

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.01.017

黄河河口区生态需水量及流量过程核算

易雨君^{1,2},徐嘉欣¹,宋 勘¹,刘 奇¹

(1. 北京师范大学水沙科学教育部重点实验室,北京 100875; 2. 北京师范大学环境学院,北京 100875)

摘要:以保障黄河河口区三角洲湿地生态需水、河口及近海鱼类需水及河道泥沙输送为目标,针对不同需水目标的特点,基于生境模拟模型、函数型线性回归模型等方法,分别计算入海径流过程对三角洲湿地及河口区生物群落生境及生物量的影响,以及来沙系数对河道输沙的影响,遵循消耗性需水的加和性原则与非消耗性需水的最大性原则,提出满足三角洲湿地生态需水、河口及近海鱼类需水、泥沙输送等多目标的需水量及流量过程。结果表明,依时段对流量过程进行调控可更好地满足不同保障目标的需水需求,可在3月达到一定的流量过程,在4—5月的最小、适宜、最大流量分别为456.91 m³/s、634.04 m³/s和1107.38 m³/s,其余月份的最小、适宜、最大流量分别为146.91 m³/s、559.79 m³/s和1107.38 m³/s,得到黄河口最小、适宜、最大需水量分别为71.05亿m³、181.51亿m³和349.85亿m³。通过在年内保障生态需水总量,同时在特定生物的关键生长时期维持特定流量脉冲,可有效改善黄河三角洲湿地、河口及近海区域生境质量,为黄河口的生态保护和修复提供理论支持。

关键词:黄河口;生态需水;流量过程;三角洲湿地;河道输沙

中图分类号:X171.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)01-0133-08

Ecological water demand and discharge process calculation in the Yellow River Estuary // YI Yujun^{1,2}, XU Jiaxin¹, SONG Jie¹, LIU Qi¹ (1. Key Laboratory for Water and Sediment Science, Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Aiming at the ecological water demand of delta wetland, the water demand of estuarine and offshore fish, and sediment transport, according to the characteristics of different water demand targets, based on the habitat simulation model and functional linear regression model, the effects of runoff process on the habitat and biomass of biological community in delta wetland and estuary area, and the effects of incoming sediment coefficient on the sediment transport were calculated respectively. The calculation of consumptive water demand was followed the additive principle and non-consumptive water demand was followed the maximum principle, the water demand and discharge process that meet the multi-objective of delta wetland ecological water demand, estuarine and offshore fish water demand, and sediment transport were put forward. The results show that regulation of the discharge process according to time period can better meet the demand of different guarantee objectives. Certain discharge can be provided in March, and the minimum, suitable and maximum discharge from April to May are 456.91 m³/s, 634.04 m³/s, 1107.38 m³/s, respectively, while in other months are 146.91 m³/s, 559.79 m³/s and 1107.38 m³/s, respectively. The minimum, suitable and maximum water demand in the Yellow River Estuary are 71.05 billion m³, 181.51 billion m³ and 349.85 billion m³, respectively. By ensuring the total ecological water demand in the year and maintaining the specific discharge during the critical growth period of specific organism, the habitat quality of delta wetland, estuarine and offshore areas can be effectively improved, so as to provide theoretical support for the ecological protection and restoration of the Yellow River Estuary.

Key words: the Yellow River Estuary; ecological water demand; discharge process; delta wetland; sediment transport

河口位于河流与海洋的交汇处,受潮流和径流共同作用,具有独特的生态结构与环境特征,生物多

样性丰富,且对外界扰动响应敏感,生态系统相对脆弱。近年来,由于上游河流大坝建设、城市化进程等

基金项目:国家杰出青年科学基金(52025092)

作者简介:易雨君(1981—),女,教授,博士,主要从事生态水力学研究。E-mail: yiyujun@bnu.edu.cn

人类活动导致进入河口的水沙趋少,生物生境发生改变,生物多样性下降^[1-2],河口区域的生态需水问题越来越受到广泛关注。河口区域生态需水的概念及计算方法与河流、湖泊等其他水体存在明显差异,目前尚未形成统一的标准。概括来说,河口生态需水可分为广义和狭义两种,广义的河口生态需水是指维持河口生态系统平衡所需的水量,狭义的河口生态需水是指保证河口生态目标所需的淡水输入量^[3],且淡水输入量随着河口生态系统的发展呈现动态性变化^[4]。在计算方法上,可将其概括为功能设定法、相关分析法以及数学模型法3类^[5],其中,功能设定法是依据不同的河口生态系统功能划分不同的需水目标,在分别进行计算后进行整合得到需水总量,目前在国内研究中应用最为广泛^[6-8];相关分析法将指示物种对盐度、温度等环境因子的适应能力作为控制条件进行相关分析,进而确定需水量,在国内已有一定的应用^[9];数学模型法通过建立数学模型,如神经网络模型^[10-11]等,来模拟径流输入与生态系统状况改变之间的定量关系,进而得到需水量。

黄河口具有我国温带最为广阔完整的湿地生态系统,然而自1970年代起至1990年代,黄河断流问题频发,上游来水量的减少导致黄河口生态问题逐渐凸显^[12],到21世纪初关于黄河口生态需水的研究逐步受到关注,在计算上多采用功能设定法,将生态需水目标划分为河口湿地生态需水、河流生态需水、河口及近海生态需水三大类^[13-15]。其中,湿地生态需水包括典型植被及鸟类需水、土壤需水、补给地下水需水等;河流生态需水包括典型鱼类需水、输沙需水等;河口及近海生态需水包括维持近海水域咸淡水平衡需水、近海生物生长发育所需的营养盐输入等需水。随着需水目标的细化,有学者增加了河流自净需水、防止海岸线侵蚀需水、农业生态需水^[16-17]等需水目标。但由于黄河口作为集海水、咸淡水、淡水、潮滩湿地为一体的复杂系统^[18],其水文过程与生态系统间的关系较为复杂,在整合多目标需水时存在需水过程不清楚或不同目标需水重复计算等问题。因此,针对黄河口不同生态需水目标进行权衡,在适当时期给予流量脉冲,提供适宜的生态需水量及流量过程,对改善生境条件、维持生物多样性等具有重要意义。

