学术信息与动态

DOI: 10.20103/j.stxb.202210082850
邱梦琪,韩美,焦晨泰,宋爽,刘焱序.黄河口湿地生态需水量估算.生态学报,2023,43(21):9096-9105.

黄河口湿地生态需水量估算

邱梦琪[1,2],韩 美[2,*],焦晨泰[1],宋 爽[1],刘焱序[1]

1 北京师范大学地理科学学部 地表过程与资源生态国家重点实验室,北京 100857

2 山东师范大学地理与环境学院 黄河三角洲水土资源保护与高质量发展特色实验室,济南 250014

摘要:黄河口拥有中国暖温带面积最广阔、自然属性最显著、结构最完整的滨海湿地生态系统,因处在河-海-陆交汇的复杂界面,湿地生态系统十分脆弱。满足生态需水是维持湿地生态系统健康的基础和关键,但以往估算缺乏系统综合性视角且存在时间尺度较粗的问题。从维持湿地面积、保护生物多样性及稳定生态系统功能和过程 3 个目标出发,构建了包含 5 项指标的湿地生态需水指标体系,对湿地 3 个等级、3 个时段生态需水进行了估算,并据此判断了 2000 年至 2019 年黄河口湿地在极端丰水年及枯水年生态需水的满足状况,结果表明:黄河口湿地全年的最小、适宜、最大生态需水量分别为 13.33×10^8 m^3、22.33×10^8 m^3、35.31×10^8 m^3;4—6 月、7—10 月、11—3 月的适宜生态需水量分别为 6.76×10^8 m^3、10.10×10^8 m^3、5.47×10^8 m^3;2002 年黄河口湿地在 3 个时段需要的适宜生态需水量分别是径流量的 4.17、1.09、2.39 倍,表现为极度缺水;2019 年相应时期的适宜生态基流占比分别为 25.67%、15.77%及 37.01%,其中 4—6 月及 11—3 月的生态水情较为紧张。研究结果为保障黄河口湿地生态系统健康及湿地用水科学管理提供了定量支撑。

关键词:黄河口湿地;生态需水;生态系统功能;需水等级

黄河口湿地位于黄河入海口处,凭借黄河独特的水沙条件和河流-海洋-陆地三大要素的交互作用形成了世界上陆地面积生长最快的河口三角洲及中国暖温带面积最广阔、自然属性最显著、生态过程最完整的滨海湿地生态系统[1]。作为全球新生河口湿地的典型代表,黄河口湿地提供了多样的生态系统功能,包括生物多样性维持、环境净化、地下水补给、土壤保持等[2]。但由于河口湿地处在河-海-陆交汇的复杂不稳定界面,生态系统十分脆弱[3],在黄河中下游来水来沙减少的情况下极易发生生态系统退化。例如,由于 20 世纪 70 年代到 90 年代的黄河断流,造成了河口湿地生物多样性锐减、海岸线蚀退、生态系统失调等后果,严重破坏了河口湿地生态系统结构和功能的完整性[4]。

水作为构成湿地的三大关键要素之一,淡水的流量和时间变化通过改变河口地貌、水文、生境和生态过程影响湿地的结构和功能,因此水对于建立和维持河口湿地生态系统健康及其演变过程具有决定意义[5]。然而,黄河口湿地所在的城市——东营市的水资源供需矛盾十分突出,城市人均水资源量不足中国人均水资源占有量的 15%;城市生产、生活、生态用水分配极为不均,2016 年—2020 年仅人类社会用水占到了总用水量的 80%[6],严重挤占了生态用水空间。尽管黄河断流的问题已经得到解决,但功能性断流仍是制约黄河口湿地生态系统健康发展的条件。为了使生态系统进入良性状态,优化河口区域水资源的配置与调度,有必要科学计算黄河口湿地的生态需水量。

生态需水是在人类社会用水与自然生态系统用水二者之间矛盾日益加剧的背景下提出的,是保证生态系

基金项目:国家社会科学基金项目(21BGL026)

收稿日期:2022-10-08; **网络出版日期**:2023-06-27

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: hanmei568568@126.com

统结构完整、功能正常发挥、生态过程稳定所需要的水量,可以分为河流、湿地、湖泊等生态需水[7—8]。黄河口湿地生态需水评估的计算方法大致分为三种:功能设定法、关键物种指示法(相关分析法)及生态模拟法[9]。功能设定法是在识别生态系统的功能后确定需水类别,进而综合求取生态需水量的方法[10]。关键物种指示法是在识别湿地内关键性指示物种后,根据其与水文情势的响应机理确定满足其生存的生态需水量。生态模拟法是建立在生态-水文学科背景下,通过模拟不同补水方案带来的湿地景观变化从而确定适宜的生态需水量[11]。生态模拟法相对全面的考虑了生态-水文间的互馈机制,但其模拟系统参数的确定需要大量的实测资料,实际操做起来相对困难、复杂[9]。功能设定法是从宏观层面把控生态需水目标,关键物种指示法是从微观角度反映物种与生境间的联系,二者评估结果一般为年或多年尺度。

目前,基于不同方法和指标的黄河口湿地生态需水估算结果存在极大差异,而且缺乏既能从宏观角度保证湿地生态系统完整性,又能从微观尺度考虑湿地关键物种生境,并且还考虑年内不同时期生态需水的研究方法。本文根据黄河口湿地现状确定需水规模、识别关键物种及生态系统主要功能,构建生态需水评价的综合指标体系,在此基础上设置需水阈值及年内不同时期的水量分配,结合功能设定法及关键物种指示法估算生态需水量,并据此判断了近 20 年来黄河口湿地在极端丰水年及枯水年生态需水的满足状况,研究结果可为保障黄河口湿地生态系统健康及水资源科学管理提供定量支撑。

