中国科学: 地球科学 2024 年 第 54 卷 第 5 期: 1619 ~ 1630
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文

# 水库调控影响下黄河春季入海径流变化及其对河口渔业恢复的潜在效力

吴晓[1,2*], 王厚杰[1,2], 范勇勇[3], 毕乃双[1,2], 缪驰远[4], 徐景平[2,5], 杨作升[1]

1. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100;
2. 崂山国家实验室, 青岛 266061;
3. 黄河河口海岸科学研究所, 东营 257000;
4. 北京师范大学地理科学学院, 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;
5. 南方科技大学海洋科学与工程系, 深圳 518055
* 通讯作者, E-mail: wuxiao@ouc.edu.cn

收稿日期: 2023-01-06; 收修改稿日期: 2023-12-12; 接受日期: 2024-02-22; 网络版发表日期: 2024-03-06
国家自然科学基金项目(42041005、42121005、42176168、42149301、42041006)、中央高校基本科研业务费专项项目(202241007)、山东省泰山学者项目(TS20190913、TSQN202211054)和山东省高等学校青年创新团队项目(2022KJ045)资助

**摘要** 近几十年随着水库大坝的兴建, 全球河流碎片化程度加剧. 水库的拦截与调蓄改变了河流自然水文过程, 进而导致河流-河口系统发生一系列重要变化. 因此, 缓解水库大坝导致的负面生态效应、保障河流-河口系统可持续发展已经成为全球共同关注的重要问题. 作为受人为干预最为强烈的大河之一, 黄河流域内广泛分布的水库改变了黄河径流通量和时空输送格局, 引起河口生物地球化学过程和河口生态系统的显著调整. 近年来, 为了改善河口生态环境、促进河口渔业资源恢复, 黄河水利委员会开始在春季(黄河口鱼类的主要产卵期)实施生态补水, 通过加大小浪底水库的下泄流量, 增加春季入海径流通量, 塑造适宜的河口盐度环境. 2011~2020年, 小浪底水库春季总计过流84.05km$^3$, 其中约40%(33.16km$^3$)来自小浪底水库的库容排放. 生态补水导致黄河春季入海径流由1.50km$^3$/a增加至3.46km$^3$/a, 河口区平均盐度下降1.6PSU, 河口鱼卵密度、仔稚鱼密度明显增加. 黄河通过水库调控增加春季入海径流改善河口生态系统、促进渔业资源恢复, 为缓解水库的负面生态效应、实现陆海协调发展提供了重要借鉴.

**关键词** 水库调控, 淡水排放, 春季径流, 河口生态系统, 黄河

## 1 引言

作为连接陆地和海洋的重要纽带, 河流系统源源不断地向海洋输送淡水、陆源泥沙、营养盐和污染物, 在全球物质循环中扮演重要的角色(Nijssen等, 2001; Meybeck和Vörösmarty, 2005; Syvitski等, 2022). 全球径流数据中心的数据显示, 全球90°N到60°S之间的河流系统每年合计向海洋输送40,000km$^3$的淡水. 这

中文引用格式: 吴晓, 王厚杰, 范勇勇, 毕乃双, 缪驰远, 徐景平, 杨作升. 2024. 水库调控影响下黄河春季入海径流变化及其对河口渔业恢复的潜在效力. 中国科学: 地球科学, 54(5): 1619–1630, doi: 10.1360/N072023-0005
英文引用格式: Wu X, Wang H, Fan Y, Bi N, Miao C, Xu J, Yang Z. 2024. Boosting spring runoff into the sea by reservoir regulation and its potential for estuarine fishery recovery. Science China Earth Sciences, 67(5): 1591–1603, https://doi.org/10.1007/s11430-023-1283-y

© 2024 《中国科学》杂志社 

些径流不仅带来了大量的营养物质，促进了河口初级生产力，同时也可以为河口区半咸水生物创造适宜的盐度环境. 因此，河口成为地球上最具活力的生态系统之一(Potter等, 2010; Raimonet和Cloern, 2017). 然而近几十年来, 全球河流系统发生了一系列重大变化. 城市发展、水资源消耗加大、水库大坝建设、水土保持工程等强烈的人类活动引起了河流系统的快速调整, 进而导致河流自然水文过程发生显著变化(Nilsson等, 2005; Murphy等, 2021; Zhang等, 2022). 其中, 水库在河流物质输运过程中发挥着重要的阀门作用，引起了广泛关注(Lehner等, 2011).

过去半个多世纪以来，全球水库大坝的数量呈指数型增长. 目前, 全球已有一千六百万座面积超过0.01公顷的大型水库，而且还有3700多座在建或已经列入规划(Zarfl等, 2014). 除发电功能外，水库建设的另一个重要目标是通过调节出库流量(如削弱洪峰流量、增加枯季流量等), 降低下游洪水风险、保障下游用水需求(Nilsson等, 2005; Gupta等, 2012). 水库拦蓄与调控导致全球大多数河流流量呈现均一化趋势，影响了河口淡水输入的时空分布特征，河口生态系统发生相应调整(Dudgeon等, 2006; Freeman和Marcinek, 2006). 例如, Alqueva大坝的建设导致瓜迪亚纳河入海流量降低, 河口盐度增加, 瓜迪亚纳河口鱼类资源丰度和多样性发生一系列变化(Chícharo等, 2006; Domingues等, 2014). 蒙德古河流域水库建设也导致河口盐度变化, 从而引起鱼类群落结构的快速调整(Neto等, 2010; Baptista等, 2014). 因此，如何更好地缓解水库大坝引起的负面生态效应，已经成为人类世背景下的重要科学问题, 引起了全球社会的广泛关注.

黄河以高含沙量著称世界，过去几千年来一直是陆源物质向海输运的重要端元(Milliman和Meade, 1983; Wu等, 2020b). 与世界其他大河类似, 为了满足防洪和灌溉等需求，半个多世纪以来黄河流域兴建了一系列的水库大坝，显著改变了黄河的自然水文过程(Wang等, 2006; Miao等, 2022; Wu等, 2023). 水库的拦蓄有利于水资源的高效利用，加之流域内工农业及生活用水需求不断加大，黄河流域水资源消耗量快速增加. 过去六十年来，黄河入海径流降低了80%以上(Miao等, 2010; Yang等, 2020). 除通量变化外, 水库的拦蓄与调控改变了入海径流的年内输运特征，导致以径流为载体的泥沙、营养盐和污染物的入海通量与时空特征发生显著变化，进而引起河口生态系统的快速调整(Liu等, 2015; Hu等, 2019; Fu等, 2023; Li等, 2023).

小浪底水库是黄河干流最后一座大型水库，控制了黄河92.3%的流域面积. 自1999年10月开始蓄水以来，小浪底水库的调控与拦蓄显著改变了其下游径流输运的季节特征，非汛期与汛期的径流比由小浪底蓄水前的39.8%增加至93.2%(Kong等, 2022). 入海径流的均一化改变了黄河口盐度和营养盐的时空分布特征，引起河口初级生产力和渔业资源的显著变化(Jin等, 2013; Yi等, 2021). 为了改善黄河口生态环境，近年来黄河水利委员会开始尝试在春季(河口鱼类的主要产卵期)实施生态补水, 通过加大小浪底水库下泄流量, 增加黄河春季入海径流, 为河口鱼类创造盐度适宜的产卵场和栖息地. 在水库大坝的负面生态效应已经成为全球河流共性问题的背景下，应当对黄河这一流域尺度的水库调控进行综合研究，系统评估其对河口生态环境改善的潜在效力.

本文通过系统收集的黄河径流数据、降水数据和河口盐度、鱼卵密度等资料, 揭示了1950~2020年黄河春季径流变化特征，探讨了黄河入海径流变化对河口盐度场和渔业资源的影响，评估了小浪底水库春季生态补水对河口渔业资源的远端调控效应. 2007年，布里斯班宣言(Brisbane Declaration)提出了“环境流量”的概念，即在河流管理过程中应充分考虑维持淡水生态系统和河口生态系统稳定的流量和时空分布需求. 黄河流域通过水库调控实施春季生态补水为满足“环境流量需求”做出了有益的尝试, 对这一水库调控工程成效的系统评估将为实现黄河流域陆海协同发展提供科学依据, 也可为全球其他河流-河口系统的可持续发展提供重要借鉴.

