



## 河北滨海湿地生态系统服务供需特征与情景分析

齐菲, 王丰, 刘斌, 付同刚, 高会, 刘金铜

### Supply and demand characteristics and scenario analysis of coastal wetland ecosystem services in Hebei Province

QI Fei, WANG Feng, LIU Bin, FU Tonggang, GAO Hui, and LIU Jintong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12357/cjea.20220941>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 华北平原农田生态系统服务评价及灌溉效益分析

Evaluation of agro-ecosystem services and analysis of irrigation benefit in the North China Plain

中国生态农业学报(中英文). 2017, 25(9): 1360-1370

#### 市域尺度两种生态系统服务评价方法对比研究

Comparative study on two evaluating methods of ecosystem services at city-scale

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(9): 1315-1323

#### 基于生物多样性和生态系统服务的生态农场景观设计

Preliminary study on landscape design of ecological farms based on biodiversity and ecosystem service

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(10): 1499-1508

#### 基于生态系统服务和PSO-SOFM神经网络的中亚水土热资源匹配分区

Regionalization of the matching degree of water, soil, and heat resources in Central Asia based on ecosystem services using PSO-SOFM neural network

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(2): 241-255

#### 生态系统服务权衡最新研究进展

Progress of research regarding the trade-offs of ecosystem services

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(10): 1509-1522

#### 耦合景观格局与生态系统服务的区域生态承载力评价

Evaluation of regional ecological carrying capacity coupling with landscape pattern and ecosystem services

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(5): 694-704



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.12357/cjea.20220941

齐菲, 王丰, 刘斌, 付同刚, 高会, 刘金铜. 河北滨海湿地生态系统服务供需特征与情景分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(7): 1133–1144

QI F, WANG F, LIU B, FU T G, GAO H, LIU J T. Supply and demand characteristics and scenario analysis of coastal wetland ecosystem services in Hebei Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023, 31(7): 1133–1144

## 河北滨海湿地生态系统服务供需特征与情景分析\*

齐菲<sup>1,2</sup>, 王丰<sup>1,2</sup>, 刘斌<sup>3</sup>, 付同刚<sup>1</sup>, 高会<sup>1</sup>, 刘金铜<sup>1\*\*</sup>

(1. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心/中国科学院农业水资源重点实验室/河北省土壤生态学重点实验室 石家庄 050022; 2. 中国科学院大学 北京 100049; 3. 山东省大数据局 济南 250011)

**摘要:** 滨海湿地处于海陆生态系统交错地带, 研究湿地面积变化带来的生态系统服务和人类福祉的变化, 可为湿地生态系统服务提升、近海岸生态环境保护与生态安全管理提供参考。本文通过分析河北滨海湿地面积变化, 对2000—2020年河北滨海湿地生态系统服务的供给量和社会对湿地生态系统服务需求量进行评估, 并以供需比定量分析了滨海湿地生态系统服务供需特征, 最后利用情景分析预测了2030年河北滨海湿地供需安全。结果表明: 1) 河北滨海湿地生态安全受到威胁, 主要表现为自然湿地面积和湿地生态廊道面积减少。2) 除水产品供给服务增加外, 河北滨海湿地的水资源供给、净化环境、调节洪水、固碳、释氧和美学景观等生态系统服务供给量均降低, 河北滨海区社会对湿地生态系统服务需求量均呈增加趋势。3) 河北滨海湿地面积仅占河北滨海区全域面积的6.3%, 但其提供的调节洪水服务可以满足河北滨海区全域对其需求。4) 河北滨海湿地调节洪水服务的生态安全状况较好, 水产品供给服务、水资源供给服务和净化环境服务是目前需要重点关注的生态安全问题, 是未来可能影响河北滨海湿地生态安全的隐患, 固碳、释氧和美学景观服务是未来河北滨海湿地生态安全发展中的短板。5) 情景分析下, 湿地严格保护情景下生态系统服务供给量和供需比最高, 是河北滨海湿地生态系统未来发展的最好情景模式。

**关键词:** 滨海湿地; 生态系统服务; 供需比; 情景分析; 生态安全

中图分类号: X24

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



## Supply and demand characteristics and scenario analysis of coastal wetland ecosystem services in Hebei Province\*

QI Fei<sup>1,2</sup>, WANG Feng<sup>1,2</sup>, LIU Bin<sup>3</sup>, FU Tonggang<sup>1</sup>, GAO Hui<sup>1</sup>, LIU Jintong<sup>1\*\*</sup>

(1. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences / Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Chinese Academy of Sciences / Hebei Key Laboratory of Soil Ecology, Shijiazhuang 050022, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Shandong Provincial Big Data Bureau, Jinan 250011, China)

**Abstract:** Coastal wetlands are located in ecotones of marine and terrestrial ecosystems. Studying the changes in ecosystem services and human well-being caused by wetland areas can provide a reference for improving wetland ecosystem services, protecting coastal ecological environments, and managing ecological security. This study analyzed the changes in the coastal wetland areas in the Hebei Province, evaluated the supply of ecosystem services and the social demand for wetland ecosystem services in Hebei Province from 2000 to 2020, and quantitatively analyzed the supply and demand characteristics of coastal wetland ecosystem services based on the supply and demand ratio. Finally, a scenario analysis was used to predict the supply and demand security of coastal wetlands in the

\* 河北省重点研发计划项目(20373304D, 22374202D)资助

\*\* 通信作者: 刘金铜, 主要从事生态系统可持续管理与生态工程研究。E-mail: jtliu@sjziam.ac.cn

齐菲, 主要从事生态系统服务研究。E-mail: qifei@sjziam.ac.cn

收稿日期: 2022-12-05 接受日期: 2023-03-01

\* The study was supported by the Key Research and Development Program of Hebei Province (20373304D, 22374202D).