1　研究区概况

研究区位于山东省东营市的黄河入海口处,以 1976 年改道后的现代河口及废弃流路的近代河口为主体划分成东南和西北两个区域(图 1),介于东经 118°13′—119°30′、北纬 37°25′—38°17′之间,包括陆域和海域两大部分。为保证生态系统的完整性,本文将黄河口陆域区域的自然湿地作为估算生态需水的规模,面积为 8.62×10^4 hm^2。黄河口湿地是众多滨海植被及珍稀濒危鸟类的理想栖息地,每年约有 230 种环西太平洋和东亚-澳大利西亚国际候鸟在此迁徙及繁殖,生物多样性极为丰富[12]。淡水资源短缺、降水季节分配不均是黄河口湿地水情较为突出的问题。黄河是域内唯一可大规模开发利用的淡水资源,但由于黄土高原的植被恢复及小浪底水库的调水调沙作用,2000 年—2012 年黄河的平均入海流量及含沙量相较于 1976 年—1986 年分别减少了 50.6%、84.2%,造成河口湿地生态系统出现逆向演替[13]。区域平均蒸发量是降水量的 3.5 倍,其中 75%的降水集中在 6—9 月份[14],在春、冬季降水难以满足湿地生态系统的正常运转。为保护和恢复黄河口

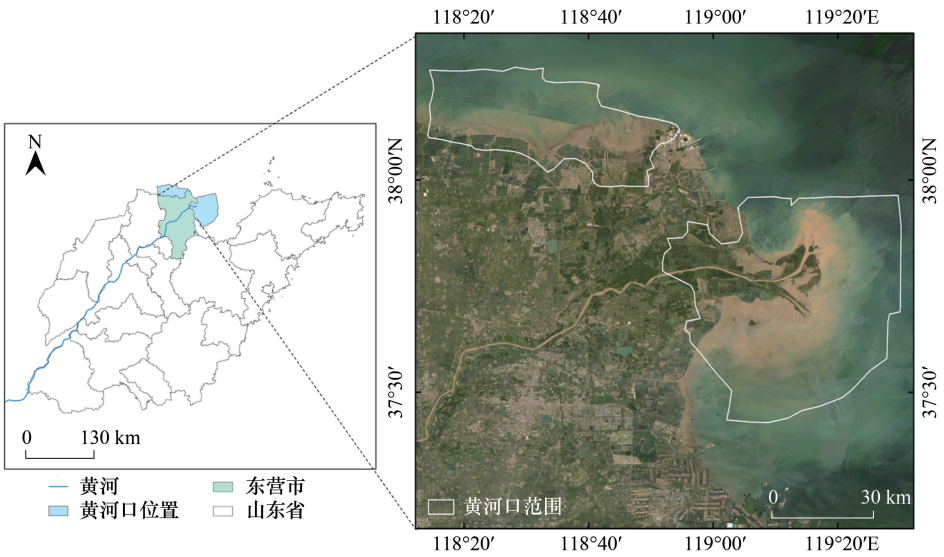

图 1　黄河口位置及范围

Fig.1　Location and extent of the Yellow River estuary

湿地,东营市生态用水的分配额度从 2016 年的 6%增加至 2020 年的 33%,一定程度上促进了河口湿地生态恢复,但迄今为止恢复工作仍不足以扭转河口湿地生态系统服务下降的趋势[15]。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源与处理

黄河口湿地面积数据来源于山东省自然资源厅发布的《黄河口国家公园总体规划》,以及利用 ArcGIS 提取的黄河口国家公园范围矢量文件对 2020 年东营市土地利用数据(空间分辨率为 150 m,来自中国科学院资源环境科学数据中心(https://www.resdc.cn)进行裁剪获得的数据。黄河口湿地蒸散发数据来源于李发鹏等学者利用 SEBS 模型估算的月平均蒸散发量数据[16]。湿地植被区多年平均蒸腾量及潜在蒸散发量来源于张长春基于遥感方法计算的数据[17]。黄河利津站月径流量数据来源于国家地球系统科学数据共享服务平台(http://www.geodata.cn/data)。

依据《湿地分类》(GB/T 24708—2009),将黄河口湿地划分为自然湿地及人工湿地两种类型。在土地利用数据提取的地类中,滩涂、滩地及沼泽地是典型的天然湿地斑块,高覆盖度草地(覆盖度>50%)及有林地主要分布在河流两侧的自然湿地内,将其纳入自然湿地以进行生态需水计算。因此,本文的自然湿地共包括滩涂、滩地、沼泽地、高覆盖度草地、有林地五个地类,人工湿地包括水库坑塘、沟渠、水田及盐田。根据地类属性进一步将黄河口自然湿地划分为植被区与非植被区,其中滩地、沼泽地生长了大量的耐盐碱植被,为芦苇、碱蓬、柽柳这些优势物种提供了重要的生境,并成为河口区珍稀濒危鸟类的庇护所,本文将其归为植被区。而沿海滩涂介于高潮位与低潮位之间,植被稀疏且主要被外来入侵物种互花米草占据,为计算生态需水将其归为非植被区。黄河口各湿地面积如表 1 所示。

表 1 黄河口湿地面积/hm^2

Table 1 Area of Yellow River estuary wetlands

区域 Area	自然湿地 Natural wetlands		人工湿地 Constructed wetlands	水域 Water area
类型 Subarea	植被区	非植被区	水库坑塘、沟渠、水田、盐田	永久性河流
面积 Area	41654.23	44707.19	9595.71	4857.55

