

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.01.021

# 小浪底水利枢纽对黄河下游生态的影响分析

尚文绣, 彭少明, 王煜, 严登明, 郑小康, 方洪斌

(黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003)

**摘要:**为了准确量化小浪底水利枢纽对径流状态的影响,提出了水库生态影响与贡献率定量分析方法,对比分析了不同时段有无水库两种情景下的径流状态,揭示了水库对径流状态的影响,并通过与实测径流状态变化对比来量化水库的贡献率。结果显示:2000—2019年,小浪底水利枢纽年均减少下游利津断面断流81.15 d,减少生态基流、关键期最小生态流量和关键期适宜生态流量的不达标天数75.25 d、31.35 d和27.10 d,增加关键期入海水量23.71亿 $\text{m}^3$ ;与1980—1999年相比,2000—2019年黄河天然径流量减少10.59%,三门峡断面实测来水量减少22.15%,同时下游用水量增加,不利于河流生态流量保障;小浪底水利枢纽扭转了来水和取水的不利影响,保障了黄河下游径流和生态状态持续好转,对利津断面防断流、生态基流保障和关键期入海水量增加的贡献率分别为187.85%、137.32%和125.83%。

**关键词:**生态影响;径流状态变化;断流;生态流量;小浪底水利枢纽

**中图分类号:**TV213 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)01-0160-07

**Influence of Xiaolangdi Reservoir on ecological condition of the Lower Yellow River** // SHANG Wenxiu, PENG Shaoming, WANG Yu, YAN Dengming, ZHENG Xiaokang, FANG Hongbin (Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China)

**Abstract:** This paper proposes a method to quantify the influence and contribution rate of the Xiaolangdi Reservoir on runoff accurately. The influence of the reservoir on runoff can be quantified by comparing the runoff under the scenarios with and without the reservoir. By comparing the runoff influenced by the reservoir and the measured runoff, the contribution rate of the reservoir can be quantified. Results show that during 2000—2019, the Xiaolangdi Reservoir decreased the duration of flow cutoff events in the Lijin Section by 81.15 d annually; decreased the annual substandard days of ecological baseflow, minimum ecological flow in the critical period, and suitable ecological flow in the critical period in the Lijin Section by 75.25 d, 31.35 d, and 27.10 d, respectively; and increased the water into the sea in the critical period by 2.371 billion  $\text{m}^3$  annually. Compared with the runoff in 1980—1999, the annual natural runoff of the Yellow River and the annual measured runoff in the Sanmenxia Section in 2000—2019 decreased by 10.59% and 22.15%, respectively, whereas the water consumption in the lower reaches increased, leading to difficulties in guaranteeing the ecological flow. The Xiaolangdi Reservoir has eliminated these adverse impacts and improved the condition of runoff and riverine ecosystem. The contribution rates of the Xiaolangdi Reservoir on flow cutoff prevention in the Lijin Section, ecological baseflow protection in the Lijin Section, and increase of water into the sea in critical periods are 187.85%, 137.32%, and 125.83%, respectively.

**Key words:** ecological impact; runoff alteration; flow cutoff; ecological flow; Xiaolangdi Reservoir

水库建设运行是河流开发的重要方式,为人类带来了巨大的经济效益和社会效益,同时又对河流生态系统造成了不同程度的影响<sup>[1-2]</sup>。截至2020年4月全球已有超过5.8万座大坝(坝高大于15 m,或坝

高大于5 m且库容大于300万 $\text{m}^3$ 的水坝)<sup>[3]</sup>。水库提供了30%~40%的灌溉用水和约17%的电力<sup>[2]</sup>,同时,水库造成的河道阻隔、径流变化等引发了复杂的生态问题<sup>[4-5]</sup>。在水库等工程影响下,河长

基金项目:国家重点研发计划(2021YFC3200203);河南省重大科技专项(201300311400);国家自然科学基金(51879240)

作者简介:尚文绣(1990—),女,高级工程师,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail: wenzil1191@163.com

通信作者:严登明(1989—),男,工程师,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail: 18519500795@163.com

1000 km 以上的河流中约 2/3 处于非自然流动状态<sup>[6]</sup>。近年来,水库的生态保护作用得到了越来越多的重视,下泄生态流量、塑造人工洪水等改善生态的措施在很多水库中得到应用和研究<sup>[7-10]</sup>。

改变径流过程是水库调度对河流生态最直接的影响,进而引发其他环境要素和生物资源的连锁变化<sup>[11-12]</sup>。水库对径流的影响的定量分析是长期的研究热点,已经形成了大量评价指标体系和方法,其中应用最广泛的是 IHA 指标体系及 RVA 方法 (IHA-RVA)<sup>[13-14]</sup>,众多研究采用该方法评价了水库运行前后河流径流过程的变化,以此反映水库对径流的影响<sup>[15-18]</sup>。然而河流径流演变还受到气候变化、取用水等多因素复合影响,水库运行前后两个时段的径流变化反映了多因素对径流的复合作用,但难以厘清水库在其中发挥的作用<sup>[19]</sup>,定量分析水库对径流变化的影响和贡献率是当前研究的难点。