黄河河口区主要包含河口三角洲湿地、入海口河段和近海区域3部分,黄河口生态系统处于动态平衡状态,不同区域的典型物种在各生命周期中对流量过程的需求不同。在三角洲湿地生态需水方面,因芦苇、翅碱蓬和柽柳是三角洲湿地的典型植

被,分布广泛,也为鸟类提供食物来源及庇护所,因此,主要基于3种典型植被确定非消耗性需水需求,并考虑满足土壤、水面以及植被蒸散发的消耗性需水需求;在入海口及近海区域方面,因鲈鱼、鳗鲡、银鱼、鲅鱼等是典型洄游鱼类^[15],产卵洄游期需满足流量脉冲及入海水量的需求,且盐度作为反映河口生态环境健康的最敏感因子之一,维持河口盐度平衡需水可通过鱼类对入海冲淡水的需求得以体现^[19],因此在该区域,主要考虑满足鱼类生存的非消耗性需水;同时,兼顾下游河道防洪减淤所需的水量。本文基于黄河口生态系统及保护目标特征,构建生境模拟模型及函数型线性回归模型得到生物群落与流量的响应关系,分析来沙系数与河道输沙的影响关系,通过多目标权衡确定最终的生态需水量及流量过程,以期为黄河口生态保护及生态补水提供理论支持。

1 研究区概况

黄河河口三角洲是以垦利渔洼为顶点,北起挑河口,南至宋春荣沟之间的扇形地带,面积约2800 km²,是河口自然湿地生态系统的典型代表。该区域地处咸淡水交互区域,受到海水顶托和入海河流的共同影响,是220多种植物和800多种动物的重要栖息地和物种多样性保护的天然基因库,同时也是鸟类迁徙的重要中转站、越冬地和繁殖地。保护区内地处咸淡水交互区域,受到海水顶托和入海河流的共同影响,是220多种植物和800多种动物的重要栖息地和物种多样性保护的天然基因库,同时

2 研究方法

2.1 黄河三角洲湿地生态需水计算方法

黄河三角洲湿地生态需水主要考虑湿地植被生长的非消耗性需水和蒸散发的消耗性需水。湿地植被需水主要考虑芦苇、翅碱蓬和柽柳3种典型植被对地下水埋深和浅层土壤盐度的耐受阈值,基于易雨君等^[20-21]构建的耦合地下水动力学模型与植被生长-扩散-种间竞争生态动力学模型,通过模拟不同流量条件下三角洲湿地土壤水盐条件时空变化,以及植被群落的生长、扩散及种间竞争过程,得到不同流量条件下植被群落的适宜生境面积和生物量,建立典型植被总适宜生境面积与流量间的关系。以获得3种植被总适宜生境面积的第一四分位数、最大值以及第三四分位数的流量作为最小、适宜、最大流量,进而得出黄河三角洲湿地的非消耗性需水量。

2.2 河口及近海鱼类需水计算方法

为量化河口及近海鱼类群落对入海水沙通量的响应关系,基于1981—2011年黄河口附近海域鱼类生物量序列,以及黄河利津水文站在相同时间范围内的逐日流量及输沙率序列,Yi等^[22]建立了函数型线性回归模型,量化分析鱼类生物量与逐日水沙过程的响应关系:

$$Y_i = \sum_{t=1}^{365} \beta_t X_{it} + \varepsilon_i \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

式中: Y_i 为第*i*年的鱼类生物量; X_{it} 为第*i*年第*t*天的流量或输沙率; β_t 为第*t*天对应的回归系数; ε_i 为第*i*年的预测残差。

通过将多物种关联与整个水文系统结合,采用FLRTI方法计算可解释的函数型回归系数^[23],得到鱼类生物量在不同的时间*t*所对应的回归系数 β_t ,预测在不同生态调度方案下流量对鱼类生物量的累积效应:

$$M = \sum_{t=1}^{365} \beta_t \lg Q_t \quad (2)$$

式中: M 为不同生态调度方案中鱼类生物量的累积效应; Q_t 为不同生态调度方案对应的逐日流量过程。

通过时间序列数据分析和对累积效应*M*的计算,得到单位流量或输沙率变化对鱼类生物量影响的程度,并识别水沙过程对鱼类群落影响的时间范围。基于该范围选取具有最大累积效应的流量过程作为鱼类的适宜流量脉冲,并综合考虑河口河道和海洋两大区域的鱼类需求,依据黄河水利科学研究院提出的低限和适宜生态流量方案,确定低限和适宜生态流量所对应的3—5月入海总水量要求。

2.3 基于多目标权衡的黄河口生态需水

河口生态需水包括消耗性需水和非消耗性需水,依据本研究所考虑的不同生态目标,将三角洲湿地生态需水、河口及近海鱼类需水和泥沙输送需水作为非消耗性需水,将土壤、水面以及植被蒸散发作为消耗性需水,多目标生态需水组成结构如图1所示。消耗性需水的计算采用加和性原则,而各项非消耗性需水相互兼容,在计算时则应采取最大性原则^[24]:

$$W_a = \sum_{i=1}^n W_i + \max(W_{j1}, W_{j2}, \dots, W_{jn}) \quad (3)$$

式中: W_a 为河口总生态需水量; W_i 为各项消耗性需水; W_{ji} 为各项非消耗性需水。

此外,最大生态需水应维持生态系统整体的动态平衡,通过影响河流造床输沙能力等进而影响河流生态系统的健康状况^[25],因此将泥沙输送需水纳入最大非消耗性生态需水的计算,通过计算满足三