2.2 生态需水评价指标体系

黄河口湿地生态需水评价指标体系的构建与湿地生态系统的管理目标及生态系统功能密切相关。通过对河口湿地生态现状调查,维持新生湿地规模、保护生物多样性及珍稀濒危鸟类栖息地是生态管控的重点。基于此,本文从保证生态系统结构和功能的完整性及过程的稳定性出发,根据方法的可行性及数据的可获得性,构建了黄河口湿地生态需水评价指标体系(表 2),分为三个目标层次,分别是维持湿地规模、保护生物多样性及稳定湿地生态系统功能和过程。维持湿地规模是保证生态系统结构完整、功能正常发挥的基础和前提,通过保障湿地蒸散发需水量和土壤需水量防止湿地面积退化。保持生物多样性是黄河口国家公园建设的重要目标,也是河口湿地生态保护的红线,选取植被需水量及生物栖息地需水量作为生物多样性维护的关键指标。补给地下水是湿地生态系统的重要功能,它代表了湿地地表水与地下水产生水力联系的重要生态-水文过程,因此本文将补给地下水需水量作为稳定生态系统功能和过程的关键指标。

2.3 生态需水计算方法

功能设定法是从湿地生态系统整体出发,分析生态系统的主要功能,分别计算各功能的生态需水,最后按照一定的原则进行整合的方法。基于功能设定法的原理,黄河口湿地生态需水可用如下公式计算:

$$W = dW_{p1} + Q_t + dW_{p2} + dW_q + W_b \quad (1)$$

式中,W 为黄河口湿地生态需水量,dWp_1 为湿地蒸散需水量,Q_t 为土壤需水量,dWp_2 为植被需水量,dW_q 为生物栖息地需水量,W_b 为补给地下水需水量。

表 2　黄河口湿地生态需水评价指标体系

Table 2　Evaluation index system of ecological water requirement in the Yellow River estuary wetlands

目标层 Destination hierarchy	指标层 Index hierarchy	指标解释 Interpretation of indicators
维持湿地规模(W_1)	湿地蒸散需水量(dW_{p1})	补充湿地因蒸散发而损失的水量
Maintaining wetland area	土壤需水量(Q_t)	保持土壤水分
保护生物多样性(W_2)	植被需水量(dW_{p2})	满足植被生长需求
Protecting biodiversity	生物栖息地需水量(dW_q)	满足生物对水深的需求
稳定生态系统功能和过程(W_3) Stabilizing ecosystem function	补给地下水需水量(W_b)	满足补充地下水的需求

2.3.1　湿地蒸散需水计算方法

湿地的蒸散发是水循环的重要组成部分之一,包括植被区蒸腾需水量与非植被区蒸发需水量两个部分。由于植被蒸腾需水量占植被总需水量的 99%[18],下文还会涉及植被生态需水量的计算,为避免重复,在此项只计算湿地非植被区的蒸散发量。公式如下:

$$dW_{p1}/d_t = A(t)ET_m \tag{2}$$

式中, dWp_1 为非植被区需水量, $A(t)$ 为湿地非植被区面积, ET_m 为蒸散发量, t 为时间。考虑到河流水面的蒸发占据了较大的耗水比重,本文在实际计算时面积取非植被区及河流面积之和。

2.3.2　土壤需水计算方法

土壤作为湿地生态系统的重要组成部分,是地球表层除河流、湖泊外最大的淡水资源储存库,对湿地的演替至关重要。土壤水分是调节植被群落的主要因素,影响着植被群落的结构和复杂性,只有当土壤含水量达到一定的程度才能够被植物吸收并利用,通常将土壤萎蔫系数作为植被吸收水分的最小土壤含水量,将土壤田间持水量作为土壤有效水的最大值[19]。公式如下:

$$Q_t = aH_tA_t \tag{3}$$

式中, Q_t 为土壤需水量, a 为田间持水量, H_t 为土壤厚度, A_t 为湿地土壤面积。

黄河口地势比较平坦,假设湿地土壤是均质且水平的陆地表面,计算时一般取平均土壤厚度为 1.5 m[17],土壤面积取自然湿地面积。

2.3.3　植被需水计算方法

植被是湿地组成的三大关键要素(水、土壤、植被)之一,不仅为湿地生态系统保证了生物多样性,而且为湿地生物提供了栖息地,满足植被生态需水对于维系生态系统稳定具有重要的生态意义。植被生态需水量是维持植被正常生长发育所需的水量[20],包括植被自身非消耗性需水量及蒸腾需水量,其中后者占植被总需水量的 99%,在此以植被蒸腾需水量作为植被生态需水量值。公式如下:

$$dW_{p2}/d_t = A(t)ET_m \tag{4}$$

式中, dW_{p2} 为植被区需水量, $A(t)$ 为湿地植被区面积, ET_m 为蒸散发量, t 为时间。

2.3.4　生物栖息地需水计算方法

保护生物多样性及珍稀濒危鸟类栖息地是湿地管理的重要目标。黄河口湿地的沼泽、植被和水面是鸟类和鱼类等生物的主要栖息地,这些滨海生物对栖息地的水面面积、植被盖度、植被类型等因素具有稳定的选择倾向。因此,借助关键物种指示法可以确定生物栖息地生态需水量[21],公式如下:

$$dW_q/d_t = A(t)\%H(t) \tag{5}$$

式中, dW_q 为生物栖息地需水量, $A(t)$ 为自然湿地面积, % 为水面面积百分比, $H(t)$ 为水深, t 为河口湿地水体换水周期,本文取换水周期为 1 年。

2.3.5　补给地下水需水计算方法

为保证湿地生态系统结构和功能的完整性,需要一定的水量补给地下水维持生态系统正常运行。湿地与

地下水联系相对比较复杂,受土壤的类型、覆盖植被、水力梯度等因素影响。为简化计算程序,假设补给地下水的面积为湿地明水面面积,公式如下[22]:

$$W_b = kIAT \tag{6}$$

式中, W_b 为补给需水量, k 为渗透系数, I 为水力坡度, A 为自然湿地面积, T 为计算周期长度,本文渗透系数取 0.005 m/d,补水天数为 180 d。