小浪底水利枢纽是控制黄河下游水沙的关键工程,对下游河流生态产生了重要影响。相关研究主要集中在小浪底水利枢纽水沙调控对下游泥沙冲淤、河道形态、水质、浮游生物等的影响<sup>[20-22]</sup>,以及对黄河三角洲湿地修复及近海水生态的影响<sup>[23-25]</sup>,但鲜有研究量化小浪底水利枢纽对黄河下游径流变化和生态流量保障的作用与贡献,也缺少以水为纽带解析水库对黄河下游生态影响的研究。本文提出水库生态影响与贡献率定量分析方法,量化小浪底水利枢纽对黄河下游径流状态变化的影响,明确小浪底水利枢纽在防断流、生态流量保障等方面的贡献率,分析水库建设运行对黄河下游生态的影响。

## 1 研究方法 with 数据

### 1.1 研究区域

研究区域为小浪底水库坝下至黄河入海口 (图 1)。小浪底水利枢纽于 1999 年底投入运行,总库容 126.5 亿 m<sup>3</sup>,控制 92% 的流域面积、87% 的天然径流量和近 100% 的输沙量。水库工程以防洪 (包括防凌)、减淤为主,兼顾供水、灌溉、发电,近年来新增了生态调度任务。

### 1.2 水库生态影响定量分析方法

河流径流演变受到水库运行、气候变化、取用水等多因素复合影响,本文提出基于情景对比的水库生态影响定量分析方法。将分析时段定为 2000—2019 年,情景 1 代表了有小浪底水利枢纽调蓄时该时段下游的实测径流状态;情景 2 代表了没有小浪底水利枢纽时的评价时段内下游日径流的模拟状态 (表 1)。与情景 1 对比,情景 2 仅改变了小浪底水

利枢纽这一个影响因素,天然来水、取用水、上游工程运行等条件均与情景 1 保持一致。

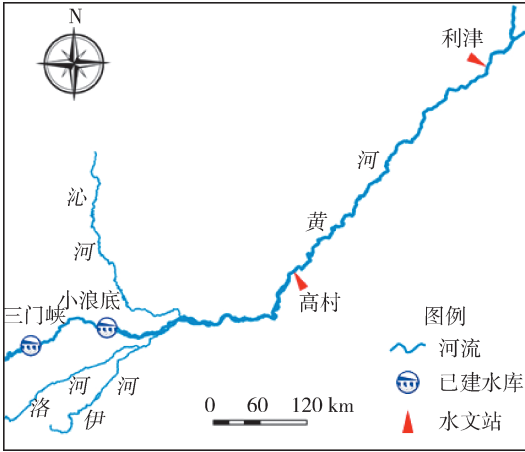


图 1 研究区域

Fig. 1 Study area

表 1 情景设置

Table 1 Scenario setting

| 情景分类 | 工程条件     | 评价时段        | 径流类型  |
|------|----------|-------------|-------|
| 情景 1 | 有小浪底水利枢纽 | 2000—2019 年 | 实测日径流 |
| 情景 2 | 无小浪底水利枢纽 | 2000—2019 年 | 模拟日径流 |

两种情景下的径流状态指标表达为

$$F_A = \{f_{A,1}, f_{A,2}, \cdots, f_{A,n}\} \tag{1}$$

$$F_S = \{f_{S,1}, f_{S,2}, \cdots, f_{S,n}\} \tag{2}$$

式中: $F_A$ 、 $F_S$  分别为情景 1 和情景 2 对应的小浪底水利枢纽下游的径流状态指标集; $f_{A,i}$ 、 $f_{S,i}$  分别为情景 1 和情景 2 下第  $i$  个径流状态指标,  $i=1,2,\cdots,n$ 。

小浪底水利枢纽对径流过程的影响  $E$  表示为

$$E = \{e_1, e_2, \cdots, e_n\} \tag{3}$$

其中

$$e_i = f_{A,i} - f_{S,i}$$

式中: $e_i$  为小浪底水利枢纽对第  $i$  个径流状态指标的影响。

情景 2 需要对小浪底水利枢纽的调蓄作用进行还原,得到没有水库运行情景下的径流。水库的入库径流代表了尚未经过该水库调蓄的径流状况,用入库径流代替出库径流就实现了对水库调蓄作用的还原,然后考虑水库至评价断面区间的来水、取水与蒸发渗漏损失,得到无小浪底水利枢纽情景下的径流过程:

$$Q_{S,t} = Q_{I,t-t_1} + Q_{B,t-t_2} - Q_{W,t-t_3} - Q_L \tag{4}$$

式中: $Q_{S,t}$  为没有小浪底水利枢纽运行的情况下评价断面第  $t$  天的平均流量, m<sup>3</sup>/s;  $Q_{I,t-t_1}$  为小浪底水利枢纽第  $t-t_1$  天的实测入库流量, m<sup>3</sup>/s;  $Q_{B,t-t_2}$  为第  $t-t_2$  天的区间来水流量, m<sup>3</sup>/s;  $Q_{W,t-t_3}$  为第  $t-t_3$  天的区间取水流量, m<sup>3</sup>/s;  $Q_L$  为区间日均蒸发渗漏损失流量, m<sup>3</sup>/s;  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$  分别为小浪底水利枢纽、支

流汇入地点和取水地点到评价断面的水流传播时间,  $d$ 。

### 1.3 水库贡献率定量分析方法

将情景 1 与 1980—1999 年实测日径流过程对比, 得到多因素影响下径流过程发生的实际变化。1980—1999 年实测日径流状态指标集  $F_c$  表达为

$$F_c = \{f_{c,1}, f_{c,2}, \dots, f_{c,n}\} \quad (5)$$

式中  $f_{c,i}$  为 1980—1999 年第  $i$  个径流状态指标,  $i = 1, 2, \dots, n$ 。

相对于 1980—1999 年, 2000—2019 年径流状态指标发生的变化  $V$  表示为

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\} \quad (6)$$

其中

$$v_i = f_{A,i} - f_{c,i}$$

式中  $v_i$  为 2000—2019 年第  $i$  个径流状态指标值相对于 1980—1999 年径流状态指标值的变化。

小浪底水利枢纽运行对径流状态指标变化  $V$  的贡献率  $P$  表示为

$$P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\} \quad (7)$$

其中

$$p_i = \frac{e_i}{v_i}$$

式中  $p_i$  为小浪底水利枢纽对第  $i$  个径流状态指标值变化  $v_i$  的贡献率。

### 1.4 指标与数据来源

选择断流天数、预警天数、生态基流不达标天数、关键期最小生态流量不达标天数、关键期适宜生态流量不达标天数和关键期入海水量作为径流状态指标反映水库的生态影响。历史上黄河下游频繁断流, 1980—1999 年利津断面有 16 年断流, 1997 年断流天数长达 202 d, 年均断流 43.20 d。断流给河流生态造成了严重破坏, 保障黄河不断流是黄河生态保护的重要任务。预警流量是黄河断流的预警信号, 低于预警流量会触发红色预警, 启动相应的抗旱应急调度预案。生态基流是为维护河湖等水生态系统功能不丧失, 需要保留的低限流量过程中的最小值。流量长期低于生态基流会给水生态系统造成严重破坏, 生态基流保证率原则上应不小于 90%。4—6 月是黄河下游和黄河口近海海域鱼类繁殖的关键期, 保障这一时段的生态流量和入海水量十分重要。预警流量、生态基流和关键期生态流量来自国务院批复实施的《黄河流域综合规划(2012—2030 年)》和水利部颁布实施的《第一批重点河湖生态流量保障目标(试行)》(表 2)。

选择高村断面和利津断面分析径流变化。利津断面临近黄河入海口, 是历史上黄河干流下游断流时间最长的断面, 能够反映下游终点处的径流变化和入海水量变化; 高村断面临近小浪底水利枢纽与

表 2 高村断面和利津断面特征流量 单位:  $m^3/s$

Table 2 Characteristic flows in Gaocun

| 断面 | Section and Lijin Section |      | unit: $m^3/s$ |     |           |     |
|----|---------------------------|------|---------------|-----|-----------|-----|
|    | 预警流量                      | 生态基流 | 4 月生态流量       |     | 5—6 月生态流量 |     |
|    |                           |      | 最小            | 适宜  | 最小        | 适宜  |
| 高村 | 120                       | 150  |               |     |           |     |
| 利津 | 30                        | 50   | 75            | 120 | 150       | 250 |

入海口的中间位置, 能够反映径流沿程变化。小浪底水库入库和出库断面、高村断面、利津断面实测日径流数据来自黄河水利委员会水文局相关水文站实测数据, 根据实测径流数据及水资源公报数据计算区间来水、取用水和蒸发渗漏水量数据。

## 2 结果与分析

### 2.1 径流还原结果

小浪底水利枢纽的调蓄对长系列径流量没有明显影响, 利津断面 2000—2019 年实测年均径流量 168.93 亿  $m^3$ , 还原年均径流量 169.05 亿  $m^3$ , 情景 2 部分时段下游取水条件差, 因此利津断面还原径流量略高于实测径流量。小浪底水利枢纽是不完全年调节水库, 对径流量年际变化影响较小, 主要改变径流过程的年内分布。小浪底水利枢纽的调蓄作用对高村断面和利津断面年内径流过程的影响趋势一致, 以利津断面为例, 2000—2019 年利津断面 4—7 月的月均流量实测值高于还原值, 8—11 月的月均流量实测值低于还原值, 还原前后 12—3 月的月均流量变化不大(图 2)。