角洲湿地生态需水、河口及近海鱼类需水所得到的最大非消耗性流量和相应的来沙系数进行评估,判断现有最大非消耗性流量是否满足泥沙输送的需求,若满足,则不需要额外的水量补充。

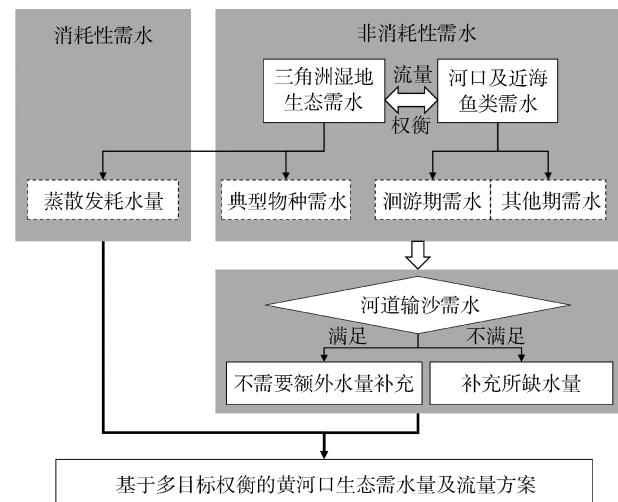


图1 黄河口生态需水组成结构

Fig. 1 Composition structure of ecological water demand of Yellow River Estuary

3 结果与讨论

3.1 三角洲湿地生态需水量及流量过程

不同流量条件下各植被的生境面积结果如图2(a)(b)(c)所示,由于芦苇盐度耐受阈值最低,其生境面积与流量间存在较显著的单峰关系,在低于50 m³/s流量条件下,淡水补给不足将导致芦苇适宜栖息地明显缩减,在流量小于378.14 m³/s时,芦苇适宜生境面积随流量增长快速增大,当流量达到378.14 m³/s时,对应最大适宜生境面积,此后随着流量增大,河岸带区域淹没面积增大,地下水位升高,芦苇适宜生境面积逐渐下降。对于翅碱蓬而言,其盐度的耐受能力明显高于芦苇,且同时具有较强的耐盐性与耐淹水性,因此适宜生境面积与流量间的响应关系较弱且拟合情况较差,但适宜生境面积整体随流量增大而增大。柽柳由于耐淹性较差,洪水期地表淹没时可能导致植株死亡,因此在流量逐渐增长的过程中,柽柳适宜生境面积保持稳定,但在流量大于1200 m³/s时,其适宜生境面积明显降低。

植被总适宜生境与径流量间的关系如图2(d)所示,3种植被总面积与径流量的响应关系类似于芦苇,存在一个较明显的单峰,表明由于黄河流量增大导致的土壤孔隙水淡化和潮滩淹没等对于植被总适宜生境面积的影响不可忽视。在选取适宜流量时,以植被总适宜生境面积第一四分位数对应的63.24 m³/s作为最小流量,植被总适宜生境面积最

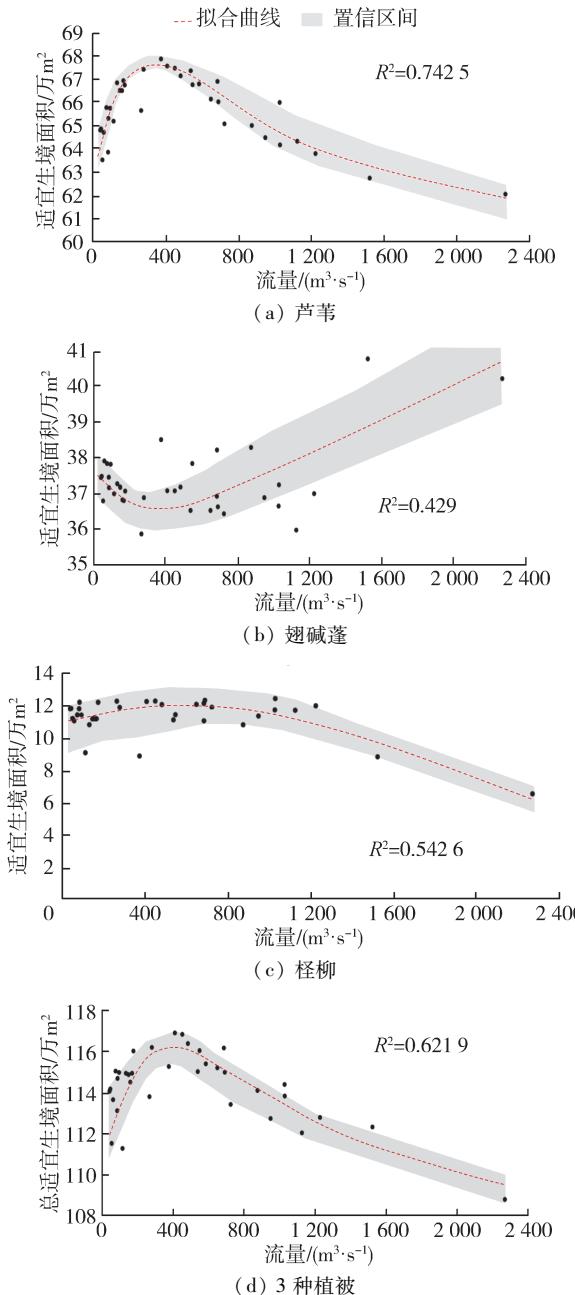


图 2 黄河利津站流量与三角洲湿地植被

适宜生境面积的拟合曲线

Fig. 2 The fitting curve of the discharge of Lijin hydrographic section of the Yellow River and the suitable habitat area of delta wetland vegetation