2.4 生态需水等级及年内不同时期需水量分配

湿地生态需水量具有阈值性与季节性。结合黄河口湿地典型植被及珍稀濒危鸟类需水规律、降水及河流水文特征,对生态需水量作出如下设定:第一,将湿地生态需水量分为三个等级,分别为最小需水量、适宜需水量及最大需水量。最小需水量是保持湿地生态系统的基本功能的水量,若低于该值湿地将出现生态退化;适宜需水量是湿地生态系统结构完整、功能正常发挥,达到最佳理想状态时的需水量;最大需水量是湿地生态系统的各个组分所能承受的最大水量,若高于该值湿地生物、土壤、植被、水文及环境功能将受到影响。第二,将生态需水划分为 11—3 月、4—6 月、7—10 月三个时段评估[23]。11—3 月是鸟类的越冬期,对湿地水深要求不高,称为越冬期;4 月是生物生长繁殖的关键期,需要足够的水量才能生长及繁殖,将此阶段定义为繁殖期;7—10 月气温和降水显著增加,植被生长旺盛,将此阶段定义为汛期。

2.4.1 湿地蒸散需水设定

计算湿地蒸散需水量是为了保证湿地的规模,因此需水量的等级可用湿地面积比重作为划分的界限。黄河口湿地的滩涂面积占自然湿地总面积的 51.77%,考虑到滩涂面积增大则会导致植被区面积下降,结合《黄河口国家公园规划》中 2020 年—2023 年国土空间利用规划表,本文将最小、适宜、最大湿地蒸散需水量分别设定为滩涂/自然湿地面积比为 0.5、0.45、0.4 的情景下的湿地蒸散生态需水量。

2.4.2 土壤需水设定

土壤需水量的需水等级根据含水量划分,当土壤的田间持水量小于 30%时,植被会因为缺水而凋萎,将其作为土壤需水量的最小值;当土壤的饱和持水量为 55%时,是植被生长的最佳状态,对应适宜生态需水量;当土壤的饱和蓄水能力大于 80%时,到达植被对水的最大耐受程度,此时对应的水量为最大需水量[22]。最后将土壤需水量按照利津站实测的 2013 年—2017 年平均月径流量比例(4—6 月、7—10 月、11—3 月的比例分别为 0.27、0.44、0.29),分配到越冬期、繁殖期及汛期作为土壤需水量的配额。

2.4.3 植被需水设定

湿地植被需水量等级可用平均蒸散发与潜在蒸散发划分。黄河口湿地年均蒸腾量为 711 mm[17],将其设定为最小生态需水量对应的临界值。黄河口湿地的潜在蒸发量为 1100 mm[17],将其对应的需水量界定为最大需水量。当前缺乏月时间尺度的黄河三角洲植被蒸腾量,考虑到植被蒸散发量与区域蒸散发量存在显著的线性相关性(相关系数为 0.84)[24],本文将植被区的多年年均蒸腾量及潜在蒸发量按照黄河口湿地整体区域的月蒸散发量比例进行分配(4—6 月、7—10 月、11—3 月的比重分别为 0.35、0.43、0.22)。

2.4.4 生物栖息地需水设定

芦苇是黄河口湿地的指标群落,在植物萌发、生长和繁殖阶段对水位有不同的生理需求。同时,芦苇群落为珍稀濒危鸟类提供了优良的生殖繁衍、迁徙越冬场所,因此本文将芦苇群落作为生物栖息地需水量计算的指示性物种。卓俊玲等对黄河三角洲芦苇群落对水位环境梯度的响应进行了研究[25](表 3),随着水深梯度的增加,芦苇群落需要的生境面积也会逐渐扩大,因此对应着不同比例的水面面积,本文将湿地面积的 30%、50%、80%作为划分最小、适宜、最大需水量的界限。

2.4.5 补给地下水需水设定

与生物栖息地生态需水设定相同,本文将补给地下水的最小、适宜、最大需水量对应的水面面积百分比定为 30%、50%、80%。黄河口 6—8 月降水量约占全年的 55%、6—10 月的径流量约占全年的 61%[26—27],因此 6—10 月是主要的补水时期,本文将补水天数按照 180 d 计算。同样,将补给地下水需水量按照利津站实测的

2013 年—2017 年月径流量比例,分配到越冬期、繁殖期及汛期,得到年内不同时期的配额。

综上所述,得到黄河口湿地最小、适宜、最大生态需水量的划分等级如表 4 所示。

表 3　黄河口湿地指示生物需水特征

Table3　Water requirement characteristics of indicator organisms in the Yellow River estuary wetlands

时间 Time	需水原因 Water requirement reason	最小需水深度/cm Minimum water requirement depth	平均需水深度/dm Average water requirement depth	最大需水深度/cm Maximum water requirement depth
4—6 月 From April to June	芦苇萌芽和生长	10	30	50
7—10 月 From July to October	芦苇生长、鸟类栖息	20	50	80
11—3 月 From November to March	鸟类越冬栖息需要	10	15	20

表 4　黄河口湿地生态需水的等级划分

Table 4　Ranking of ecological water requirement in the Yellow River estuary wetlands

需水类别 Water requirement categories	划分指标 Division of indicators	最小需水量 Minimum water requirement	适宜需水量 Appropriate water requirement	最大需水量 Maximum water requirement
湿地蒸散需水 Evapotranspiration water requirement of wetlands	湿地滩涂面积百分比	50%	45%	40%
土壤需水量 Soil water requirement	田间持水量	30%	55%	80%
植被需水量 Vegetation water requirement	年均蒸腾量	711 mm	905 mm	1100 mm
生物栖息地需水量	水面面积百分比	30%	50%	80%
Habitat water requirement	生物需水深度	10—20 cm	15—50 mm	20—80 mm
补给地下水需水量 Recharge groundwater water requirement	水面面积百分比	30%	50%	80%