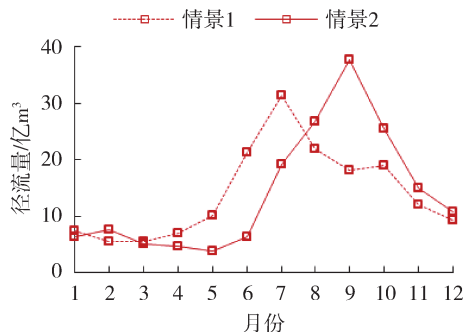


图 2 2000—2019 年利津断面实测与还原月均径流量

Fig. 2 Measured and restored average monthly runoff in Lijin Section in 2000—2019

### 2.2 对断流的影响

在情景 1 中, 2000—2019 年持续不断流, 情景 2 的断流天数如图 3 所示。情景 2 中, 径流模拟结果显示: 2000—2019 年高村断面年均断流 10.90 d, 年最长断流天数 50 d; 利津断面年均断流 81.15 d, 年最长断流天数 176 d。

情景 1 和情景 2 的断流预警天数如图 4 和表 3 所示。情景 1 显示小浪底水利枢纽运行初期黄河下

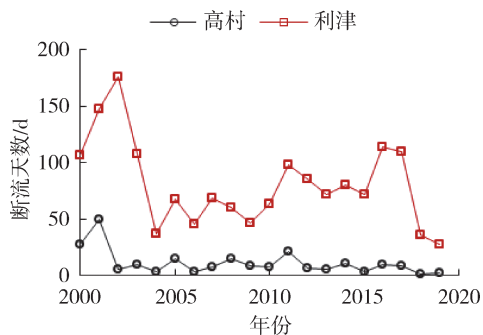


图3 情景2断面断流天数

Fig.3 Days of zero-flow under scenario 2

游仍有预警情况发生,但自2004年以来高村断面和利津断面都没有再发生过预警情况。情景2模拟结果显示,2000—2019年高村断面和利津断面每年都会发生预警情况,其中高村断面年均预警天数26.70 d,最长预警天数71 d;利津断面年均预警天数91.60 d,最长预警天数195 d。小浪底水利枢纽年均减少高村断面预警天数25.00 d,减少利津断面预警天数86.25 d。

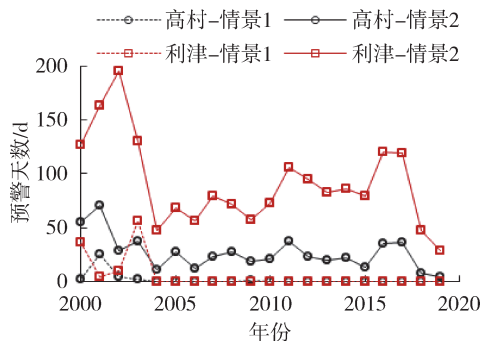


图4 两种情景下断面预警天数

Fig.4 Days of warning under two scenarios

### 2.3 对生态基流的影响

情景1和情景2的生态基流不达标天数如图5和表3所示。情景1中,2000—2019年高村断面和利津断面生态基流保证率分别为98.63%和94.16%,2004年以来很少有低于生态基流的情况发生。在情景2中,2000—2019年高村断面年均34.00 d流量小于生态基流,生态基流保证率90.68%;利津断面年均96.55 d流量小于生态基流,生态基流保证率仅73.55%,远低于生态基流目标保证率。小浪底水利枢纽年均减少高村断面生态基

流不达标29.00 d,减少利津断面生态基流不达标75.25 d。

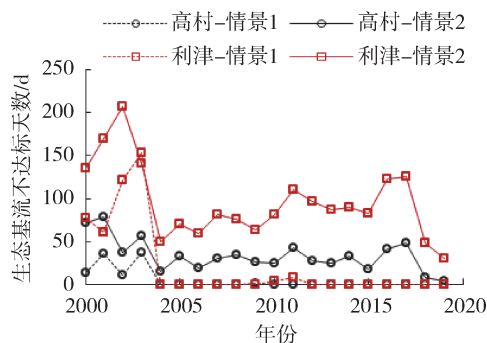


图5 两种情景下断面生态基流不达标天数

Fig.5 Substandard days of ecological baseflow under two scenarios

### 2.4 对关键期生态需水的影响

情景1和情景2的关键期生态流量不达标天数如图6和表3所示。情景1中,2000—2019年利津断面关键期最小生态流量年均不达标24.20 d,保证率73.41%;适宜生态流量年均不达标34.50 d,保证率62.09%。情景2模拟结果显示,没有小浪底水利枢纽将导致关键期生态流量不达标的问题更加严重,2000—2019年利津断面关键期最小生态流量最小生态流量年均不达标55.55 d,保证率仅38.96%;适宜生态流量年均不达标61.60 d,保证率仅32.31%。小浪底水利枢纽年均减少利津断面关键期最小生态流量不达标31.35 d,减少关键期适宜生态流量不达标27.10 d。