大值对应的 $485.75 \text{ m}^3/\text{s}$ 作为适宜流量,植被总适宜生境面积第三四分位数对应的 $1030.23 \text{ m}^3/\text{s}$ 作为最大流量。

以上针对三角洲湿地非消耗性需水的研究表明,随着流量的增大,黄河三角洲湿地植被的总适宜生境面积快速增加,而当流量大于 $485.75 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,随着流量的增加将导致湿地植被总适宜生境面积的降低。因此,在每年植物生长的关键期间,维持 $485.75 \text{ m}^3/\text{s}$ 的适宜流量最为合适。针对消耗性需水,根据 Sun 等^[24]的研究,三角洲湿地植被、土壤及

水面蒸发耗水量最小值、适宜值和最大值分别为 21.1 亿 m^3 、 23.35 亿 m^3 和 24.33 亿 m^3 ,对应耗水流量分别为 $66.91 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $74.04 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $77.15 \text{ m}^3/\text{s}$ 。最终得到基于三角洲湿地需水和蒸散发耗水的最小、适宜及最大流量及需水量方案如表 1 所示。

表 1 三角洲湿地生态需水方案

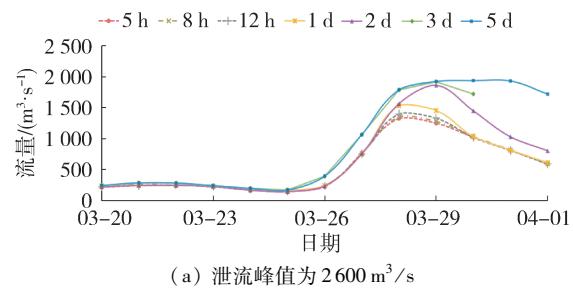
Table 1 Ecological water demand schemes in delta wetland

等级	满足三角洲湿地典型植被 生境面积的非消耗性需水		满足土壤、水面及植被蒸 散发的消耗性需水	
	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	需水量/ 亿 m^3	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	需水量/ 亿 m^3
最小	63.24	19.94	66.91	21.10
适宜	485.75	153.19	74.04	23.35
最大	1030.23	324.89	77.15	24.33

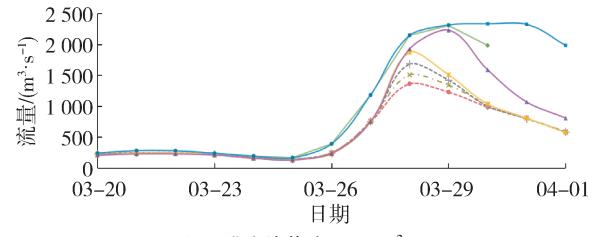
3.2 河口及近海鱼类需水及流量过程

黄河口鱼类分为黄河口入海段鱼类和渤海近海海洋鱼类。河口河道鱼类繁殖发育对黄河入海口流量、流速、水深等均有一定要求,而海洋鱼类具有在低盐河口近岸产卵的特性,产卵场环境条件要求水深为 $1 \sim 10 \text{ m}$,盐度为 $1.8\% \sim 3.2\%$ ^[26],且适宜的春季入海淡水总量能够为海洋鱼类创造良好的低盐产卵环境,同时带来浮游植物必需的营养物质,因此应充分考虑鱼类在产卵洄游期对水深、流速和盐度等调控指标的需求。

针对流量脉冲,按 2018 年黄河下游的 14 种适宜生态调度方案^[27](小浪底水库泄流峰值分别按照 $2600 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ 控制,峰值持续时间分别为 5 h 、 8 h 、 12 h 、 1 d 、 2 d 、 3 d 、 5 d)分别计算,得到利津站 3 月 20 日至 4 月 1 日的流量过程如图 3 所示。



(a) 泄流峰值为 $2600 \text{ m}^3/\text{s}$



(b) 泄流峰值为 $3000 \text{ m}^3/\text{s}$

图 3 不同小浪底泄流峰值调度方案对应的利津站流量过程

Fig. 3 Discharge process of Lijin hydrographic section corresponding to different Xiaolangdi Reservoir dispatching schemes

考虑鱼类对水深、流速、盐度等调控指标的需求,通过对时间序列数据的分析以及累积效应 M 的计算,得到不同生态调度方案下鱼类生物量的累积效应。结果表明,当泄流峰值为 $2600 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,累积效应范围为 $0.235 \sim 0.268$,且先随峰值持续时间的增加而升高,当峰值持续时间为 3 d 时,达到最大值 0.268,后随持续时间的增加而降低;当泄流峰值为 $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,累积效应的范围在 $0.239 \sim 0.261$ 之间,随峰值持续时间的增加也呈现先升高后降低的趋势,在峰值持续时间为 2 d 时达到最大值 0.261。因此,当泄流峰值为 $2600 \text{ m}^3/\text{s}$ 且峰值持续时间为 3 d 时,累积效应最大,为 0.268,即该方案对应的利津站流量过程为河口及近海鱼类的最适流量方案。最终可确定泄流峰值为 $2600 \text{ m}^3/\text{s}$ 且持续时间为 5 h 为最小流量方案,泄流峰值为 $2600 \text{ m}^3/\text{s}$ 且持续时间为 3 d 为适宜流量方案,泄流峰值为 $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ 且持续时间为 5 d 为最大流量对应方案,对应的利津站最小、适宜、最大流量过程如图 4 所示。