## 2 区域概况

黄河发源于青藏高原北麓, 源头海拔4500m, 流经内蒙古高原和黄土高原，向东穿过华北平原(图1)，在山东省利津市垦利县注入渤海，全长约5464km，流域面积752,000km$^2$. 黄河流域养育着超过1.1亿人口，人口密度是全球河流平均密度的2.7倍. 黄河流域大部分地区属于干旱/半干旱区域, 年降水量460mm/a, 仅为全球平均降水量的一半，但蒸发量高达1690mm/a，是全球平均的1.5倍. 降雨偏少、蒸发量大，加之流域内较

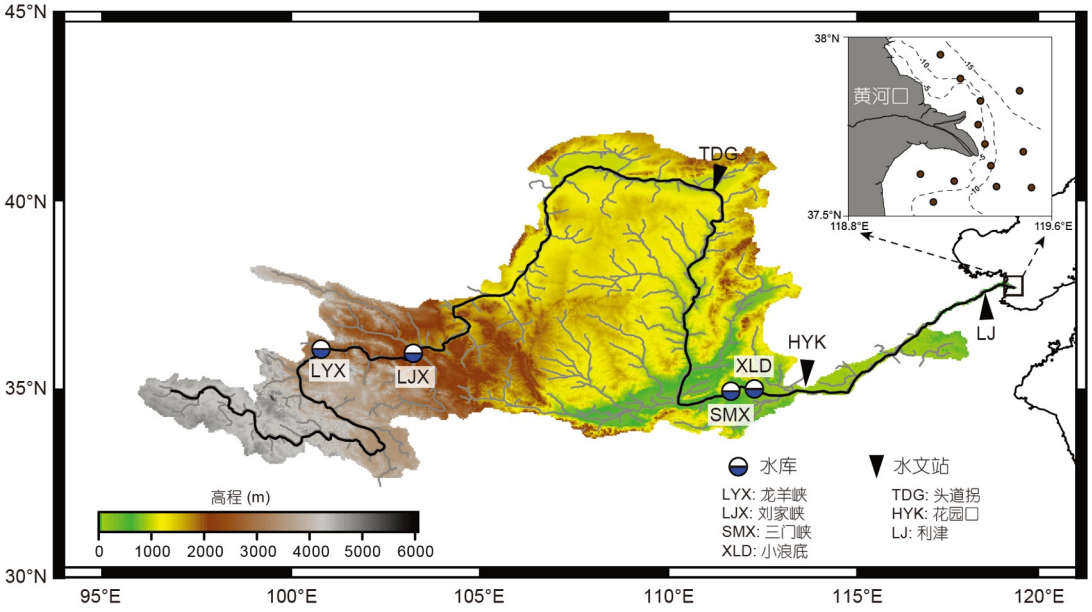



**图 1**　**黄河流域图与主要水库和水文站位置分布**

右上角插图为河口区域图, 虚线代表河口水深, 圆点代表鱼卵采集站位(Song等, 2019)

高的人口密度, 使得黄河成为全球典型的资源性缺水河流, 人均水资源占有量不足全球平均水平的1/9 (Yang等, 2020). 自1960年流域内第一座大型水库(三门峡水库)竣工以来, 黄河流域迄今已建成24座容量超过0.1km$^3$的水库, 其中, 1999年投入使用的小浪底水库是黄河干流最后一座大型水库(Wang等, 2006).

小浪底水库位于三门峡水库下游约130km, 距离河口约800km, 大坝顶部海拔281m, 可容纳最高水位约275m. 小浪底水库设计库容12.65km$^3$, 其中5.1km$^3$用于流量调节和发电(Kong等, 2022). 由于其关键的地理位置, 小浪底水库控制了黄河向下游的91.2%的径流和几乎100%的泥沙输运, 是黄河流域最为重要的控制站(Wu等, 2020a).

黄河口位于渤海西岸, 属于弱潮型河口, 水深小于15m(Shan等, 2013). 历史上黄河年均向海输送30km$^3$的径流(Xu等, 2010), 丰富的陆源供应使得黄河口地区具有较高的初级生产力和丰富的渔业资源(Shan等, 2013; Zhang等, 2021). 黄河口是我国渤黄海地区重要的鱼类产卵场之一, 河口区的低盐环境为鱼类繁殖及仔稚鱼生长提供了适宜的条件(Chen等, 2000). 如表1所示, 黄河口大多数鱼类集中在4~6月产卵. 考虑到淡水与海水的混合过程, 一系列的研究结果表明黄河春季入海径流对河口盐度环境和渔业资源至关重要(于守兵等, 2020; Yi等, 2021). 本文的研究区域从河口延伸至黄河冲淡水所能影响的最大范围, 研究区盐度在3~30PSU之间, 低于渤海海域的平均盐度(Qing等, 2013).

**表 1**　**黄河口及邻近海域主要鱼类种属、产卵期和适宜盐度**[a)]

| 种名 | 产卵月份 | 适宜盐度 (PSU) |
|---|---|---|
| 梭鱼 | 4~6月 | 14.0~18.0 |
| 短吻红舌鳎 | 6~7月 | 20.0~33.0 |
| 鲳 | 5月 | 28.3~31.3 |
| 蓝点马鲛 | 5~6月 | 28.0~31.0 |
| 斑鰶 | 4~7月 | 20.7~22.7 |
| 鳓鱼 | 5~6月 | 22.0~24.0 |
| 小带鱼 | 6~7月 | 30.0~32.0 |
| 日本鳀 | 5~6月 | 28.0~31.0 |
| 赤鼻棱鳀 | 5~7月 | 28.0~31.0 |
| 许氏平鲉 | 4~5月 | 28.0~32.0 |
| 叫姑鱼 | 5~6月 | 13.0~17.0 |

a) 37.0°N~38.2°N, 119.0°E~120.0°E(谷源泽等, 2019; Yi等, 2021)

## 3　数据来源与方法

自20世纪50年代开始, 黄河水利委员会对黄河流

域关键站位开展逐日水沙监测，监测数据通过《黄河水资源公报》公开发布. 本文系统收集了1950~2020年黄河三门峡、小浪底、花园口和利津四个主要水文站的年际与春季径流数据(详见表2). 由于利津水文站是黄河干流最后一个水文站, 距离口门仅100km, 利津之下无支流汇入，因此通常将利津站作为黄河入海的控制站.

降水数据来自黄河流域的58个国家气象站，其中20个位于黄河流域内，38个位于黄河流域周边. 降水数据由中国气象局国家气候中心进行质量控制后公开发布. 本文采用泰森多边形法计算了黄河流域的月际降水量，并对3~5月数据进行求和，得到1951~2020年黄河流域逐年的春季降水量.

本文使用的河口盐度和渔业资源的数据集包括河口平均海表盐度、低盐区(盐度<27 PSU)面积以及河口鱼卵密度, 数据来源详见表2. 河口盐度资料来自于不同年份的19次调查航次，不同航次中河口盐度数据具有较好的一致性与可比性. 例如，2005年河口平均盐度在不同的研究中大致相当, 分别为29.23PSU(肖纯超等, 2012)和29.04PSU(Song等, 2019). 鱼卵密度数据收集自文献资料(谷源泽等, 2019; Song等, 2019; 于守兵等, 2020).