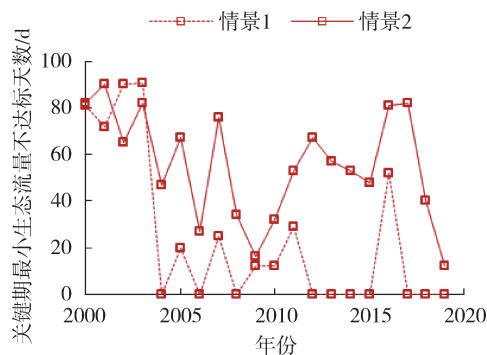


图6 两种情景下利津断面关键期最小生态流量不达标天数

Fig.6 Substandard days of minimum ecological flow in critical period in Lijin Section under two scenarios

表3 不同情景下高村和利津断面径流状态指标值及变化情况

Table 3 Values and variations of ecological indices in Gaocun and Lijin sections under different scenarios

| 情景  | 高村断面指标/d |        |           | 利津断面指标/d |        |           | 关键期入海水量/亿 m <sup>3</sup> |                |
|-----|----------|--------|-----------|----------|--------|-----------|--------------------------|----------------|
|     | 断流天数     | 预警天数   | 生态基流不达标天数 | 断流天数     | 预警天数   | 生态基流不达标天数 | 关键期最小生态流量不达标天数           | 关键期适宜生态流量不达标天数 |
| 情景1 | 0.00     | 1.70   | 5.00      | 0.00     | 5.35   | 21.30     | 24.20                    | 34.50          |
| 情景2 | 10.90    | 26.70  | 34.00     | 81.15    | 91.60  | 96.55     | 55.55                    | 61.60          |
| 变化量 | -10.90   | -25.00 | -29.00    | -81.15   | -86.25 | -75.25    | -31.35                   | -27.10         |

情景1和情景2的关键期入海水量如图7和表3所示。情景1中,年均关键期入海水量38.48亿m<sup>3</sup>,65%的年份关键期入海水量超过30亿m<sup>3</sup>。在情景2中,年均关键期入海水量下降至14.77亿m<sup>3</sup>,仅10%的年份关键期入海水量超过30亿m<sup>3</sup>。小浪底水利枢纽年均增加关键期入海水量23.71亿m<sup>3</sup>。

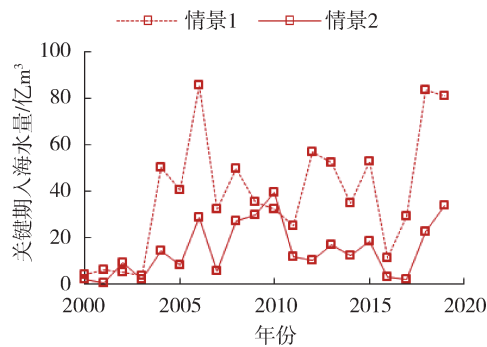


图7 两种情景下关键期入海水量

Fig.7 Water into sea in critical period under two scenarios

3 讨论

3.1 小浪底水利枢纽的贡献率

不同时段高村和利津断面径流状态指标值及变化情况如表4所示。与1980—1999年相比,2000—2019年黄河下游径流状态向有利于河流健康的方向转变:高村断面年均断流天数减少2.15d、断流预警天数减少16.55d、生态基流不达标天数减少17.25d,利津断面年均断流天数减少43.20d、断流预警天数减少59.10d、生态基流不达标天数减少54.80d、关键期最小生态流量不达标天数减少25.75d、关键期适宜生态流量不达标天数减少22.90d,关键期入海水量增加18.84亿m<sup>3</sup>。

与1980—1999年相比,2000—2019年黄河下游径流受到工程条件、天然径流、取用水等多因素的复合影响。小浪底水利枢纽对高村断面和利津断面

减少断流天数的贡献率分别为506.98%和187.85%;对高村断面和利津断面减少预警天数的贡献率分别为151.06%和145.94%;对高村断面和利津断面减少生态基流不达标天数的贡献率分别为168.12%和137.32%;对减少利津断面关键期最小生态流量不达标天数和适宜生态流量不达标天数的贡献率分别为121.75%和118.34%;对增加关键期入海水量的贡献率为125.83%。