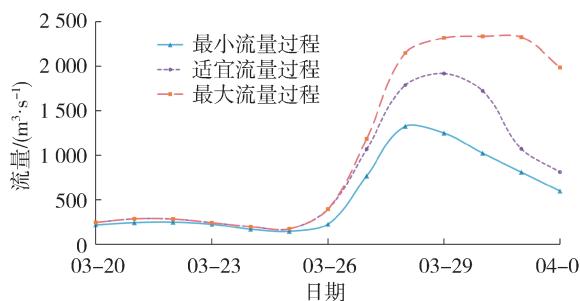


图 4 3月20日至4月1日河口及近海区域应满足的最小、适宜及最大流量过程

Fig. 4 The minimum, suitable and maximum discharge processes to be satisfied in the estuarine and offshore areas from March 20 to April 1

针对入海水量的确定,在 3—5 月,应综合考虑河口河道鱼类和海洋鱼类要求,依据黄河水利科学研究院提出的低限流量和适宜流量两个生态调度方案^[28](低限流量要求 3 月日均流量为 $280 \text{ m}^3/\text{s}$,4—5 月日均流量为 $390 \text{ m}^3/\text{s}$;适宜流量要求 3 月日均流量为 $350 \text{ m}^3/\text{s}$,4—5 月日均流量为 $560 \text{ m}^3/\text{s}$)计算,3—5 月低限和适宜流量对应的入海总水量分别为 $31 \text{ 亿 } \text{m}^3$ 和 $43 \text{ 亿 } \text{m}^3$,满足建议的 $32 \text{ 亿 } \sim 46 \text{ 亿 } \text{m}^3$ 的入海水量需求。对于其他月份最小流量的确定,参考刘晓燕^[29]的研究成果,确立最小生态流量为 $80 \text{ m}^3/\text{s}$,适宜生态流量为 $120 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

综上,得到满足河口及近海鱼类流量如下:
①1—2 月和 6—12 月最小流量均为 $80 \text{ m}^3/\text{s}$,适宜流量均为 $120 \text{ m}^3/\text{s}$;
②3 月 1—19 日的最小、适宜流量分别为 $280 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $350 \text{ m}^3/\text{s}$,3 月 20 日至 4 月 1 日的最小、适宜及最大流量如图 4 所示,因此,3 月的

平均最小、适宜和最大流量分别为 $178.9 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $227.3 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $1011.4 \text{ m}^3/\text{s}$;
③4—5 月最小及适宜流量分别为 $390 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $560 \text{ m}^3/\text{s}$ 。最终,可确定河口及近海鱼类的最小及适宜生态需水量分别为 $49.95 \text{ 亿 } \text{m}^3$ 和 $71.89 \text{ 亿 } \text{m}^3$ 。

3.3 河道输沙需水

水少沙多、水沙关系不协调是黄河的主要矛盾,使黄河下游河段泥沙淤积,形成地上悬河。因此,为解决河口泥沙淤积等问题,需建立更为完善的黄河水沙调控体系,通过小浪底水库调度等对黄河下游的径流及泥沙过程进行有效调控,以此达到优化配置黄河水沙资源、减轻泥沙淤积的作用。据统计,在 1950—1985 年间,以利津站为代表的黄河年均入海输沙量为 10.49 亿 t ,而大型水利枢纽工程的修建以及黄河上游水土流失防治措施的落实使黄河沙多的问题得到较大幅度的控制,通过预测,未来入河泥沙含量约为 3 亿 t 、 6 亿 t 、 8 亿 t 3 种情况^[30-32],总体上黄河泥沙含量均呈现减少趋势。自小浪底水库建成并投入使用以来,利津站的年平均输沙量约为 1.4 亿 t ,较 20 世纪大幅减少,利津站作为黄河下游最后的监测站,其径流量和输沙量可作为计算黄河口入海的水量和沙量的依据。

一般认为最大生态需水应维持生态系统整体的动态平衡,通过影响河流造床输沙能力、水文连通性、河流生境等多方面来影响河流生态系统的健康状况^[25],因此将泥沙输送所需的水量纳入黄河三角洲最大生态需水的判断依据中。根据三角洲湿地生态需水的约束条件,可知年最大非消耗性流量为 $1030.23 \text{ m}^3/\text{s}$,年最大非消耗性需水量为 $324.89 \text{ 亿 } \text{m}^3$,同时由胡春宏等^[33]的研究结果,为保证黄河下游河段达到输沙平衡,临界年均来沙系数应在 0.012 左右,据此推算, $1030.23 \text{ m}^3/\text{s}$ 的年最大非消耗性流量全年能够输送 3.9 亿 t 泥沙,大于小浪底水库建成后利津站的年平均输沙量 1.4 亿 t ,故满足黄河口的输沙要求,目前暂不需要额外的水量补充。

3.4 基于多目标权衡的黄河口生态需水总量及流量过程

黄河口生态需水包括消耗性需水和非消耗性需水,应首先综合权衡三角洲湿地生态需水、河口及近海鱼类需水和泥沙输送 3 项非消耗性需水的流量过程及总水量需求,再与消耗性需水进行加和计算,得到最终的生态需水流量过程与总水量。

对于黄河口的非消耗性需水,应兼顾满足黄河三角洲湿地生态需水以及河口与近海鱼类需水的流量过程及需水总量。其中,3—5 月为湿地植被发芽

生长的关键期,4—6月为河口河道鱼类和近海鱼类产卵洄游的关键期,应同时满足两者的需求。在3月按照图4所示的流量过程进行调控,可提前补充河口淡水资源,为接下来鱼类的产卵及仔鱼孵化提供保障;在4—5月,若以维持关键植被生长所需的小流量 $63.24\text{ m}^3/\text{s}$ 作为调控流量,则3—5月对应的小需水总量为 13.68亿 m^3 ,不能达到鱼类所需的 $32\text{亿}\sim46\text{亿 m}^3$ 的入海水量,因此应以鱼类的需求为最低保证,在4—5月应达到的最小流量为 $390\text{ m}^3/\text{s}$;同理,若在4—5月以维持关键植被生长所需的 $485.75\text{ m}^3/\text{s}$ 流量作为适宜流量,则适宜需水总量同样不能达到鱼类的入海水量要求,因此应以鱼类的需求为标准,在4—5月所需的适宜流量应达到 $560\text{ m}^3/\text{s}$ 。在其他月份中,为同时满足三角洲湿地和鱼类的水量需求,最小流量和适宜流量分别选取 $80\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $485.75\text{ m}^3/\text{s}$,最大流量以适宜生境面积作为约束条件,确定为 $1030.23\text{ m}^3/\text{s}$,且该流量可满足黄河口的基本输沙要求,不需要额外的水量补充。

