉加1(二)断面窄深,流速较大时鲤鱼生存栖息地不易保障。

b. 关于流量脉冲,已有研究提出5—6月需要300~500m³/s的小脉冲洪水^[18]。本文根据3个断面满足鱼类需要的水力条件,并结合自然时期桃汛洪水产生的流量脉冲特征,提出每年1次、4月中旬持续8d(4月9—16日)、峰值为890m³/s的脉冲过程。

c. 关于近海洄游鱼类生态需水量研究主要有以下几个方面成果。黄河水资源规划按照鱼虾生长要求,4—6月径流量为60亿m³,枯水期4月为20亿m³。参照20世纪90年代初水平,5—9月径流量应达到120亿m³,其中5—6月为21亿m³。根据渔业资源调查数据并从管理角度出发确定入海水量为1—5月50亿m³^[20]。根据河口适宜盐度得到的春季水量为5.63亿m³^[21]和4—10月的124亿m³^[22]。

本文根据近海洄游鱼类产卵主要发生在4—6月,并考虑径流在河道传播时间和出口门后向莱州湾扩散时间,将需水时机选择在3—5月。通过对1982—2016年期间7年莱州湾鱼卵密度调查资料分析,在春季径流量21亿m³前后,鱼卵密度有较大变化。该数据接近于1982年入海径流量,而且该时期黄河受人类活动影响较小,基本上处于自然状态。故建议春季入海水量为21亿m³,具有较强的可靠性和可行性。

d. 小浪底水库运行以来,春季平均径流量达到21亿m³,已满足入海水量要求。主要问题在于年际变幅较大,为2.8亿~45.85亿m³,14年内仅有7年超过21亿m³(图5)。另外,春季日均流量为200m³/s,脉冲频率为0.6a⁻¹,平均峰值为710m³/s。这些指标均低于要求的适宜流量240m³/s、脉冲频率1a⁻¹、峰值890m³/s的要求。在平均入海水量已达到近海鱼类需求的前提下,通过优化小浪底水库年内或年际调度模式,满足河道鱼类栖息地、洄游和产卵洄游刺激需求具有很大可行性。

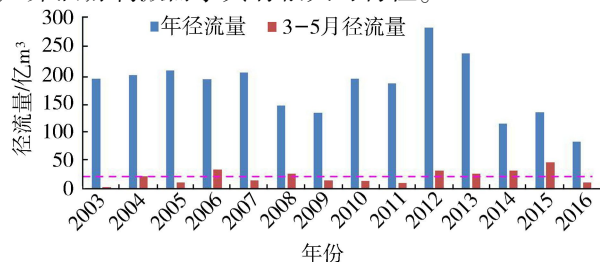


图5 黄河河口小浪底水库运行以来年径流量和春季径流量

5 结 论

黄河河口春季生态需水主要兼顾河道淡水鱼类栖息及产卵、河道洄游鱼类上溯通道、近海洄游鱼类产卵等要求。根据河道洄游鱼类和近海洄游鱼类的生活习性,径流传播和向近海扩散时间,需水时机应重点关注3—5月。从洄游通道全程连续性出发,河道淡水鱼类和河道洄游鱼类生境要求3—5月低流量为 $240\text{ m}^3/\text{s}$,以及每年4月中旬为为期8d的 $240\text{—}890\text{—}240\text{ m}^3/\text{s}$ 流量脉冲。近海洄游鱼类要求春季入海径流量为21亿 m^3 。在保证河道淡水鱼类和河道洄游鱼类生态流量下,春季入海径流量为21.6亿 m^3 ,已满足近海洄游鱼类冲淡水需求。小浪底水库运行以来,春季平均径流量已达到需求。通过优化年内或年际调度模式,满足河道低流量和流量脉冲具有很大可行性。

参考文献:

- [1] 刘成,王兆印,隋觉义. 黄河干流沿程水沙变化及其影响因素分析[J]. 水利水电科技进展, 2008, 28(3): 1-7. (LIU Cheng, WANG Zhaoyin, SUI Jueyi. Variation of flow and sediment of the Yellow River and their influential factors [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2008, 28(3): 1-7. (in Chinese))
- [2] 牛明香,王俊. 黄河河口区生态系统健康评价指标体系探讨[J]. 水资源保护, 2016, 32(1): 57-63. (NIU Mingxiang, WANG Jun. Discussion over health assessment indicator system of ecosystem in Yellow River estuary area [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(1): 57-63. (in Chinese))
- [3] 张治昊,吉祖稳,戴清,等. 水沙变异条件下黄河口演变与治理研究动态及建议[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(增刊2): 63-66. (ZHANG Zhihao, JI Zuwen, DAI Qing, et al. Development and proposal on evolution and regulation of the Yellow River Estuary in condition of significant change of flow-sediment regime [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27 (Sup2): 63-66. (in Chinese))
- [4] 陈学群,李福林,张瑞青,等. 黄河河口平原多闸坝河道水流数学模型[J]. 水资源保护, 2012, 28(1): 38-41. (CHEN Xuequn, LI Fulin, ZHANG Ruiqing, et al. Mathematical model of flow in rivers with multiple sluices and dams in plain area in Yellow River Estuary [J]. Water Resources Protection, 2012, 28(1): 38-41. (in Chinese))
- [5] 焦玉木,张新华,李会新. 黄河断流对河口海域鱼类多样性的影响[J]. 海洋湖沼通报, 1998(4): 48-53. (JIAO Yumu, ZHANG Xinhua, LI Huixin. Influence on fish diversity in the sea area off the Huanghe River
- Estuary by the cutoff of water supply [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1998(4): 48-53. (in Chinese))
- [6] 王爱勇,万瑞景,金显仕. 渤海莱州湾春季鱼卵、仔稚鱼生物多样性的年代际变化[J]. 渔业科学进展, 2010, 31(1): 19-24. (WANG Aiyong, WAN Ruijing, JIN Xianshi. Decadal variations of ichthyoplankton biodiversity in spring in Laizhou Bay of the Bohai Sea [J]. Progress in Fishery Sciences, 2010, 31(1): 19-24. (in Chinese))
- [7] 韩艳利,王新功,葛雷. 黄河水量10年调度对生态环境影响评估[J]. 水资源保护, 2013, 29(2): 76-81. (HAN Yanli, WANG Xingong, GE Lei. Evaluation of ecological benefits of ten-year integrated water regulation of Yellow River [J]. Water Resources Protection, 2013, 29(2): 76-81. (in Chinese))
- [8] 张爱静,董哲仁,赵进勇,等. 黄河水量统一调度与调水调沙对河口的生态水文影响[J]. 水利学报, 2013, 44(8): 987-993. (ZHANG Aijing, DONG Zheren, ZHAO Jinyong, et al. Effects of the integrated water regulation and water-sediment regulation of the Yellow River on the eco-hydrology of its estuary [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(8): 987-993. (in Chinese))
- [9] 段红东. 生态水利工程概念研究与典型工程案例[J]. 水利经济, 2019, 37(4): 1-4. (DUAN Hongdong. Conceptual research on eco-hydraulic engineering and case study of typical projects [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2019, 37(4): 1-4. (in Chinese))
- [10] 刘悦忆,朱金峰,赵建世. 河流生态流量研究发展历程与前沿[J]. 水力发电学报, 2016, 35(12): 23-34. (LIU Yueyi, ZHU Jinfeng, ZHAO Jianshi. Development history and frontiers of river environmental flow research [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(12): 23-34. (in Chinese))
- [11] 司源,王远见,任智慧. 黄河下游生态需水与生态调度研究综述[J]. 人民黄河, 2017, 39(3): 61-64. (SI Yuan, WANG Yuanjian, REN Zhihui. A review of ecological water requirement and ecological reservoir operation in the Lower Yellow River [J]. Yellow River, 2017, 39(3): 61-64. (in Chinese))
- [12] THARME R E. A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers [J]. River Research and Applications, 2003, 19: 397.
- [13] 石伟,王光谦. 黄河下游生态需水量及其估算[J]. 地理学报, 2002, 57(5): 595-602. (SHI Wei, WANG Guangqian. Estimation of ecological water requirement for the Lower Yellow River [J]. Acta Geographica Sinica, 2002, 57(5): 595-602. (in Chinese))
- [14] 倪晋仁,王金玲,赵业安,等. 黄河下游河流最小生态环境需水量初步研究[J]. 水利学报, 2002, 33(10):