## 4 结果与讨论

### 4.1 近70年来黄河春季入海径流变化

1950年以来，黄河流域内城市建设、工农业发展、水土保持工程、水库调控等一系列人类活动导致黄河流域发生了前所未有的重大变化(Wang等, 2016), 黄河年际入海径流显著降低(图2a, Wang等, 2007; Yang等, 2020). 与年径流量变化类似，过去70年来黄河春季入海径流量也呈现持续降低趋势，以流域内大型水库(刘家峡、龙羊峡、小浪底)的建设为分界，大致可以分为以下几个阶段(图2b): (1) 1950~1968年, 黄河春季入海流量为7.78km$^3$/a; (2) 1969~1986年, 在刘家峡水库建成后，黄河春季径流量降至4.03km$^3$/a; (3) 1987~1998年, 随着龙羊峡水库投入使用, 黄河春季流量进一步降低，平均为1.50km$^3$/a(仅为1950~1968年平均值的19.28%); (4) 1999年小浪底水库建成以来，黄河春季入海径流有所增加, 恢复至2.42km$^3$/a(图2b).

河流径流受自然因素和人类活动的共同影响，其中，降水被认为是影响流域尺度水文过程最重要的自然因素(Lu, 2004). 然而，过去70年以来黄河流域不断增强的人类活动显著改变了黄河自然水文过程，人类活动对黄河径流的影响程度已经远远超过以降水为代表的自然因素(Wang等, 2006). 前人研究表明，87%的黄河年际径流变化是由于流域内强烈的人类活动所导致, 仅有13%归因于降水波动(Yang等, 2020). 如图3a所示，黄河春季径流变化与降水之间同样没有显著相关性. 1950年以来，黄河流域春季降水在年代际尺度变化不大(图3b), 且波动特征与春季径流变化不同步. 例如，尽管黄河流域春季降水由1969~1986年间的72.03mm增加至1987~1999年间的78.98mm(图3b)，增加了近10%，但春季入海径流却从4.03km$^3$/a降低至

**表 2 数据来源**

| 数据集 | 数据 | 年份 | 数据源 |
|---|---|---|---|
| 径流数据 | 利津站年际与春季径流数据(km$^3$) | 1950~2020 | 黄河水利委员会 |
| | 三门峡及花园口站年际与春季径流数据(km$^3$) | 1950~2020 | 黄河水利委员会 |
| | 小浪底站年际与春季径流数据(km$^3$) | 1999~2020 | 黄河水利委员会 |
| 降水量 | 黄河流域逐年的春季降水量(mm) | 1950~2020 | 中国气象局国家气候中心 |
| 小浪底水库水位 | 小浪底水库日水位(m) | 2008, 2009, 2018 | 黄河水利委员会 |
| 海表盐度 | 5月份黄河河口平均海表盐度(PSU) | 1982, 1984, 1985, 2002~2013, 2016~2018 | 马媛, 2006; 肖纯超等, 2012; 谷源泽等, 2019; Song等, 2019 |
| 低盐区 | 低盐区(盐度<27PSU)面积 | 2004~2009 | 肖纯超等, 2012 |
| 鱼卵 | 5月份黄河河口鱼卵密度(ind/m$^3$) | 1982, 2005, 2007~2011, 2014~2018 | 谷源泽等, 2019; Song等, 2019; 于守兵等, 2020 |

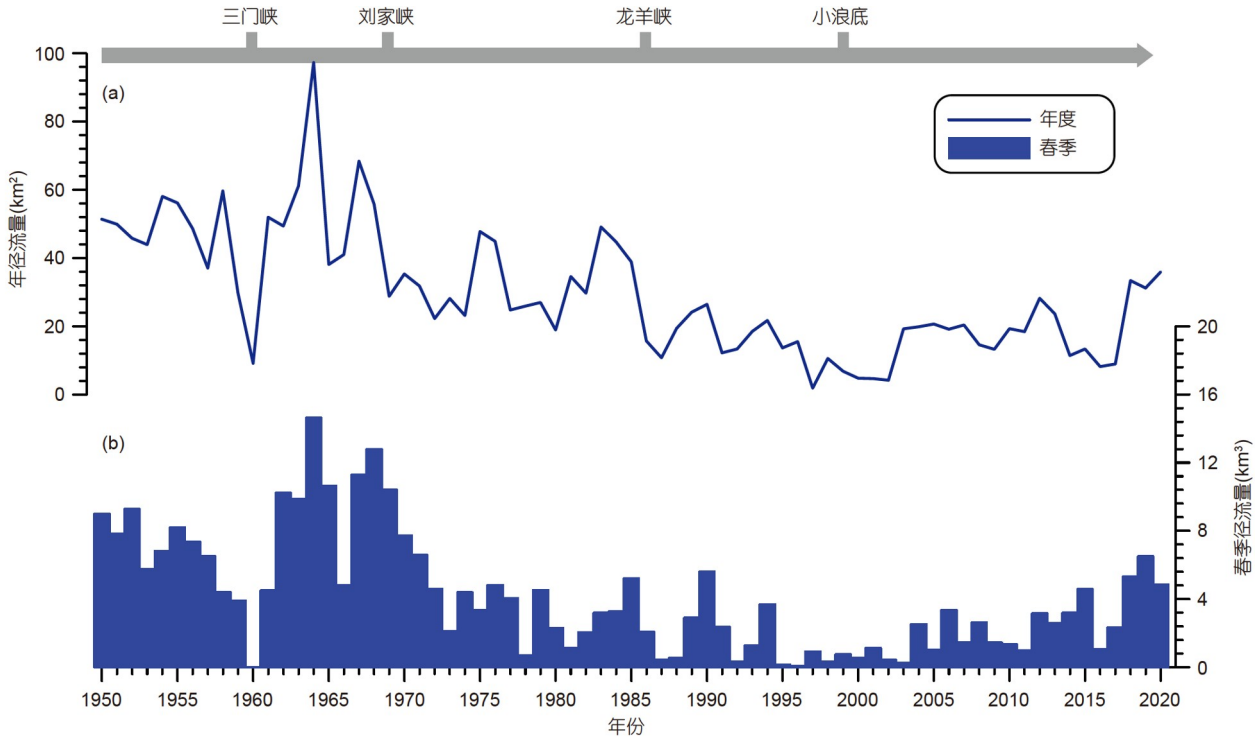



**图 2**　**1950~2020年黄河年际入海径流量(a)与春季入海径流量(b)变化**

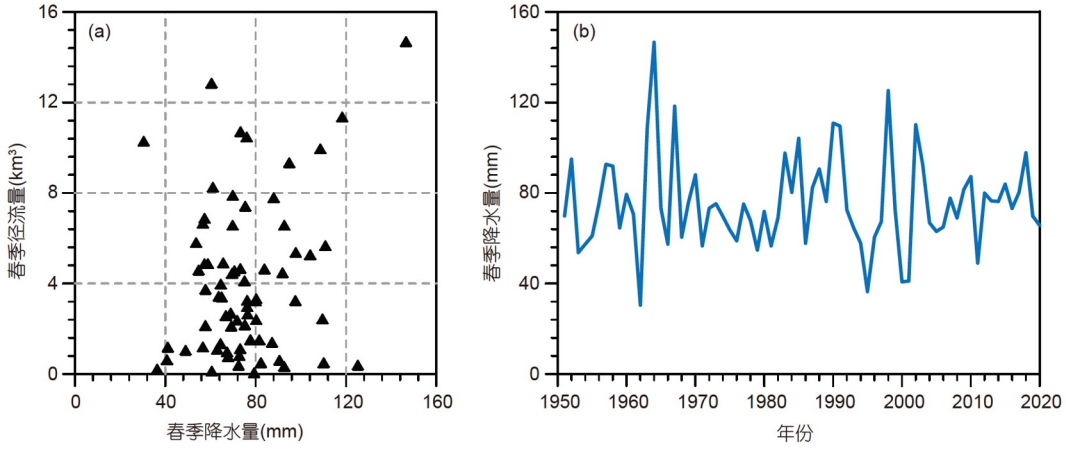



**图 3**　**黄河流域春季降水与春季入海径流相关关系(a)以及1950~2020年黄河流域春季降水变化(b)**

1.50km$^3$/a(图2b), 减少了63%. 黄河流域春季降水与春季径流不同步的变化特征表明, 强烈的人类活动已经超过自然因素的影响, 成为控制黄河春季径流变化的主要因素.