黄河口的消耗性需水量中,补给土壤、水面以及植被蒸散发所需的小、适宜、最大水量分别为 21.1亿 m^3 、 23.35亿 m^3 和 24.33亿 m^3 ,最终将消耗性需水与非消耗性需水相加,可得到黄河口的最小、适宜、最大需水总量分别为 71.05亿 m^3 、 181.51亿 m^3 和 349.85亿 m^3 ,如表2所示;相应的生态需水流量过程如表3所示。

表2 黄河口生态需水总量方案

Table 2 Scheme of total ecological water demand in the Yellow River Estuary

等级	需水量/ 亿 m^3		
	非消耗性	消耗性	总量
最小	49.95	21.10	71.05
适宜	158.16	23.35	181.51
最大	325.52	24.33	349.85

于守兵等^[19]将 3.5亿 m^3 的黄河引水水量作为湿地的最低需水量,并结合河道及近海鱼类的生态需求,得到黄河口全年生态需水量为 86亿 m^3 ;蒋晓辉等^[34]以鱼类产卵及仔稚鱼生长为目标,根据入海流量与盐度的相关关系确定河口及近海在4—10月

关键时期的适宜生态需水量为 156亿 m^3 ,分别与本研究确定的 71.05亿 m^3 的最小需水量以及 181.51亿 m^3 的适宜需水量较为相近;李国英等^[4]将防止海水入侵、维持生物生长环境、保持河口湿地合理水面面积与水深、水循环以及补给地下水作为需水目标,得到黄河口生态系统的需水量为 78.21亿 m^3 ,略高于本研究得到的最小需水量;Sun等^[24]以动植物淡水栖息地、盐度平衡、泥沙输送及水文循环作为目标,得到的最小、适宜、最大需水量分别为 134.22亿 m^3 、 162.73亿 m^3 和 274.88亿 m^3 。计算结果的差异性主要是因为需水目标的选取以及计算方式的不同,且本文得到的最小需水量低于已有研究,可能在于本研究是依时段对流量过程进行调控,考虑了植被的生长期以及鱼类产卵洄游的关键时期,在3月达到一定的流量过程,提前补充了河口的淡水资源,对水量的分配进行了优化。

4 结 论

保障黄河口生态需水对于维持其生态系统稳定性具有重要意义,本文考虑黄河三角洲湿地生态需水、河口及近海鱼类需水和河道输沙需水等需求,将其分为非消耗性需水和消耗性需水,开展了多目标权衡,明确了以下生态需水量及流量过程方案:考虑黄河口及近海鱼类洄游产卵和植被生长发芽的关键时期,在3月达到一定的流量过程,提前补充河口淡水资源,有利于为鱼类的产卵及仔鱼孵化提供保障,3月的平均最小、适宜、最大流量分别为 $178.9\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $227.3\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $1011.4\text{ m}^3/\text{s}$;4—5月的最小、适宜和最大流量分别为 $456.91\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $634.04\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $1107.38\text{ m}^3/\text{s}$;其余月份的最小、适宜、最大流量分别为 $146.91\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $559.79\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $1107.38\text{ m}^3/\text{s}$,最终计算得到黄河口最小、适宜、最大总需水量分别为 71.05亿 m^3 、 181.51亿 m^3 、 349.85亿 m^3 。

本文以有效改善黄河三角洲湿地、河口及近海区域生物生境质量并满足河道输沙能力为目标,基于典型植被及鱼类对径流的响应关系构建了生境模拟模型与函数型线性回归模型,通过多目标权衡,提出了黄河河口区生态需水量及流量方案。

表3 黄河口生态需水流量过程方案

Table 3 Scheme of ecological discharge process in the Yellow River Estuary

时间	非消耗性流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$				消耗性流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$				总流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$		
	最小	适宜	最大	最小	适宜	最大	最小	适宜	最大		
3月	一定流量	一定流量	一定流量	66.91	74.04	77.15	一定流量	一定流量	一定流量		
4—5月	390	560	1030.23	66.91	74.04	77.15	456.91	634.04	1107.38		
其余月份	80	485.75	1030.23	66.91	74.04	77.15	146.91	559.79	1107.38		

注:一定流量指3月1—19日的最小及适宜流量为 $280\text{m}^3/\text{s}$ 和 $350\text{m}^3/\text{s}$,3月20日至4月1日的最小、适宜及最大流量如图4所示。