2.5　生态需水满足状况识别

水文指标的引入有助于评估生态需水量的适宜性并判断湿地的生态水情信息[28]。国际上通常将生态需水量占多年平均天然径流的比重称为“生态基流占比”,以此作为反映生态需水适宜性的重要指标[29]。如著名的 Tennant 法就是将枯水期径流的 10%、汛期径流的 20%—30%作为满足河道生态系统正常运转的需水量[30]。利津站是黄河入海的最后一个水文监测站,该站点的径流量很大程度上决定了黄河口湿地生态系统演化的格局。本文通过计算不同级别的生态需水量占利津站径流量的比重(生态基流占比)来识别黄河口湿地近 20 年来在极端丰水年与枯水年不同时期生态需水量的满足状况。

3　结果

3.1　黄河口湿地年尺度生态需水量

为维持黄河口湿地规模、保护生物多样性及稳定生态系统的功能及过程,黄河口湿地全年需要的最小生态需水量为 13.33×10^8 m^3,适宜需水量为 22.33×10^8 m^3,最大需水量为 35.31×10^8 m^3。从各个需水目标看(图 2),维持湿地规模是黄河口湿地主要的需水项目,所需要的适宜生态需水量为 10.57×10^8 m^3,占全部适宜生态需水量的 47%;其次是保护生物多样性生态需水量,占全部适宜需水量的 35%;稳定生态功能及过程的适宜生态需水量最小,为 12.34×10^8 m^3。其中,保护生物多样性的生态需水量阈值最大,介于 4.00×10^8—14.94×10^8 m^3之间。从各需水指标看(图 2),土壤需水的适宜生态需水量最大,全年适宜生态需水量为 7.12×10^8 m^3,占全部需水的 32%;湿地蒸散需水、植被需水、生物栖息地需水、补给地下水的生态需水量分配较为均衡,平均占总生态需水量的 17%。各指标生态需水量阈值差异明显,由大到小分别是生物栖息地(1.04×10^8—10.36×10^8 m^3)、土壤需水(3.89×10^8—10.36×10^8 m^3)、补给地下水(2.33×10^8—6.22×10^8 m^3)、植被需水

(2.96×10^8—4.58×10^8 m^3)及湿地蒸散需水(3.11×10^8—3.79×10^8 m^3)。

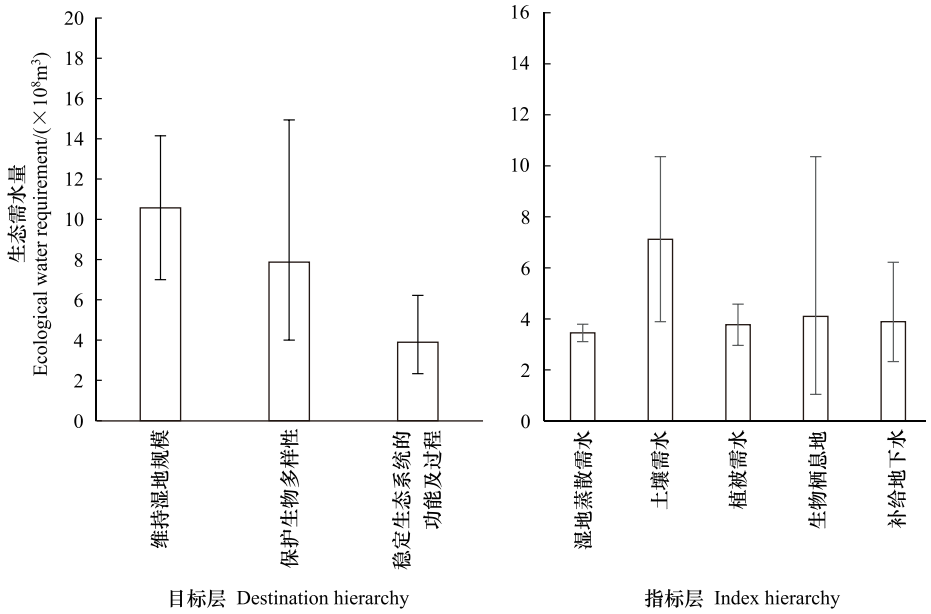

图 2 黄河口湿地目标层及指标层年度适宜生态需水量及其阈值

Fig.2 Annual suitable ecological water requirement and threshold of destination and index hierarchy in the Yellow River estuary wetlands

3.2 黄河口湿地年内不同时期生态需水量

黄河口湿地年内不同时期的生态需水量具有明显的差异,汛期需要的适宜生态需水量为全年的最大值(10.10×10^8 m^3),占总适宜生态需水量的45%;繁殖期及越冬期的适宜需水量相对较少,分别为6.76×10^8 m^3、5.47×10^8 m^3,占全年总生态需水量的30%及25%。基于不同目标的生态需水量也存在明显的时期差异(图3),维持湿地规模及保护生物多样性的适宜生态需水量均为汛期(4.61×10^8 m^3、3.78×10^8 m^3)>繁殖期(3.11×10^8 m^3、2.60×10^8 m^3)>越冬期(2.84×10^8 m^3、1.50×10^8 m^3);稳定生态系统功能的适宜生态需水量表现为汛期(1.71×10^8 m^3)>越冬期(1.13×10^8 m^3)>繁殖期(1.05×10^8 m^3)。

在繁殖期,各指标的适宜生态需水量除土壤需水(1.92×10^8 m^3)外,其他指标需水量比较均衡(约1.21×10^8 m^3);在汛期,土壤需水、生物栖息地需水及补给地下水的适宜生态需水量相对前一阶段迅速上涨,分别增