黄河流域水库的兴建与水资源消耗量的增加是影响黄河径流量及其时空输运特征变化的关键因素(Yang等, 2020). 1950年以来, 黄河流域修建了3000多座水库, 总库容高达72.7km$^3$, 约为黄河年径流量的数倍(Dai等, 2009). 这些水库通过调控下泄流量, 改变了黄河的自然水文过程(Wang等, 2006). 三门峡水库位于小浪底水库上游约130km处, 本文以三门峡水库作为控制站, 揭示了春季黄河由中游向下输运的径流变化(图4a).

自1950年以来, 受流域内自然和人为因素的叠加

影响, 三门峡春季下泄径流呈现明显的阶段性下降的趋势(图4a). 同时, 黄河下游地区水资源消耗量持续增加. 一方面, 随着人口的爆炸式增长和下游城市建设与城乡发展, 黄河下游工农业和居民用水需求显著增加(Xu等, 2010). 尤其是, 黄河下游是我国最重要的粮食和棉花生产基地之一, 灌溉了全国15%的耕地(Liu等, 2010). 另一方面, 水库大坝的兴建通过拦蓄和调控天然径流, 增加了水资源利用率, 促进了水资源消耗量的增加(Yang等, 2020). 因此, 自20世纪50年代以来, 黄河下游春季水资源消耗量增加了近4倍(图5). 1987~1999年, 黄河下游春季耗水量增加至5.31km$^3$/a, 占进入黄河下游径流总量的81%. 黄河上中游供水量降低, 加之下游耗水量的持续增加, 导致黄河春季入海流量显著减低, 从1950~1968年期间的7.78km$^3$/a下降到1987~1999年期间的1.50km$^3$/a(图2b).

### 4.2 小浪底水库调控对黄河春季入海径流的影响

小浪底水库位于黄河中游最后一段峡谷的出口处, 控制了黄河92.3%的流域面积, 在黄河向下游的物质输运方面扮演着重要的阀门角色(Wu等, 2021). 三门峡与花园口的流量关系变化清晰地反映了小浪底水库的重要调控作用(图4). 1999年小浪底水库建成前, 三门峡和花园口的春季径流具有显著的相关性, 相关系数为0.87(图4b). 然而, 小浪底水库投入使用后, 三门峡与花园口春季径流的相关系数降低至0.21, 两者关系不显著, 表明小浪底水库的拦蓄与调控已经成为影响黄河下游径流输运的关键因素.

小浪底水库的年内水位调控分为两个阶段: (1) 每年3~6月, 小浪底水库加大下泄流量腾空库容, 为汛期洪水提供必要的防洪库容保障; (2) 每年8~10月, 水库在汛期蓄水, 控制下泄流量, 保障下游洪水安全. 因此, 小浪底水库春季出库流量通常高于其入库流量(即三门峡水库出库流量). 过去的20年间, 小浪底水库春季合计过流153.49km$^3$, 其中约26%(40.20km$^3$)来自春季之前的库容蓄水, 这意味着除了三门峡径流输入外, 小浪底水库在每年春季为下游提供了约1.91km$^3$/a的额外水源补给. 因此, 尽管三门峡水库的春季径流由1987~1999年的6.59km$^3$/a减少至2000年后的5.08km$^3$/a(图4a), 但黄河春季入海径流却并未降低, 反而由1.50km$^3$/a增加至2.42km$^3$/a, 增加了约61%(图2b).

过去20年来小浪底水库的春季流量调控策略大致可以分为两个时期(图6a). 小浪底水库运行的第一个十年间(1999~2010年), 除2009和2010年的小规模蓄水外, 小浪底水库每年春季额外下泄1.08km$^3$的径流. 在这一时期, 腾空库容主要发生在6月, 春季流量排放相对有限. 以2008年为例, 从3月1日至5月31日, 小浪底水库水位252.12m降低至249.12m, 库容排放仅为0.59km$^3$(图6b). 近十年来(2011~2020年), 为了增加黄河春季入海流量、改善河口生态环境, 黄河水利委员会开始通过加大小浪底水库春季下泄流量实施春季生态补水(谷源泽等, 2019). 例如, 2018年3~5月, 小浪底水库水位快速降低了近20m, 库容排放量高达5.17km$^3$. 2011~2020年, 小浪底水库春季共计下泄84.05km$^3$的淡水, 其中40%来自小浪底水库的蓄水库容排放. 因此, 近十年来黄河春季入海径流增加至3.46km$^3$/a, 恢复至20世纪80年代水平(图2b).

### 4.3 春季生态补水对河口渔业资源的影响

河口地区是半封闭的沿岸水体, 该区资源丰富、初级生产力高、生物多样性丰富(Potter等, 2010). 尤其是, 入海河流输入的淡水与海水混合塑造了独特的河口区半咸水环境, 为鱼类产卵和仔稚鱼生长提供了重要的栖息地(Aguilar-Medrano等, 2019; Kindong等, 2021). 由于位于陆海交界地带, 物理过程、化学过程、生物过程等在此交织耦合, 河口地区的生化条件(如水温、盐度、酸碱度等)及其时空特征不断发生动态变化(Whitfield, 2021), 从而对河口生态系统产生一系列影响(Magoro等, 2020; Whitfield, 2021). 例如, 河口地区的盐度变化在鱼类产卵和仔稚鱼生长过程中起着重要作用, 从而影响河口鱼类资源丰度和多样性(Lehtonen和Kvarnemo, 2015).

黄河口是渤黄海鱼类重要的产卵场和栖息地之一, 在渤黄海生态系统结构与功能维持中扮演重要角色(Jin等, 2013). 例如, 成年鳓鱼通常栖息在30.8~34.0PSU的海域, 但每年四月份开始便迁移至22.0~24.0PSU的黄河口地区产卵(Zhang等, 2009). 然而, 近几十年来的强烈人类活动导致黄河口及邻近海域渔业资源发生显著变化(Shan等, 2013). 由于渤海的过度捕捞, 渔业资源密度(标准网具与船速拖网)由1982年的164.6kg/h迅速降低至1998~2008年的不足8kg/h (Jin等, 2013). 此外, 进一步的研究表明入海流量减少对海洋浮游植物、浮游动物和底栖生物产生重要