3.2 来水与取水的影响

小浪底水利枢纽对高村断面和利津断面径流状态指标变化的贡献率均超过100%,说明影响黄河下游径流的其他因素的总贡献率为负值,即其他因素的复合作用会对黄河下游生态流量保障产生负面影响。

对来水和取水两个因素分析,天然径流量与取水量来自黄河流域水资源公报,三门峡断面实测径流量采用水文站实测数据,结果如表5所示。与1980—1999年相比,2000—2019年黄河天然年径流量减少56.33亿m<sup>3</sup>,衰减10.59%。三门峡断面2000—2019年实测年径流量比1980—1999年减少66.59亿m<sup>3</sup>,降幅22.15%,说明进入黄河下游的水量大幅减少;关键期来水减少的现象更加突出,三门峡断面2000—2019年4—6月实测径流量比1980—1999年减少28.70%。在天然径流量与下游实测来水均减少的同时,三门峡断面以下的引黄水量却在增加,2000—2019年年均引黄水量较1980—1999年增加3.19亿m<sup>3</sup>。分析结果表明,黄河天然径流量、下游实际来水量和下游引黄水量都在向不利于生态流量保障的方向发展。结合小浪底水利枢纽对生态的贡献率,说明小浪底水利枢纽消除了来水与取水的不利影响,并保障了下游生态持续好转。

在情景1下,2000—2003年高村和利津断面径流指标值相对较差,这一现象主要受到来水的影响。

表4 不同时段高村和利津断面实测径流状态指标值及变化情况

Table 4 Values and variations of ecological indices in Gaocun and Lijin sections in different periods

| 时段        | 高村断面指标/d |        |           | 利津断面指标/d |        |           | 关键期入海水量/亿m <sup>3</sup> |                |
|-----------|----------|--------|-----------|----------|--------|-----------|-------------------------|----------------|
|           | 断流天数     | 预警天数   | 生态基流不达标天数 | 断流天数     | 预警天数   | 生态基流不达标天数 | 关键期最小生态流量不达标天数          | 关键期适宜生态流量不达标天数 |
| 2000—2019 | 0.00     | 1.70   | 5.00      | 0.00     | 5.35   | 21.30     | 24.20                   | 34.50          |
| 1980—1999 | 2.15     | 18.25  | 22.25     | 43.20    | 64.45  | 76.10     | 49.95                   | 57.40          |
| 变化量       | -2.15    | -16.55 | -17.25    | -43.20   | -59.10 | -54.80    | -25.75                  | -22.90         |

表5 黄河来水与取水变化情况

单位:亿m<sup>3</sup>

Table 5 Change of flow and water withdrawal in the Yellow River

unit: 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>

| 时段         | 黄河天然年径流量 | 三门峡断面实测年径流量 | 三门峡断面实测4—6月径流量 | 三门峡断面以下引黄水量 |
|------------|----------|-------------|----------------|-------------|
| 2000—2019年 | 475.81   | 233.98      | 43.70          | 127.13      |
| 1980—1999年 | 532.14   | 300.56      | 61.29          | 123.93      |
| 变化量        | -56.33   | -66.59      | -17.59         | 3.19        |

2000—2002 年黄河来水偏枯,年均天然径流量仅 296.77 亿  $\text{m}^3$ ,比 2000—2019 年均值偏小 179.04 亿  $\text{m}^3$ ;三门峡断面年均实测径流量 151.04 亿  $\text{m}^3$ ,比 2000—2019 年均值偏小 82.94 亿  $\text{m}^3$ 。2003 年黄河天然径流量和三门峡断面实测径流量均略高于 2000—2019 年均值,但来水集中于汛期,1—5 月三门峡断面实测径流量仅 44.46 亿  $\text{m}^3$ ,比 2000—2019 年均值偏低 28.97 亿  $\text{m}^3$ ,导致 1—5 月预警和生态基流不达标频发;在 4—6 月,三门峡断面实测径流量仅 23.99 亿  $\text{m}^3$ ,比 2000—2019 年均值偏低 19.71 亿  $\text{m}^3$ ,导致关键期利津断面最小生态流量和适宜生态流量不达标天数较多,关键期入海水量仅 3.31 亿  $\text{m}^3$ 。

### 3.3 对生物资源的影响

小浪底水利枢纽对黄河下游生物资源具有多种影响。小浪底水利枢纽保障了下游不断流、提高了生态流量保证率,同时水库拦沙和调水调沙运用及天然来沙减少等因素使下游河道持续冲刷,根据水文站提供的断面形态实测数据,干流主要断面主槽最低高程较 20 世纪 90 年代降低 2 m 以上,平滩流量增加,河道形态趋于稳定,为生物提供了更加稳定的栖息环境。但相关研究显示,调水调沙期间高含沙水流导致水体溶解氧含量降低,且泥沙附着在鱼的腮丝上,造成鱼类大量窒息死亡<sup>[26]</sup>。在水库调度、污染治理、增殖放流等因素的共同影响下,不同时期鱼类调查结果显示黄河下游鱼类资源呈改善趋势:20 世纪 80 年代初黄河下游调查到鱼类 81 种<sup>[27]</sup>,2008 年仅调查到鱼类 41 种<sup>[28]</sup>,2018—2020 年下游河南段发现鱼类 62 种、山东段发现鱼类 53 种<sup>[23]</sup>;黄河水资源保护科学研究院对黄河下游鲤鱼的持续采样结果显示鲤鱼逐渐摆脱了低龄化、小型化趋势。