参考文献：

- [1] EDMONDS D A, CALDWELL R L, BRONDIZIO E S, et al. Coastal flooding will disproportionately impact people on river deltas [J]. Nature Communications, 2020, 11(1) : 4741.
- [2] 董斯齐, 黄翀, 李贺, 等. 粤港澳大湾区 2015—2019 年入海河口水质变化趋势 [J]. 水资源保护, 2021, 37 (5) : 48-55. (DONG Siqi, HUANG Chong, LI He, et al. Change trend of water quality in estuaries of Guangdong, Hong Kong and Macao Greater Bay Area from 2015 to 2019 [J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (5) : 48-55. (in Chinese))
- [3] 王西琴. 河流生态需水理论、方法与应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [4] 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 requirements of Yellow River estuary [J]. Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition), 2011, 43 (3) : 138-144. (in Chinese))
- [5] 孙涛, 杨志峰. 河口生态环境需水量计算方法研究 [J]. 环境科学学报, 2005, 25 (5) : 573-579. (SUN Tao, YANG Zhifeng. Study on the methods for quantifying the environmental flow in estuaries [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25 (5) : 573-579. (in Chinese))
- [6] YANG Zhifeng, SUN Tao, CUI Baoshan, et al. Environmental flow requirements for integrated water resources allocation in the Yellow River Basin, China [J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2009, 14 (5) : 2469-2481.
- [7] 武见, 明广辉, 周翔南, 等. 黄河流域需水分层预测 [J]. 水资源保护, 2020, 36 (5) : 31-37. (WU Jian, MING Guanghui, ZHOU Xiangnan, et al. Forecasting of water demand hierarchy in the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection, 2020, 36 (5) : 31-37. (in Chinese))
- [8] 黄昌硕, 陈敏建, 丰华丽, 等. 基于生态保护目标的黄河河口湿地生态需水计算 [J]. 中国农村水利水电, 2012, (12) : 75-77, 83. (HUANG Changshuo, CHEN Minjian, FENG Huali, et al. Ecological water demand calculation of the Yellow River Estuary wetland based on ecological protection goal [J]. China Rural Water and Hydropower, 2012, (12) : 75-77, 83. (in Chinese))
- [9] 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) : 223-229. (XUE Xiaojie, GONG Linlin, HUANG Qiang. Study on ecological water demand of the Yellow River Estuary [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2012, 40 (8) : 223-229. (in Chinese))
- [10] 拾兵, 李希宁, 朱玉伟. 黄河口滨海区生态需水量研究 [J]. 人民黄河, 2005 (10) : 76-77. (SHI Bing, LI Xining, ZHU Yuwei. Study on ecological water demand in the coastal area of the Yellow River Estuary [J]. Yellow River, 2005 (10) : 76-77. (in Chinese))
- [11] 徐伟, 董增川, 付晓花, 等. 基于 BP 人工神经网络的河流生态健康预警 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015, 43 (1) : 54-59. (XU Wei, DONG Zhengchuan, FU
- Xiaohua, et al. Early warning of river ecosystem health based on BP artificial neural networks [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2015, 43 (1) : 54-59. (in Chinese))
- [12] LIU Xianzhao, QI Shanzhong. Wetlands environmental degradation in the Yellow River Delta, Shandong Province of China [J]. Procedia Environmental Sciences, 2011, 11 : 701-705.
- [13] 张长春, 王光谦, 魏加华. 基于遥感方法的黄河三角洲生态需水量研究 [J]. 水土保持学报, 2005, 19 (1) : 149-152. (ZHANG Changchun, WANG Guangqian, WEI Jiahua. Study on water requirements in Yellow River Delta based on remote sensing [J]. Journal of Soil And Water Conservation, 2005, 19 (1) : 149-152. (in Chinese))
- [14] 王新功, 魏学平, 韩艳丽, 等. 黄河河口生态保护目标及其生态需水研究 [J]. 水利科技与经济, 2009, 15 (9) : 792-795, 797. (WANG Xingong, WEI Xueping, HAN Yanli, et al. Identification of ecological protection objective of Yellow River Estuary and its research on the ecological water requirements [J]. Water Conservancy Science And Technology and Economy, 2009, 15 (9) : 792-795, 797. (in Chinese))
- [15] 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))
- [16] 杨晓妍. 黄河三角洲国家级自然保护区湿地生态需水研究 [D]. 济南: 山东师范大学, 2012.
- [17] 王红瑞, 董艳艳, 王军红, 等. 黄河河口地区生态供水效益分析 [J]. 自然资源学报, 2007, 22 (6) : 924-935. (WANG Hongrui, DONG Yanyan, WANG Junhong, et al. Analysis of ecological water supply benefits in the Estuary District of the Yellow River [J]. Journal of Natural Resources, 2007, 22 (6) : 924-935. (in Chinese))
- [18] 刘峰. 黄河三角洲湿地水生态系统污染、退化与湿地修复的初步研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
- [19] 于守兵, 凡姚申, 余欣, 等. 黄河河口生态需水研究进展与展望 [J]. 水利学报, 2020, 51 (9) : 1101-1110. (YU Shoubing, FAN Yaoshen, YU Xin, et al. Advances and prospects of ecological water demands in the Yellow River Estuary [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51 (9) : 1101-1110. (in Chinese))
- [20] 易雨君, 谢泓毅, 宋劼, 等. 黄河口盐沼湿地植被群落适宜生境模拟 I : 理论 [J]. 水利学报, 2021, 52 (3) : 255-264. (YI Yujun, XIE Hongyi, SONG Jie, et al. Simulation of salt marsh vegetation community's suitable habitat in Yellow River Estuary I : theory [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52 (3) : 255-264. (in Chinese))
- [21] 易雨君, 谢泓毅, 宋劼, 等. 黄河口盐沼湿地植被群落适宜生境模拟 II : 应用 [J]. 水利学报, 2021, 52 (4) : 401-408. (YI Yujun, XIE Hongyi, SONG Jie, et al. Simulation of salt marsh vegetation community's suitable habitat in Yellow River Estuary II : application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52 (4) : 401-408. (in Chinese))
- [22] YI Yujun, LIU Qi, ZHANG Jin, et al. How do the