- 1-7. (NI Jinren, WANG Jinling, ZHAO Yean, et al. Minimum water demand for ecosystem protection in the Lower Yellow River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33(10): 1-7. (in Chinese))
- [15] 王春华, 张娜, 孟兆龙. 黄河河口地区生态环境用水配置及保障措施探讨[J]. 水资源保护, 2009, 25(增刊1): 75-78. (WANG Chunhua, ZHANG Na, MENG Zhaolong. Ecological environment water allocation and guarantee measure in the Yellow River Estuary zone [J]. Water Resources Protection, 2009, 25(Sup1): 75-78. (in Chinese))
- [16] 张文鸽, 黄强, 蒋晓辉. 基于物理栖息地模拟的河道内生态流量研究[J]. 水科学进展, 2008, 19(2): 192-197. (ZHANG Wenge, HUANG Qiang, JIANG Xiaohui. Study on instream ecological flow based on physical habitat simulation [J]. Advances in Water Science, 2008, 19(2): 192-197. (in Chinese))
- [17] 蒋晓辉, 赵卫华, 张文鸽. 小浪底水库运行对黄河鲤鱼栖息地的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(18): 4940-4947. (JIANG Xiaohui, ZHAO Weihua, ZHANG Wenge. The impact of Xiaolangdi Dam operation on the habitat of Yellow River Carp [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(18): 4940-4947. (in Chinese))
- [18] 蒋晓辉, 刘昌明. 基于流量恢复法的黄河下游鱼类生态需水研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2009, 45(5): 537-542. (JIANG Xiaohui, LIU Changming. Environmental flow requirements by major fishes in the lower reach of the Yellow River determined by flow restoration [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2009, 45(5): 537-542. (in Chinese))
- [19] 刘晓燕, 连煜, 可素娟. 黄河河口生态需水分析[J]. 水利学报, 2009, 40(8): 956-961. (LIU Xiaoyan, LIAN Yu, KE Sujuan. Analysis on water demand for ecosystem protection in Yellow River Delta [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(8): 956-961. (in Chinese))
- [20] 王高旭, 陈敏建, 丰华丽, 等. 黄河中下游河道生态需水研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2009, 48(5): 125-130. (WANG Gaoxu, CHEN Minjian, FENG Huali, et al. Ecological flow regime in middle and lower reaches of the Yellow River [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2009, 48(5): 125-130. (in Chinese))
- [21] 李国英, 盛连喜. 黄河河口生态系统需水量分析[J]. 东北师大学报(自然科学版), 2011, 43(3): 138-144. (LI Guoying, SHENG Lianxi. The study of ecological water requirements of Yellow River Estuary [J]. Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition), 2011, 43(3): 138-144. (in Chinese))
- [22] 薛小杰, 巩琳琳, 黄强. 黄河河口生态需水量研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(8): 224-229. (XUE Xiaojie, GONG Linlin, HUANG Qiang. Journal of Northwest A & F University (Nature Science Edition), 2012, 40(8): 224-229. (in Chinese))
- [23] 谷源泽, 徐丛亮, 张朝晖, 等. 黄河入海水沙与黄河口莱州湾生态响应关系研究[C]//第二十届海峡两岸多砂河川整治与管理研讨会论文集. 西宁:黄河研究会, 2017:106-118.
- [24] 山东省科学技术委员会. 山东省海岸带和滩涂调查报告集[M]. 北京:中国科学技术出版社, 1991.
- [25] 宋秀凯, 刘爱英, 杨艳艳, 等. 莱州湾鱼卵、仔稚鱼数量分布及其与环境因子相关关系研究[J]. 海洋与湖沼, 2010, 41(3): 378-385. (SONG Xiukai, LIU Aiyang, YANG Yanyan, et al. Distributing of ichthyoplankton and the correlation with environmental factors in Laizhou Bay [J]. Oceanologia et limnologia Sinica, 2010, 41(3): 378-385. (in Chinese))
- [26] 刘霜, 张继民, 冷宇. 黄河口及附近海域鱼卵和仔鱼种类组成及分布特征[J]. 海洋通报, 2011, 30(6): 662-667. (LIU Shuang, ZHANG Jimin, LENG Yu. Species and distribution characteristics of fish eggs and larvae at the Yellow River Estuary [J]. Marine Science Bulletin, 2011, 30(6): 662-667. (in Chinese))
- [27] 赵鹏, 江文胜, 毛新燕, 等. 2000—2005年莱州湾盐度的变化及其主要影响因素[J]. 海洋与湖沼, 2010, 41(1): 12-23. (ZHAO Peng, JIANG Wensheng, MAO Xinyan, et al. Salinity change and influencing factor in the Laizhou Bay from 2000 to 2005 [J]. Oceanology et Limnologia Sinica, 2010, 41(1): 12-23. (in Chinese))
- [28] 薛兴华, 李国胜, 王海龙. 不同流路时期黄河三角洲沿岸余流场的数值对比研究:以北岸钓口河和东岸清水沟流路初期为例[J]. 海洋通报, 2011, 30(2): 142-151. (XUE Xinghua, LI Guosheng, WANG Hailong. A numerical comparative study on residual currents along the Yellow River Delta during two different estuary routes: a typical case of early periods of Diaokou and Qingshuigou Channel [J]. Marine Science Bulletin, 2011, 30(2): 142-151. (in Chinese))
- [29] 于守兵, 王万战, 王开荣, 等. 现阶段黄河入海流路输沙动态平衡研究[J]. 人民黄河, 2012, 34(6): 10-12. (YU Shoubing, WANG Wanzhan, WANG Kairong, et al. Study on dynamic balance of sediment transported by present Yellow River flow path to the sea [J]. Yellow River, 2012, 34(6): 10-12. (in Chinese))
- [30] 王万战, 张世安, JEFFREY A Nittrouer. 黄河河口段河道糙率计算方法[J]. 人民黄河, 2018, 40(12): 4-8. (WANG Wanzhan, ZHANG Shian, JEFFREY A N. A formula for channel roughness for the Yellow River Estuary [J]. Yellow River, 2018, 40(12): 4-8. (in Chinese))

(收稿日期:2019-05-10 编辑:郑孝宇)