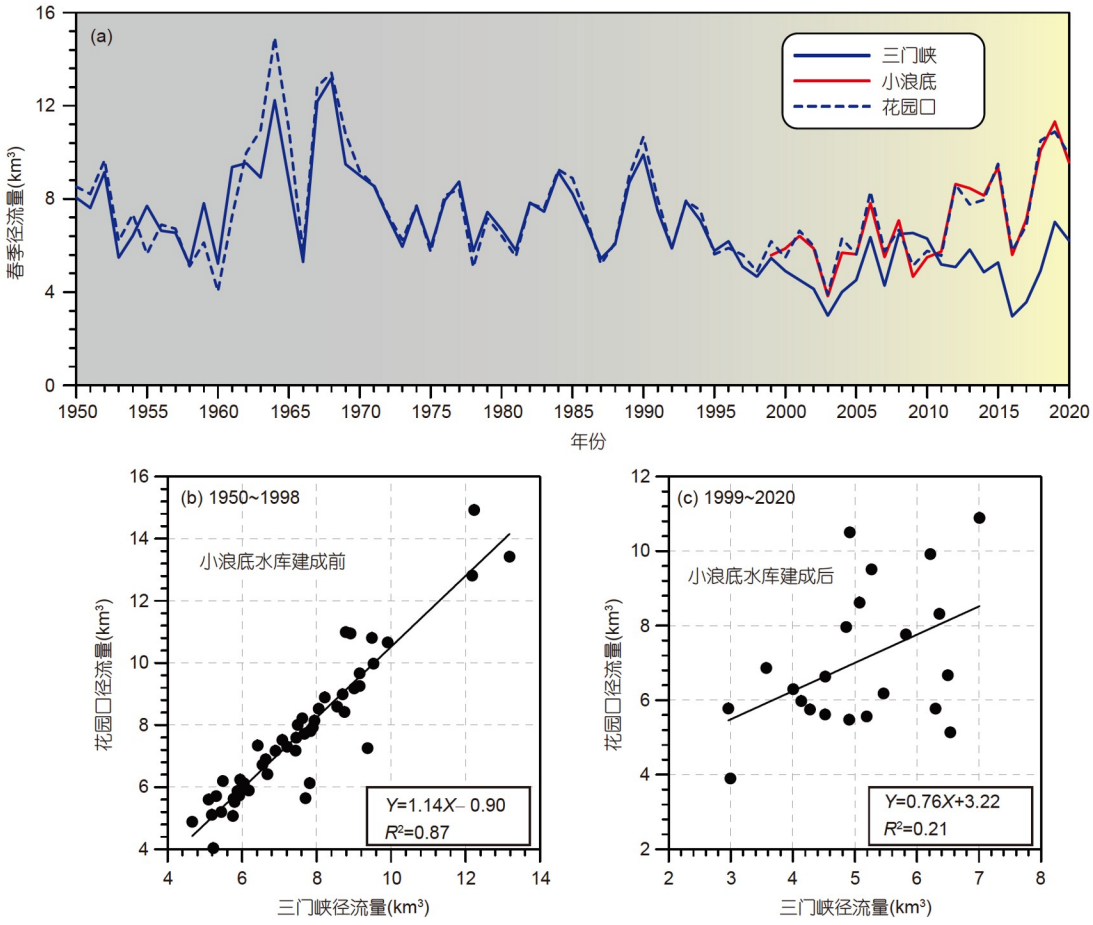



**图 4**　**1950年以来黄河三门峡、小浪底和花园口春季径流量变化(a)以及1950~1998年(b)和1999~2020年(c)三门峡和花园口春季流量相关关系**

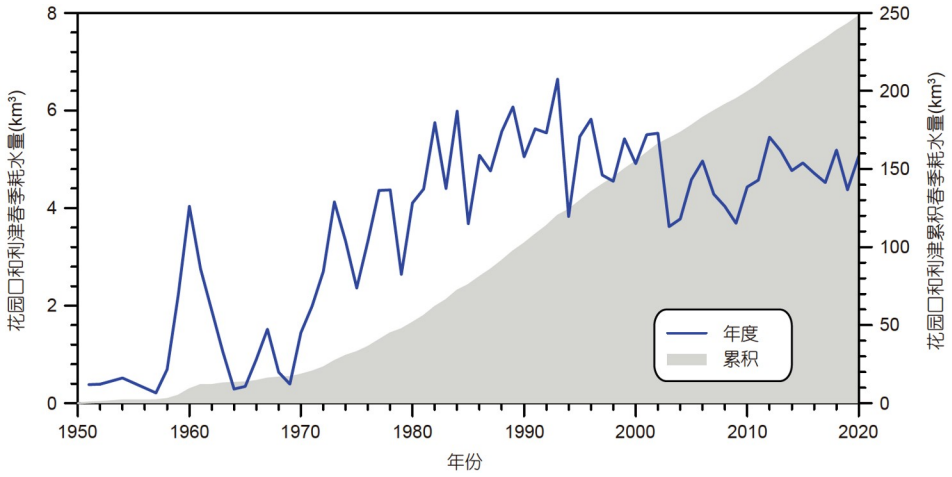



**图 5**　**1950~2020年黄河下游春季耗水量的逐年波动与累积变化**

影响, 导致河口区初级、次级生产力显著降低, 生物多样性面临严峻威胁(Sun等, 2013; Magoro等, 2020; Kindong等, 2021). 其中, 入海流量降低导致河口区盐度逐渐增加, 在低盐环境产卵和生长的鱼类的生存范围逐

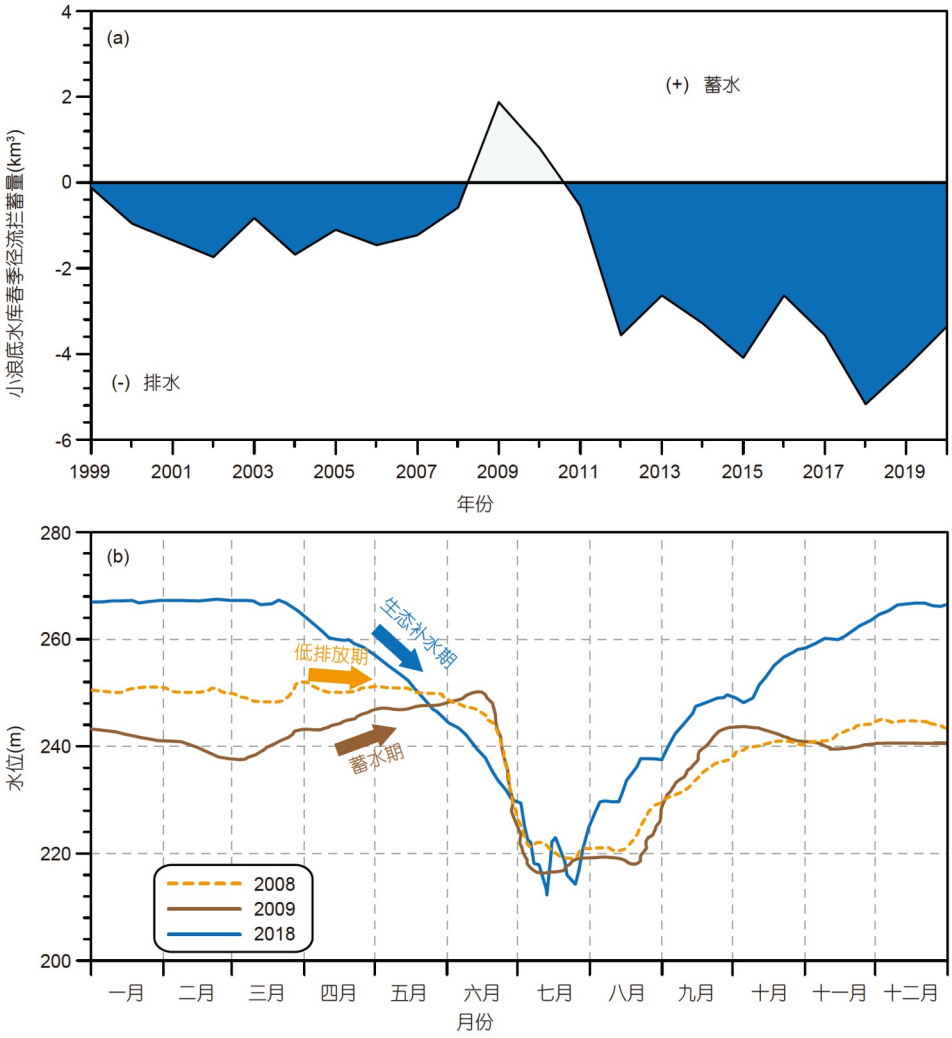



**图 6　1999~2020年小浪底水库春季径流拦蓄量(a)和不同拦蓄时期的典型年份小浪底水库水位变化(b)**

(b)中2008年为低排放时期, 2009年为春季蓄水期, 2018年为生态补水期

渐萎缩(Mao等, 2008; Lehtonen和Kvarnemo, 2015).

20世纪80年代, 每年春季黄河平均向海输送3.51km$^3$的淡水, 河口区平均盐度约为26.5PSU(图7a). 2002~2010年黄河春季入海径流降至1.61km$^3$/a, 导致河口区平均盐度增加至29.9PSU(图7a). 如表1所示, 黄河口鱼类种属多数适宜在半咸水环境中产卵, 河口区盐度上升导致其产卵场与栖息地环境恶化, 为黄河口鱼卵繁殖与仔稚鱼生长带来严峻威胁. 随着黄河入海流量逐渐降低, 依赖低盐环境的黄河鲂鱼、中华绒螯蟹(大闸蟹)等溯河性经济水产品和日本鳗鲡、达氏鲟等洄游性鱼类基本绝迹(Sun等, 2013; Yi等, 2021). 黄河口5月份的鱼卵密度由20世纪80年代的2.22ind/m$^3$下降至2002~2010年间的0.35ind/m$^3$(图7a), 仔稚鱼密度由1982年的0.29ind/m$^3$下降到2010年的0.14ind/m$^3$(Song等, 2019). 黄河口地区的鱼类资源丰度和多样性受到了严重破坏, 渔获量显著降低(Li等, 2023).