- variations of water and sediment fluxes into the estuary influence the ecosystem? [J]. Journal of Hydrology, 2021, 600:126523.
- [23] JAMES G M, WANG J, ZHU J. Functional line ar regression that's interpretable. [J]. The Annals of Statistics, 2009, 37(5A):2083-2108.
- [24] SUN T, YANG Z F, CUI B S. Critical environmental flows to support integrated ecological objectives for the Yellow River Estuary, China[J]. Water Resources Management, 2008, 22(8):973-989.
- [25] 庞爱萍,孙涛.基于生态需水保障的农业生态补偿标准[J].生态学报, 2012, 32 (8) : 2550-2560. (PANG Aiping, SUN Tao. A method of determining standards for ecological compensation in agricultural areas, giving priority to environmental flows in water allocation [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32 (8) : 2550-2560. (in Chinese))
- [26] 谷源泽,徐丛亮,张朝晖,等.黄河入海淡水对海洋生态调控响应研究[J].人民黄河,2019,41(8):68-75. (GU Yuanze, XU Congliang, ZHANG Zhaohui, et al. Response of fresh water from Yellow River to marine ecological regulation [J]. Yellow River, 2019, 41 (8) : 68-75. (in Chinese))
- [27] 王远见,江恩慧,李新杰.黄河小浪底水库2018年生态调度的理论与方案研究[C].//中国大坝工程学会2018学术年会论文集.北京:中国大坝工程学会, 2018;52-58.
- [28] TIAN Shimin, ZHAO Yi, WANG Yuanjian, et al. Study on ecological scheduling of the Xiaolangdi Reservoir based on the ecological needs of estuarine fishes[J]. MATEC Web of Conferences, 2018, 246:01045.
- [29] 刘晓燕.黄河环境流研究[M].郑州:黄河水利出版社, 2009;5-8.
- [30] 胡春宏.黄河水沙变化与治理方略研究[J].水力发电学报, 2016, 35 (10) : 1-11. (HU Chunhong. Changes in runoff and sediment loads of the Yellow River and its management strategies [J]. Journal of Hydropower Engineering, 2016, 35(10):1-11. (in Chinese))
- [31] 刘晓燕.关于黄河水沙形势及对策的思考[J].人民黄河, 2020, 42 (9) : 7. (LIU Xiaoyan. The water and sediment situation and countermeasures [J]. Yellow River, 2020, 42(9):7. (in Chinese))
- [32] 水利部黄河水利委员会.黄河流域综合规划:2012—2030年[M].郑州:黄河水利出版社,2013.
- [33] 胡春宏,陈建国,刘大滨,等.水沙变异条件下黄河下游河道横断面形态特征研究[J].水利学报,2006,37 (11) : 1283-1289. (HU Chunhong, CHEN Jianguo, LIU Dabin, et al. Studies on the features of cross section's profile in lower Yellow River under the conditions of variable incoming water and sediment [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37 (11) : 1283-1289. (in Chinese))
- [34] 蒋晓辉,何宏谋,曲少军.黄河干流水库对河道生态系统的影响及生态调度[M].郑州:黄河水利出版社, 2012;205-206.

(收稿日期:2021-11-07 编辑:彭桃英)

(上接第 116 页)

- [91] 牛智星,胡春杰,阮聪,等.基于水尺图像自动提取水位监测系统与应用[J].电子设计工程,2019,27 (23) : 103-107. (NIU Zhixing, HU Chunjie, RUAN Cong, et al. The extraction and application of automatic water level monitoring system based on image gauge [J]. Electronic Design Engineering, 2019, 27 (23) : 103-107. (in Chinese))
- [92] 董淑贤.远程视频监控系统在城市排水防涝方面的应用[J].中国给水排水,2015,31(9):129-131. (DONG Shuxian. Application of remote video monitor and control system in municipal drainage system [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(9):129-131. (in Chinese))
- [93] 万胜磊,左林远,王松吉.莱西市区道路积水监测系统设计[J].山东水利,2011(增刊1):61-62. (WANG Shenglei, ZUO Linyuan, WANG Shongji. Design of the monitoring system for road water in Laixi City [J]. Shandong Water Resources, 2011 (Sup1): 61-62. (in Chinese))
- [94] 薛丰昌,宋肖依,唐步兴,等.视频监控的城市内涝监测预警[J].测绘科学,2018,43 (8) : 50-55. (XUE Fengchang, SONG Xiaoyi, TANG Buxing, et al. Urban waterlogging monitoring based on urban video image [J]. Science of Surveying and Mapping, 2018, 43 (8) : 50-55. (in Chinese))
- [95] BHOLA P K, LEANDRO J, DISSE M. Flood inundation forecasts using validation data generated with the assistance of computer vision [J]. Journal of Hydroinformatics, 2019, 21(2):240-256.
- [96] 沈建刚,高芳琴,把袆.城市治理数字化“一网统管”智能处置道路积水[J].上海信息化,2021(2):24-27. (SHENG Jiangang, GAO Fangqin, BA Yi. Digital city governance “Overall Planning Management Pipe Network” intelligent disposal of road water [J]. Shanghai Informatization, 2021(2):24-27. (in Chinese))
- [97] 魏博洋.中心城区积水监测信息系统在天津市防汛中的应用[J].海河水利,2020(5):63-64. (WEI Boyang. Application of water monitoring information system in central city area to flood control in Tianjin [J]. Haihe Water Resources, 2020(5):63-64. (in Chinese))
- [98] 吴先华,肖杨,王国复,等.基于微博大数据的城市内涝灾害的灾情及公众情绪研究:以南京市为例[J].灾害学,2018,33(3):117-122. (WU Xianhua, XIAO Yang, WANG Guofu, et al. Research on disaster and public sentiment of urban waterlogging disaster based on microblogging big data; take Nanjing as an example [J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33 (3) : 117-122. (in Chinese))
- [99] WANG R Q, MAO H, WANG Y. Hyper-resolution monitoring of urban flooding with social media and crowdsourcing data [J]. Computers & Geosciences, 2018 (111):139-147.

(收稿日期:2021-10-26 编辑:王芳)