自 2008 年以来,小浪底水利枢纽通过塑造大流量向黄河三角洲淡水湿地恢复区生态补水,截至 2020 年累计补水 5.79 亿  $\text{m}^3$ ,有效修复了黄河三角洲退化湿地,遥感影像解译结果显示,黄河三角洲芦苇沼泽面积已经从 21 世纪初的 1.15 万  $\text{hm}^2$  增加到 2020 年的 1.73 万  $\text{hm}^2$ ;随着湿地修复和其他保护措施的实施,山东黄河三角洲国家级自然保护区鸟类多样性增加,2019 年保护区鸟类种类比 1992 年增加 85 种<sup>[23,29]</sup>。

### 3.4 小浪底水利枢纽生态调度优化建议

小浪底水利枢纽使下游防断流和生态基流都得到了较好的保障,但关键期生态流量的保证率较低。相关研究显示,小浪底水利枢纽运行后下游生态水量较充足,因此需要进一步强化生态调度,调节年内

径流过程,增加关键期河道内生态供水<sup>[23]</sup>。

近 30 年来黄河天然来水量呈显著减少趋势,用水需求却在不断增加,此外人民对优美生态环境的需求日益增长,小浪底水利枢纽未来将面临更加严峻的水资源供需矛盾,调度难度进一步加大。需要探索不同调度任务间的耦合机制与协调方法,实现一水多用,解决缺水区域多目标调度难题。

## 4 结 语

本文提出了一种水库生态影响与贡献率定量分析方法,研究了小浪底水利枢纽对黄河下游生态的影响,结果表明:小浪底水利枢纽的运行保障了黄河下游连续 20 年不断流,显著减少了预警天数,提高了生态基流、关键期最小生态流量和关键期适宜生态流量的保障程度,增加了关键期入海水量,在改善黄河下游及三角洲生物栖息环境、提升生物数量和多样性上发挥了重要作用;小浪底水利枢纽扭转了近 20 年天然来水减少、河道外取水增加等不利影响,保障了径流过程向有利于河流生态健康的方向转变,在高村断面和利津断面生态维持的贡献率均超过 100%。

IHA-RVA 等采用建库前后时段对比的分析方法难以从多因素复合作用中分离出水库单一因素的作用,本文方法能够量化水库单一因素在径流变化中发挥的作用与贡献率,对于科学解析水库的生态作用具有重要价值。但是,本文没有建立水库与生物资源的直接联系,而是以水为纽带进行了间接分析,如何量化水库对生物资源的影响是未来需要研究的重点问题。

### 参考文献:

- [1] 周建军,张曼. 长江鄱阳湖问题的原因及湖口建闸的影响[J]. 水资源保护, 2019, 35(2): 1-12. (ZHOU Jianjun, ZHANG Man. Eco-problem of Poyang Lake in Yangtze River and effect of sluice gate construction at lake's outlet[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(2): 1-12. (in Chinese))
- [2] MAAVARA T, CHEN Q, VAN METER K, et al. River dam impacts on biogeochemical cycling[J]. Nature Reviews, 2020, 1: 103-116.
- [3] 黄强,刘东,魏晓婷,等. 中国筑坝数量世界之最原因分析[J]. 水力发电学报, 2021, 40(9): 35-45. (HUANG Qiang, LIU Dong, WEI Xiaoting, et al. Reasons for China owning largest number of water dams in the world[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40(9): 35-45. (in Chinese))
- [4] NGOR P B, LEGENDREC P, OBERDORFFB T, et al.