随着2011年之后黄河流域通过小浪底水库实施生态补水, 春季入海流量显著增加至2.58km$^3$/a, 导致河口区平均盐度降低至28.3PSU(图7a), 河口鱼类产卵与生长环境得到改善. 如图7b与图7c所示, 河口区鱼卵密度与黄河春季入海径流具有显著的相关性, 反映了入海径流对河口渔业资源的重要作用. 随着生态补水导致黄河春季入海径流的增加和河口区盐度的降低, 黄

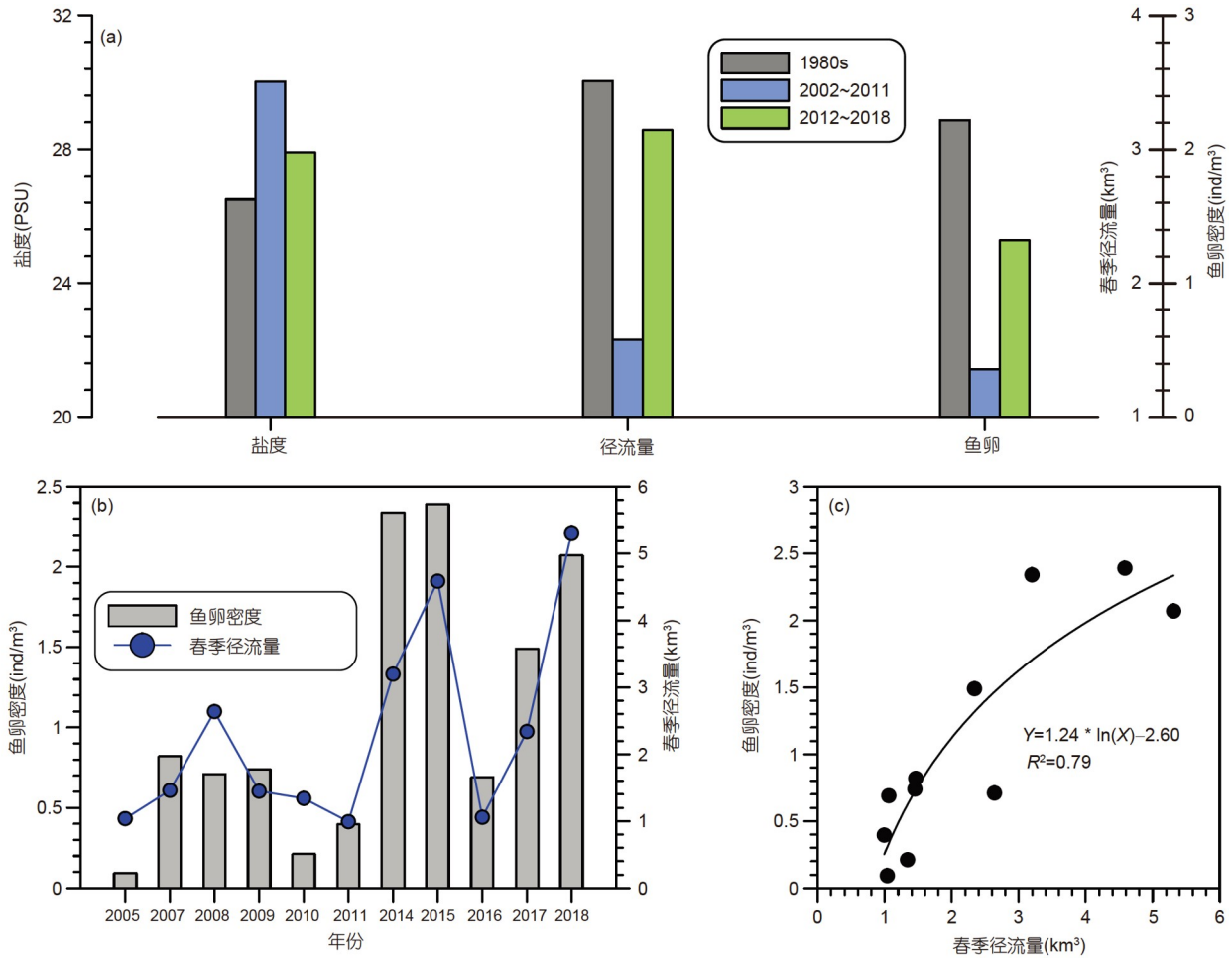



**图 7　黄河春季入海径流、盐度和鱼卵密度**

(a) 黄河春季入海径流、河口区平均盐度和鱼卵密度; (b) 不同年份黄河春季入海径流与鱼卵密度; (c) 黄河春季入海径流与鱼卵密度的相关关系

河口渔业资源得到恢复. 2011~2018年间黄河口鱼卵密度增加至1.06ind/m$^3$ (图7a), 仔稚鱼密度由2011年的0.15ind/m$^3$增加至2017年的0.26ind/m$^3$, 增加了73%(谷源泽等, 2019; Song等, 2019). 进一步的模拟研究表明, 近10年来黄河口渔业资源的恢复主要归因于入海径流变化(Yi等, 2021). 除鱼卵和仔稚鱼密度增加外, 鱼类丰度和多样性也得到明显改善, 梭鱼、半舌鳎鱼等的捕获量显著增加(李晓炜等, 2018), 已经消失近20年的黄河鲇鱼再次出现(于守兵等, 2020).

### 4.4　对未来水库调控的启示

近十年来黄河通过水库调控增加春季入海径流, 降低了河口区盐度, 为河口鱼类产卵和生长提供了适宜的盐度环境, 促进了河口渔业资源丰度和多样性增加. 由于河口盐度对鱼卵繁殖和仔稚鱼生长具有重要作用, 未来黄河小浪底水库春季生态补水应进一步考虑其对河口盐度的影响. 若以20世纪80年代作为参考, 黄河口平均海表盐度应维持在26~27PSU, 所需的春季入海径流应不少于3.3km$^3$(图8). 由于黄河年入海径流相对有限(图2a), 建议适当增加春季入海径流比例, 为河口鱼类产卵和仔稚鱼生长创造适宜的环境.

过去半个多世纪以来, 水库大坝的兴建改变了全球河流的自然水文过程(Lehner等, 2011; Zarfl等, 2014), 从而导致河流-河口生态系统发生了一系列重要变化(Wu等, 2019). 例如, 水库“蓄洪排枯”的调控模式使得大多数河流径流呈现均一化趋势, 导致河口温度、盐度、营养盐输入等条件的快速变化, 进而引起了河口初级、次级生产力和生物群落结构的显著调整

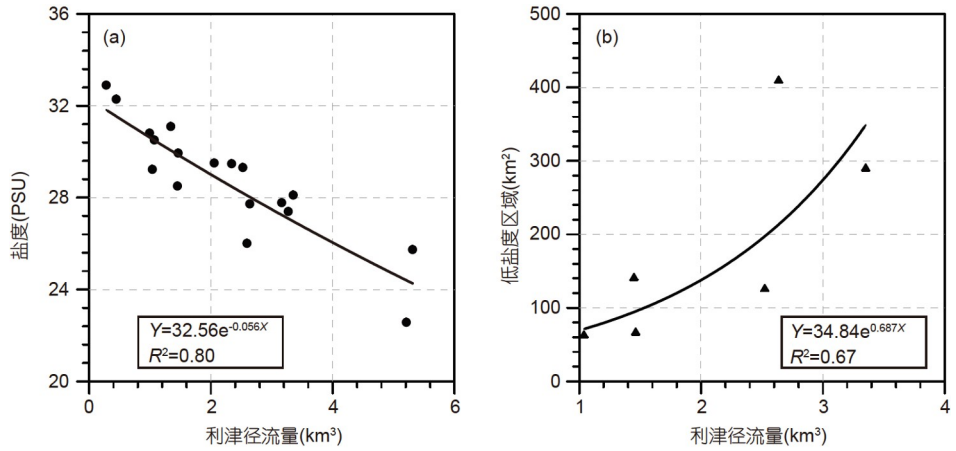



**图 8　黄河春季入海径流与河口平均盐度(a)和河口<27PSU的面积(b)之间的相关关系**

(Baptista等, 2014; Domingues等, 2014). 黄河通过水库调控在河口鱼类的主要产卵时期(春季)增加入海径流, 为河口鱼类产卵和仔稚鱼的生长创造了适宜的盐度环境, 使得河口区渔业资源丰度和多样性得到恢复, 改善了河口生态环境. 近十年来黄河春季生态补水的有益探索, 为全球其他河流通过合理的人为调控缓解水库的负面生态效应、实现流域-河口协调发展提供了重要借鉴.