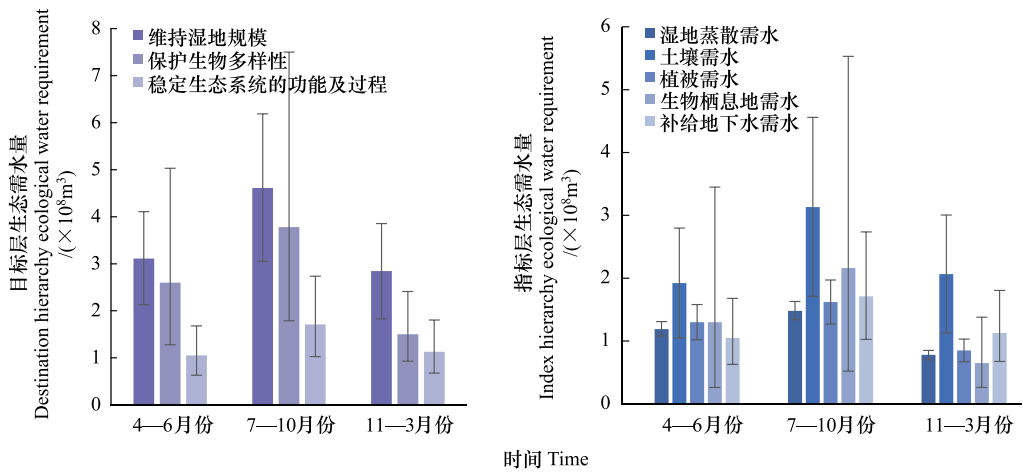

图 3 黄河口湿地年内不同时期目标层及指标层适宜生态需水量及阈值

Fig.3 Seasonal suitable ecological water requirement and threshold of destination and index hierarchy in the Yellow River estuary wetlands

加了 62.96%、66.15%及 62.96%;到了越冬期各指标的适宜生态需水量均有所下降,其中生物栖息地需水下降最为显著(下降 69.91%),维持土壤需水(2.06×10^8 m^3)及补给地下水(1.13×10^8 m^3)成为越冬期的主要需水类型。从各目标的需水阈值来看,在繁殖期及汛期生物栖息地的生态需水量阈值最大,分别为 0.26×10^8—3.45×10^8 m^3、0.52×10^8—5.53×10^8 m^3;在越冬期,土壤需水的生态需水量阈值最大,介于 1.12×10^8—3.00×10^8 m^3之间。

3.3　黄河口湿地生态需水满足状况

2000 年—2019 年近 20 年来,利津站的年径流量虽波动较大但整体上呈上升趋势。2002 年利津站的年径流量仅为 41.90 亿 m^3,是此阶段的水量最少的年份,称其为极端枯水年;2019 年的年径流量为 333.66 亿 m^3,是此阶段径流最多的年份,称其为极端丰水年。从最小生态需水量来看(图 4),在枯水年利津站的径流量在繁殖期及越冬期远不能满足生态系统的最低要求,需要的生态需水量分别是当年径流量的 2.49、1.50 倍;在汛期,2002 年的最小生态基流占比为 63.06%,虽相对另两个阶段情况有所好转,但该比重仍高于正常水平。同时,2002 年的适宜生态需水量及最大生态需水量均远远超过该年份的径流量。进一步分析看出,繁殖期生态用水情况最为紧张,所需的适宜生态需水量是径流量的 4.17 倍;其次是越冬期,适宜生态需水量是径流量的 2.90 倍;再次是汛期,所需的适宜生态需水量占径流量的 1.09 倍。

2019 年是近 20 年来的相对丰水年,各个时期最小生态需水量分别占该年份利津站径流量的 15.33%、9.15%、23.22%(图 4),黄河口湿地生态系统能够得到最基本的水量保障,情况相对于 2002 年有了明显的改善。从年内不同时期来看,生态基流的占比由大到小分别是越冬期、繁殖期及汛期,说明在此年份越冬期的生态水情最为紧张。适宜生态需水量占到了越冬期径流量的 37.01%(图 4),该比重相对于正常比重偏大,应根据实际情况进行适当的生态补水;在繁殖期,适宜的生态基流占比为 25.67%,同样也应该视情况进行补水。汛期的适宜生态需水比重相对较低,河口湿地的生态需水大致可以得到满足。

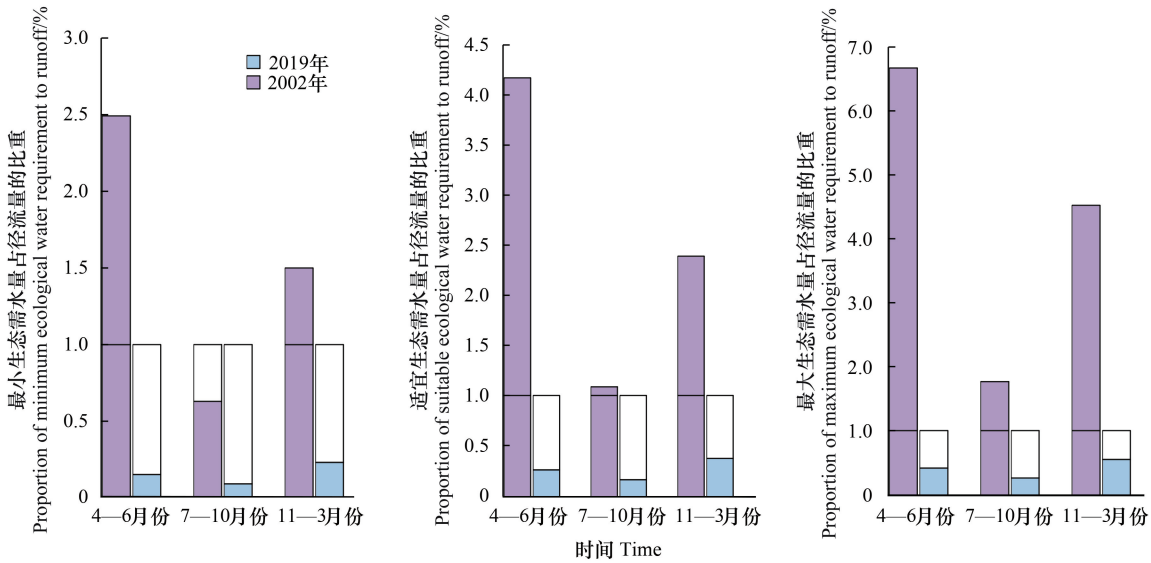

图 4　2002、2019 年不同时期、不同等级生态需水量占利津站径流量的比重

Fig.4　Seasonal and different levels of proportion of ecological water requirement to Lijin Station′ runoff in 2002 and 2019