- Flow alterations by dams shaped fish assemblage dynamics in the complex Mekong-3S river system [J]. *Ecological Indicators*, 2018, 88: 103-114.
- [5] 许栋, 张博曦, 及春宁, 等. 梯级水库对南渡江干流底栖动物丰枯水期沿程变化的影响[J]. *水资源保护*, 2019, 35(2): 60-66. (XU Dong, ZHANG Boxi, JI Chunling, et al. Streamwise variation of zoobenthos along main stream of Nanduijiang River in wet and dry seasons under influence of cascade reservoirs [J]. *Water Resources Protection*, 2019, 35(2): 60-66. (in Chinese))
- [6] GRILL G, LEHNER B, THIEME M. Mapping the world's free-flowing rivers [J]. *Nature*, 2019, 569 (7755): 215-221.
- [7] POFF N L, SCHMIDT J C. How dams can go with the flow [J]. *Science*, 2016, 353(6304): 1099-1100.
- [8] 黄志鸿, 董增川, 周涛, 等. 面向生态友好的水库群调度模型[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(3): 202-208. (HUANG Zhihong, DONG Zengchuan, ZHOU Tao, et al. Group operation model for ecological friendly reservoir [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2020, 48(3): 202-208. (in Chinese))
- [9] 张海滨, 尹鑫, 李伟. 我国河湖生态流量保障对策体系研究[J]. *水利经济*, 2019, 37(4): 13-16. (ZHANG Haibin, YIN Xin, LI Wei. System of ecological flow safeguard measures for rivers and lakes in China [J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2019, 37(4): 13-16. (in Chinese))
- [10] 段红东. 生态水利工程概念研究与典型工程案例分折[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))
- [11] 陈求稳, 张建云, 莫康乐, 等. 水电工程水生态环境效应评价方法与调控措施[J]. *水科学进展*, 2020, 31(5): 793-809. (CHEN Qiuwen, ZHANG Jianyun, MO Kangle, et al. Effects of hydropower development on aquatic eco-environment and adaptive managements [J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(5): 793-809. (in Chinese))
- [12] GILLESPIE B R, DESMET S, KAY P, et al. A critical analysis of regulated river ecosystem responses to managed environmental flows from reservoirs [J]. *Freshwater Biology*, 2015, 60(2): 410-425.
- [13] MA Zhenzhen, WANG Zhongjing, XIA Ting, et al. Hydrograph-based hydrologic alteration assessment and its application to the Yellow River [J]. *Journal of Environmental Informatics*, 2014, 23(1): 1-13.
- [14] OLDEN J D, POFF N L. Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes [J]. *River Research and Applications*, 2003, 19(2): 101-121.
- [15] 张文浩, 瞿思敏, 徐瑶, 等. 泼河水库对潢河径流过程及水文情势的影响[J]. *水资源保护*, 2021, 37(3): 61-65. (ZHANG Wenhao, QU Simin, XU Yao, et al. Influence of Pohe Reservoir on runoff process and hydrological regime of Huanghe River [J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(3): 61-65. (in Chinese))
- [16] 张飒, 班璇, 黄强, 等. 基于变化范围法的汉江中游水文情势变化规律分析[J]. *水力发电学报*, 2016, 35(7): 34-43. (ZHANG Sa, BAN Xuan, HUANG Qiang, et al. Analysis of hydrological regime changes in the midstream Han River using range of variability approach [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2016, 35(7): 34-43. (in Chinese))
- [17] 班璇, 师崇文, 郭辉, 等. 气候变化和水利工程对丹江口大坝下游水文情势的影响[J]. *水利水电科技进展*, 2020, 40(4): 1-7. (BAN Xuan, SHI Chongwen, GUO Hui, et al. Effects of climate change and water conservancy projects on hydrological regime downstream of Danjiangkou Dam [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2020, 40(4): 1-7. (in Chinese))
- [18] 段唯鑫, 郭生练, 王俊. 长江上游大型水库群对宜昌站水文情势影响分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(1): 120-130. (DUAN Weixin, GUO Shenglian, WANG Jun. Impact of upper Yangtze River large-scale cascade reservoirs on flow regime at Yichang station [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25(1): 120-130. (in Chinese))
- [19] 彭少明, 尚文绣, 王煜, 等. 黄河上游梯级水库运行的生态影响研究[J]. *水利学报*, 2018, 49(10): 1187-1198. (PENG Shaoming, SHANG Wenxiu, WANG Yu, et al. Research on ecological impacts of the joint operation of cascade reservoirs in the upstream of the Yellow River [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49(10): 1187-1198. (in Chinese))
- [20] 张金良, 练继建, 张远生, 等. 黄河水沙关系协调度与骨干水库的调节作用[J]. *水利学报*, 2020, 51(8): 897-905. (ZHANG Jinliang, LIAN Jijian, ZHANG Yuansheng, et al. Coordination degree of water-sediment relationship of the Yellow River and regulating effect of the backbone reservoir [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(8): 897-905. (in Chinese))
- [21] 王彦君, 吴保生, 申冠卿. 1986—2015 年小浪底水库运行前后黄河下游主槽调整规律[J]. *地理学报*, 2019, 74(11): 2411-2427. (WANG Yanjun, WU Baosheng, SHEN Guanqing. Adjustment in the main-channel geometry of the lower Yellow River before and after the operation of the Xiaolangdi Reservoir from 1986 to 2015 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(11): 2411-2427. (in Chinese))

(下转第 175 页)