## 5　结论

受气候变化和人类活动的叠加影响, 近半个多世纪以来黄河流域发生了前所未有的重大变化, 导致河流-河口系统物质输运与生态环境的显著调整. 其中, 1999年投入使用的小浪底水库, 由于其关键的地理位置和广泛的流域控制面积, 成为影响黄河物质向下游输运最重要的工程措施之一. 小浪底水库建成前, 受流域水库建设、水土保持工程和沿程水资源消耗量增加等的综合影响, 黄河春季径流呈阶段性递减趋势, 由1950~1968年的7.78km$^3$/a降低至1987~1999年的1.50km$^3$/a. 径流降低引起河口盐度逐渐增加, 为春季在河口低盐环境中产卵和繁殖的鱼类群落带来严峻威胁. 小浪底水库投入使用后, 为了保障有效的防洪库容, 在春季增加水库下泄流量腾空库容, 黄河春季入海径流有所增加. 尤其是自2011年开始, 黄河水利委员会开始在春季实施生态补水, 进一步加大小浪底水库春季排水量, 增加春季入海径流, 为河口鱼类产卵与仔稚鱼生长创造适宜的盐度环境. 2011~2020年间, 黄河春季入海径流增加至3.46km$^3$/a, 河口盐度由29.9PSU降低至28.3PSU. 随着生存环境的改善, 河口鱼卵密度与仔稚鱼密度显著增加, 河口渔业资源丰度和多样性得到明显改善. 在全球水库大坝引起的负面生态效应逐渐显现的背景下, 黄河流域通过小浪底水库实施生态补水, 改善了河口生态环境, 缓解了水库的负面影响, 体现了水库调控在维持河口生态健康与可持续发展中的潜力, 为以陆海统筹的思路实现全球河流-河口协调发展提供了重要的案例参考.

**致谢**　感谢编委及审稿人对本文提出的宝贵意见. 感谢黄河水利委员会、中国气象局国家气候中心、国家科技基础条件平台-国家地球系统科学数据中心提供的数据支持.

## 参考文献

谷源泽, 徐丛亮, 张朝晖, 毕乃双, 赵林林, 刘艳芬, 周斌. 2019. 黄河入海淡水对海洋生态调控响应研究. 人民黄河, 41: 68–75

李晓炜, 赵建民, 刘辉, 张华, 侯西勇. 2018. 渤黄海渔业资源三场一通道现状、问题及优化管理政策. 海洋湖沼通报, 5: 147–157

马媛. 2006. 黄河入海径流量变化对河口及邻近海域生态环境影响研究. 硕士学位论文. 青岛: 中国海洋大学. 1–84

肖纯超, 张龙军, 杨建强. 2012. 2004–2009年黄河口近岸海域低盐区面积的变化趋势研究. 中国海洋大学学报(自然科学版), 42: 40–46

于守兵, 张朝晖, 徐丛亮. 2020. 黄河河口鱼类春季生态需水. 水利水电科技进展, 40: 1–7

Aguilar-Medrano R, Durand J R, Cruz-Escalona V H, Moyle P B. 2019. Fish functional groups in the San Francisco Estuary: Understanding new fish assemblages in a highly altered estuarine ecosystem. Estuar

Coast Shelf Sci, 227: 106331
Baptista J, Martinho F, Nyitrai D, Pardal M A, Dolbeth M. 2014. Long-term functional changes in an estuarine fish assemblage. Mar Pollution Bull, 97: 125–134
Chen D, Shen W, Liu Q, Jiao Y, Zeng X, Ren Y. 2000. The geographical characteristics and fish species diversity in the Laizhou Bay and Yellow River estuary. J Fish Sci China, 7: 46–52
Chícharo M A, Chícharo L, Morais P. 2006. Inter-annual differences of ichthyofauna structure of the Guadiana estuary and adjacent coastal area (SE Portugal/SW Spain): Before and after Alqueva dam construction. Estuar Coast Shelf Sci, 70: 39–51
Dai S B, Yang S L, Li M. 2009. The sharp decrease in suspended sediment supply from China's rivers to the sea: Anthropogenic and natural causes. Hydrol Sci J, 54: 135–146
Domingues R B, Barbosa A B, Galvão H M. 2014. River damming leads to decreased phytoplankton biomass and disappearance of cyanobacteria blooms. Estuar Coast Shelf Sci, 136: 129–138
Dudgeon D, Arthington A H, Gessner M O, Kawabata Z, Knowler D J, Lévêque C, Naiman R J, Prieur-Richard A, Soto D, Stiassny M L J, Sullivan C A. 2006. Freshwater biodiversity: Importance, threats, status and conservation challenges. Biol Rev, 81: 163–182
Freeman M C, Marcinek P A. 2006. Fish assemblage responses to water withdrawals and water supply reservoirs in piedmont streams. Environ Manage, 38: 435–450
Fu M, Zhao L, Zhang Z, Qu P, Song H, Yi S, Wang Z. 2023. Phytoplankton assemblage distribution patterns under different Yellow River freshwater discharge scenarios. J Sea Res, 192: 102348
Gupta H, Kao S J, Dai M. 2012. The role of mega dams in reducing sediment fluxes: A case study of large Asian rivers. J Hydrol, 464-465: 447–458
Hu B, He Y, Lü X, Li J, Wang H, Bi N. 2019. Impact of reservoir operations on glycerol dialkyl glycerol tetraether transportation in suspended particulate matter from the Yellow River. Cont Shelf Res, 175: 99–109
Jin X S, Shan X J, Li X S, Wang J, Cui Y, Zuo T. 2013. Long-term changes in the fishery ecosystem structure of Laizhou Bay, China. Sci China Earth Sci, 56: 366–374
Kindong R, Chen J, Dai L, Gao C, Han D, Tian S, Wu J, Ma Q, Tang J. 2021. The effect of environmental conditions on seasonal and inter-annual abundance of two species in the Yangtze River estuary. Mar Freshwater Res, 72: 493–506
Kong D, Miao C, Duan Q, Li J, Zheng H, Gou J. 2022. Xiaolangdi Dam: A valve for streamflow extremes on the lower Yellow River. J Hydrol, 606: 127426
Lehner B, Liermann C R, Revenga C, Vörösmarty C, Fekete B, Crouzet P, Döll P, Endejan M, Frenken K, Magome J, Nilsson C, Robertson J C, Rödel R, Sindorf N, Wisser D. 2011. High-resolution mapping of the world's reservoirs and dams for sustainable river-flow management. Front Ecol Environ, 9: 494–502
Lehtonen T K, Kvarnemo C. 2015. Density effects on fish egg survival and infections depend on salinity. Mar Ecol Prog Ser, 540: 183–191
Li F, Zhu M, Chen W, Su B, Yang Y, Wang B. 2023. Interannual variation of ichthyoplankton community structure in the Yellow River estuary, China. Water, 15: 1040
Liu D, Li X, Emeis K C, Wang Y, Richard P. 2015. Distribution and sources of organic matter in surface sediments of Bohai Sea near the Yellow River Estuary, China. Estuar Coast Shelf Sci, 165: 128–136
Liu L, Luo Y, He C, Lai J, Li X. 2010. Roles of the combined irrigation, drainage, and storage of the canal network in improving water reuse in the irrigation districts along the lower Yellow River, China. J Hydrol, 391: 157–174
Lu X X. 2004. Vulnerability of water discharge of large Chinese rivers to environmental changes: An overview. Reg Environ Change, 4: 182–191
Magoro M L, Perissinotto R, Dalu T, Whitfield A K. 2020. Fish and tadpole composition as an indication of differences between micro-estuaries and micro-outlets in the Eastern Cape Province, South Africa. Estuar Coast Shelf Sci, 242: 106865
Mao X, Jiang W, Zhao P, Gao H. 2008. A 3-D numerical study of salinity variations in the Bohai Sea during the recent years. Cont Shelf Res, 28: 2689–2699
Meybeck M, Vörösmarty C. 2005. Fluvial filtering of land-to-ocean fluxes: From natural Holocene variations to Anthropocene. Compt Rend Géosci, 337: 107–123
Miao C, Gou J, Fu B, Tang Q, Duan Q, Chen Z, Lei H, Chen J, Guo J, Borthwick A G L, Ding W, Duan X, Li Y, Kong D, Guo X, Wu J. 2022. High-quality reconstruction of China's natural streamflow. Sci Bull, 67: 547–556
Miao C, Ni J, Borthwick A. 2010. Recent changes of water discharge and sediment load in the Yellow River basin, China. Prog Phys Geogr-Earth Envir, 34: 541–561
Milliman J D, Meade R H. 1983. World-wide delivery of river sediment to the oceans. J Geol, 91: 1–21
Murphy C A, Johnson S L, Gerth W, Pierce T, Taylor G. 2021. Unintended consequences of selective water withdrawals from reservoirs alter downstream macroinvertebrate communities. Water Resource Res, 57: 1–3
Neto J M, Teixeira H, Patrício J, Baeta A, Veríssimo H, Pinto R, Marques J C. 2010. The response of estuarine macrobenthic communities to natural- and human-induced changes: Dynamics and ecological quality. Estuar Coasts, 33: 1327–1339
Nijssen B, O'Donnell G M, Lettenmaier D P, Lohmann D, Wood E F. 2001. Predicting the discharge of global rivers. J Clim, 14: 3307–