4　讨论

本文选取了五篇时间分布在 2005—2021 年间关于黄河口生态需水估算的代表性研究进行对比分析,涵盖了遥感、功能设定及关键物种指示法三种主要的计算方法(表 5)。

由于不同学者选取的湿地规模、计算方法、考虑的生态需水类型等差异导致最终结果具有不确定性。首先,本文计算的全年的生态需水结果(13.33×10^8 m^3—35.31×10^8 m^3)与表中 2005 年用遥感估算的结果接近,

但因其考虑了“防止海岸入侵”的生态需水量,结果相对本文偏大。调研发现黄河口北片主要通过工程措施防止海岸侵退,且通过生态补水难以满足防止湿地附近海岸蚀退的要求[35],故本文未将其纳入生态需水指标体系。其次,本研究计算的生物栖息地需水量的结果(1.04×10^8 m^3—10.36×10^8 m^3)与表中 2009 年的研究在最大需水量上相差比较悬殊,这是由于湿地规模的不同而导致的。相对于 2011 年及 2021 年的两项研究,本研究计算结果偏小,除研究方法的差异之外,根源在于对湿地生态需水内涵理解的偏差及研究对象的差异:前者研究的是黄河口整体的生态需水量(包括湿地、河口、河道生态需水量),湿地只是作为其需水类别的一部分,且计算出来的生态需水量面向黄河的径流量;本文研究只针对黄河口湿地生态系统的需水量,注重对生态系统功能的考量。

表 5 黄河口湿地生态需水文献成果

Table 5 Results of ecological water requirement research for the Yellow River estuary wetlands

年份 Year	面积/($\times10^4$ hm^2) Area	研究方法 Research methods	需水类别 Water requirement categories	生态需水量/($\times10^8$ m^3) Ecological water requirement
2021	116.00	关键物种指示法	芦苇、碱蓬、柽柳需水	19.94—324.89[31]
2011	7.87	功能设定法	生物栖息地、防止海水入侵、盐度平衡、蒸散发、补给地下水	78.21[32]
2009	2.30	关键物种指示法	芦苇及鸟类生态需水	2.8—4.2[33]
2005	2.30	功能设定法	植被、栖息地、土壤需水	16.59—28.04[34]
2005	7.78	遥感方法、功能设定法	植被、栖息地、土壤、补给地下水、蒸散发、防止海岸入侵	19.21—42.14[17]

5 结论与展望

本文根据黄河口湿地生态系统特征,从维持湿地面积、保护生物多样性及稳定生态系统功能和过程三个目标层次出发,构建了湿地生态需水评价指标体系,分别计算了年内不同等级、不同时期的生态需水量,结果表明:黄河口湿地全年的最小需水量 13.33×10^8 m^3,适宜需水量 22.33×10^8 m^3,最大需水量为 35.31×10^8 m^3;繁殖期、汛期、越冬期的适宜需水量分别是 6.76×10^8 m^3、10.10×10^8 m^3、5.47×10^8 m^3。维持湿地面积、保护生物多样性及稳定生态系统功能和过程的适宜需水量分别为 10.57×10^8 m^3、7.87×10^8 m^3、3.89×10^8 m^3。此外,本文根据计算得出的生态需水量评估了 2000 年至 2019 年以来利津站径流最少、最多年份在不同时期生态需水的满足状况,发现 2002 年黄河口湿地的生态需水完全得不到保障,在繁殖期、汛期及越冬期需要的适宜生态需水量分别是径流量的 4.17、1.09、2.39 倍,即繁殖期最为缺水,其次是越冬期及汛期;2019 年黄河口湿地生态需水状况有了明显的好转,在繁殖期、汛期及越冬期适宜生态基流的占比分别为 25.67%、15.77%及 37.01%,其中繁殖期及越冬期生态水情较为紧张,需要视实际情况进行相应补水。研究结合了功能设定法及关键物种指标法,充分发挥了不同方法的优势,既能从宏观角度保证湿地生态系统完整性,又能从微观尺度考虑湿地关键物种的生境需求,相对全面综合的评估了黄河口湿地的生态需水量。同时,本文通过深入分析各生态需水次级指标的特征,对年内不同时期、不同级别的需水量进行探讨,计算的生态需水量结果既具有横向的时间变化,又具有纵向的动态浮动,在实际应用中更具指导价值。

本文计算的生态需水量是维持湿地生态系统的结构功能完整及过程稳定的需水量,在现实实践中对黄河口湿地生态修复进行补水时,应该评估当前湿地的蓄水量,综合分析蓄水量与需水量的供需平衡再进行相应的补水。同时,湿地生态系统是一个统一的整体,系统功能的正常发挥离不开土壤、植被、水文、生物等各个组分之间的相互配合及协调,彼此之间具有密切的联系,本文在计算生态需水时采取了将各个目标及功能需水分别计算的方式,没有充分考虑各功能需水之间的联系,因此在估算精度上还有进步的空间。此外,黄河口湿地所处的东营市水资源严重短缺,如何在有限的水资源制约下谋求区域生产、生活、生态用水系统的权衡,实现生态需水的合理配置是未来水资源管理的重要议题。

参考文献(References):

[1] 牛明香, 王俊, 徐宾铎. 基于 PSR 的黄河河口区生态系统健康评价. 生态学报, 2017, 37(3): 943-952.

[2] Xia H J, Liu L S, Bai J H, Kong W J, Lin K X, Guo F. Wetland ecosystem service dynamics in the Yellow River Estuary under natural and anthropogenic stress in the past 35 years. Wetlands, 2020, 40(6): 2741-2754.

[3] Loucks D P. Developed River deltas: are they sustainable? Environmental Research Letters, 2019, 14(11): 113004.

[4] 叶青超. 黄河断流对三角洲环境的恶性影响. 地理学报, 1998, 53(5): 385-392, T001.

[5] 杨志峰, 崔保山, 孙涛. 湿地生态需水机理、模型和配置. 北京: 科学出版社, 2012: 1-6.

[6] 东营市人民政府.东营市水资源公报. [2021-11-09]. http://www.dongying.gov.cn.

[7] 魏彦昌, 苗鸿, 欧阳志云, 王效科. 海河流域生态需水核算. 生态学报, 2004, 24(10): 2100-2107.

[8] 赵芬, 庞爱萍, 李春晖, 郑小康, 王烜, 易雨君. 黄河干流与河口湿地生态需水研究进展. 生态学报, 2021, 41(15): 6289-6301.

[9] 汪志荣, 张晓晓, 田彦杰. 流域生态需水研究体系和计算方法. 湖北农业科学, 2012, 51(15): 3204-3211.

[10] 倪晋仁, 金玲, 赵业安, 刘小勇. 黄河下游河流最小生态环境需水量初步研究. 水利学报, 2002, 33(10): 1-7.

[11] 连煜, 王新功, 黄翀, 刘高焕, 王瑞玲, 张绍锋, 刘月良, Bas Pedroli, Michiel van Eupen. 基于生态水文学的黄河口湿地生态需水评价. 地理学报, 2008, 63(5): 424-434.

[12] 山东省自然资源厅.黄河口国家公园总统规划. (2021-09-26) [2022-12-28]. http://dnr.shandong.gov.cn/online_30077/yjzj/202109/t20210926_3735275.html.

[13] 谢卫明, 窦身堂, 余欣, 王开荣, 于守兵, 杜小康. 黄河口现行流路入海水沙特征对流域的响应. 海洋通报, 2019, 38(6): 675-682.

[14] 袁秀, 孙燕燕, 王计平, 于莉莉. 基于水鸟栖息地恢复的黄河三角洲水资源综合利用策略. 资源科学, 2020, 42(1): 104-114.

[15] 王浩, 胡鹏. 水循环视角下的黄河流域生态保护关键问题. 水利学报, 2020, 51(9): 1009-1014.

[16] 李发鹏, 徐宗学, 李景玉. 基于 MODIS 数据的黄河三角洲区域蒸散发量时空分布特征. 农业工程学报, 2009, 25(2): 113-120, 313.

[17] 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. 水土保持学报, 2005, 19(1): 149-152.

[18] 刘昌明,王会肖. 土壤-作物-大气界面水分过程与节水调控. 北京: 科学出版社, 1999: 10-18.

[19] 陈宝群, 赵景波. 黄土高原土壤水分环境评价初步研究. 干旱区资源与环境, 2010, 24(5): 184-189.

[20] 奚歌, 刘绍民, 贾立. 黄河三角洲湿地蒸散量与典型植被的生态需水量. 生态学报, 2008, 28(11): 5356-5369.

[21] 李咏红, 刘旭, 李盼盼, 陈利顶, 朱庆平, 王彤. 基于不同保护目标的河道内生态需水量分析——以琉璃河湿地为例. 生态学报, 2018, 38(12): 4393-4403.

[22] 崔保山, 杨志峰. 湿地生态环境需水量等级划分与实例分析. 资源科学, 2003, 25(1): 21-28.

[23] 王新功, 魏学平, 韩艳丽, 王瑞玲. 黄河河口生态保护目标及其生态需水研究. 水利科技与经济, 2009, 15(9): 792-795, 797.

[24] 巩骏骥. 黄河三角洲蒸散发变化及影响因素研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2015.

[25] 卓俊玲, 葛磊, 史雪廷. 黄河河口淡水湿地生态补水研究. 水生态学杂志, 2013, 34(2): 14-21.

[26] 袁瑞强, 刘贯群, 宋献方. 现代黄河三角洲浅层地下水对降水的响应. 资源科学, 2009, 31(9): 1514-1521.

[27] 李胜男, 王根绪, 邓伟, 胡远满. 水沙变化对黄河三角洲湿地景观格局演变的影响. 水科学进展, 2009, 20(3): 325-331.

[28] 杨志峰, 陈贺. 一种动态生态环境需水计算方法及其应用. 生态学报, 2006, 26(9): 2989-2995.

[29] 刘欢, 胡鹏, 王建华, 张璞, 杨泽凡, 曾庆慧. 中国河流分区分类生态基流占比阈值确定. 南水北调与水利科技: 中英文, 2022, 20(4): 748-756.

[30] Tennant D L. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. Fisheries, 1976, 1(4): 6-10.

[31] 易雨君, 徐嘉欣, 宋劼, 刘奇. 黄河河口区生态需水量及流量过程核算. 水资源保护, 2022, 38(1): 133-140.

[32] 李国英, 盛连喜. 黄河河口生态系统需水量分析. 东北师大学报: 自然科学版, 2011, 43(3): 138-144.

[33] 王新功, 徐志修, 黄锦辉, 王瑞玲, 娄广艳, 葛雷. 黄河河口淡水湿地生态需水研究. 人民黄河, 2007, 29(7): 33-35.

[34] 崔保山, 李英华, 杨志峰. 基于管理目标的黄河三角洲湿地生态需水量. 生态学报, 2005, 25(3): 606-614.

[35] 于守兵, 凡姚申, 余欣, 窦身堂. 黄河河口生态需水研究进展与展望. 水利学报, 2020, 51(9): 1101-1110.