3323

Nilsson C, Reidy C A, Dynesius M, Revenga C. 2005. Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems. Science, 308: 405–408

Potter I C, Chuwen B M, Hoeksema S D, Elliott M. 2010. The concept of an estuary: A definition that incorporates systems which can become closed to the ocean and hypersaline. Estuar Coast Shelf Sci, 87: 497–500

Qing S, Zhang J, Cui T, Bao Y. 2013. Retrieval of sea surface salinity with MERIS and MODIS data in the Bohai Sea. Remote Sens Environ, 136: 117–125

Raimonet M, Cloern J E. 2017. Estuary-ocean connectivity: Fast physics, slow biology. Glob Change Biol, 23: 2345–2357

Shan X, Sun P, Jin X, Li X, Dai F. 2013. Long-term changes in fish assemblage structure in the Yellow River estuary ecosystem, China. Mar Coast Fish, 5: 65–78

Song Y, Zhang L, Luo X. 2019. Spatiotemporal distribution of fish eggs and larvae in the Huanghe (Yellow) River estuary, China in 2005–2016. J Ocean Limnol, 37: 1625–1637

Sun T, Xu J, Yang Z F. 2013. Environmental flow assessments in estuaries based on an integrated multi-objective method. Hydrol Earth Syst Sci, 17: 751–760

Syvitski J, Ángel J R, Saito Y, Overeem I, Vörösmarty C J, Wang H, Olago D. 2022. Earth's sediment cycle during the Anthropocene. Nat Rev Earth Environ, 3: 179–196

Wang H, Wu X, Bi N, Li S, Yuan P, Wang A, Syvitski J P M, Saito Y, Yang Z, Liu S, Nittrouer J. 2017. Impacts of the dam-orientated water-sediment regulation scheme on the lower reaches and delta of the Yellow River (Huanghe): A review. Glob Planet Change, 157: 93–113

Wang H, Yang Z, Saito Y, Liu J P, Sun X. 2006. Interannual and seasonal variation of the Huanghe (Yellow River) water discharge over the past 50 years: Connections to impacts from ENSO events and dams. Glob Planet Change, 50: 212–225

Wang H, Yang Z, Saito Y, Liu J P, Sun X, Wang Y. 2007. Stepwise decreases of the Huanghe (Yellow River) sediment load (1950–2005): Impacts of climate change and human activities. Glob Planet Change, 57: 331–354

Wang S, Fu B, Piao S, Lü Y, Ciais P, Feng X, Wang Y. 2016. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes. Nat Geosci, 9: 38–41

Whitfield A K. 2021. Estuaries—How challenging are these constantly changing aquatic environments for associated fish species? Environ Biol Fish, 104: 517–528

Wu H, Chen J, Xu J, Zeng G, Sang L, Liu Q, Yin Z, Dai J, Yin D, Liang J, Ye S. 2019. Effects of dam construction on biodiversity: A review. J Clean Product, 221: 480–489

Wu X, Bi N, Syvitski J, Saito Y, Xu J, Nittrouer J A, Bianchi T S, Yang Z, Wang H. 2020a. Can reservoir regulation along the yellow river be a sustainable way to save a sinking delta? Earths Future, 8: e2020EF001587

Wu X, Wang H, Bi N, Saito Y, Xu J, Zhang Y, Lu T, Cong S, Yang Z. 2020b. Climate and human battle fordominance over the Yellow River's sediment discharge: From the Mid-Holocene to the Anthropocene. Mar Geol, 425: 106188

Wu X, Wang H, Bi N, Xu J, Nittrouer J A, Yang Z, Lu T, Li P. 2021. Impact of artificial floods on the quantity and grain size of river-borne sediment: A case study of a dam regulation scheme in the Yellow River catchment. Water Resour Res, 57: e2021WR029581

Wu X, Yue Y, Borthwick A G L, Slater L J, Syvitski J, Bi N, Yang Z, Wang H. 2023. Mega-reservoir regulation: A comparative study on downstream responses of the Yangtze and Yellow rivers. Earth-Sci Rev, 245: 104567

Xu K, Milliman J D, Xu H. 2010. Temporal trend of precipitation and runoff in major Chinese Rivers since 1951. Glob Planet Change, 73: 219–232

Yang S L, Shi B, Fan J, Luo X, Tian Q, Yang H, Chen S, Zhang Y, Zhang S, Shi X, Wang H. 2020. Streamflow decline in the Yellow River along with socioeconomic development: Past and future. Water, 12: 823

Yi Y, Liu Q, Zhang J, Zhang S. 2021. How do the variations of water and sediment fluxes into the estuary influence the ecosystem? J Hydrol, 600: 126523

Zarfl C, Lumsdon A E, Berlekamp J, Tydecks L, Tockner K. 2014. A global boom in hydropower dam construction. Aquat Sci, 77: 161–170

Zhang J, Li F, Lv Q, Wang Y, Yu J, Gao Y, Ren Z, Zhang X, Lv Z. 2021. Impact of the Water-Sediment Regulation Scheme on the phytoplankton community in the Yellow River estuary. J Clean Product, 294: 126291

Zhang J, Takita T, Zhang C. 2009. Reproductive biology of Ilisha elongata (Teleostei: Pristigasteridae) in Ariake Sound, Japan: Implications for estuarine fish conservation in Asia. Estuar Coast Shelf Sci, 81: 105–113

Zhang J, Zhang G, Du Y, Zhang A, Chang Y, Zhou Y, Zhu Z, Wu Y, Zhang Z, Liu S. 2022. From the water sources of the Tibetan Plateau to the ocean: State of nutrients in the Changjiang linked to land use changes and climate variability. Sci China Earth Sci, 65: 2127–2174

( 责任编委: 戴民汉)