\*\* Corresponding author, E-mail: jtliu@sjziam.ac.cn

Received Dec. 5, 2022; accepted Mar. 1, 2023

Hebei Province by 2030. The results show that: 1) the ecological security of coastal wetlands in Hebei is threatened, mainly manifested by a reduction in natural wetland areas and wetland ecological corridors. 2) In addition to the increase in aquatic product supply service, the supply of ecosystem services, such as the water resource supply, environmental purification, flood regulation, carbon sequestration, oxygen release, and aesthetic landscapes in the Hebei coastal wetlands, has decreased. The demand for wetland ecosystem services by society in the Hebei coastal area has increased. 3) Coastal wetlands in Hebei account for only 6.3% of the total coastal area. Nevertheless, the flood regulation services that they provide meet the needs of the entire coastal area in Hebei. 4) Good ecological security status of the flood regulation services is present in the Hebei coastal wetlands. Aquatic product supply, water resource supply, and environmental purification services are currently key ecological security issues that require focus and are potential hazards that may affect the future ecological security of the Hebei coastal wetlands. Carbon sequestration, oxygen release, and aesthetic landscape services are shortcomings in the future development of ecological security in the Hebei coastal wetlands. 5) Under the scenario analysis, the scenario of strict wetland protection has the highest supply and demand ratio of ecosystem services, which is the best scenario model for the future development of the coastal wetland ecosystem in Hebei.

**Keywords:** Coastal wetland; Ecosystem services; Supply demand ratio; Scenario analysis; Ecological safety

湿地是在水陆生态系统界面延伸重合的空间中形成的过渡类生态系统<sup>[1]</sup>,发挥着调节气候、蓄洪防旱、防治土壤侵蚀、过滤污染物等重要功效<sup>[2]</sup>。湿地被称为“地球之肾”,滨海湿地在涵养水资源、提供水产品、维护生态平衡等方面发挥了重要作用。湿地作为大自然赋予的一项宝贵的自然资源,具有极大的社会效益和生态效益。因此,社会各界和相关单位顺应国家和政府的相关政策,落实出台了多项湿地保护举措,近年来一系列重要湿地生态文明制度先后落地生根。2017年国家海洋局印发了《海岸线保护与利用管理办法》。2018年国务院印发了《关于加强滨海湿地保护严格管控围填海的通知》(国发〔2018〕24号),新时期对海洋生态文明建设提出了更高的要求。2022年6月1日,我国第一部湿地保护法《中华人民共和国湿地保护法》开始实施。

随着对湿地重要性认识的加深,湿地生态系统的服务价值越来越受到人们的重视。我国湿地生态系统服务功能价值评价工作的系统性研究始于20世纪90年代中期<sup>[3]</sup>。由于研究历史较短,目前还未形成关于湿地生态系统服务、功能和价值的统一认识<sup>[4]</sup>。

目前湿地生态系统服务需求和供需关系的量化评估均处于探索阶段<sup>[5]</sup>。湿地生态系统服务供需研究中存在的问题主要有以下几方面:第一,研究集中于湿地生态系统服务供给的评估,对于需求研究较少,对于人类需求的湿地生态系统服务功能的大小目前还没有有效的办法来衡量;第二,湿地生态系统服务价值评估研究主要针对单个湿地进行,没有以整个滨海湿地作为研究对象进行系统研究;第三,基于土地利用类型变化进行的湿地生态服务价值评估,忽视了湿地生态系统本身的动态变化特性,缺乏对

未来生态系统服务供需关系的预测研究。

滨海湿地是处于海陆交错区的“边缘地带”,是脆弱且具有珍贵资源的生态系统<sup>[6]</sup>。滨海湿地斑块通过生态廊道将不同湿地连接起来,组成更大的湿地生态系统网络,为湿地中的生物营造更广阔的生存活动空间<sup>[7]</sup>。当前滨海湿地生态系统服务已经开展了大量研究,如李楠等<sup>[8]</sup>、魏强等<sup>[9]</sup>、商慧敏等<sup>[10]</sup>分别探讨了不同地区的滨海湿地生态系统服务状况,程敏等<sup>[11]</sup>也论述了滨海湿地生态系统服务研究进展,但滨海地区与人类发展密切相关,滨海湿地生态系统服务供需研究几乎还是空白,有待人们进一步深入探讨。

河北滨海湿地生态系统服务功能可为实施京津冀协同发展战略方面提供重要的生态支撑。由于近年来人类活动加剧,导致滨海湿地出现了不同程度的退化和萎缩,湿地生态系统服务功能减弱,制约了区域可持续发展进程的推进和社会福祉的进一步提高。河北滨海湿地生态系统服务与社会需求关系研究是促进湿地生态系统保护、提高河北滨海区发展潜力的基础性研究工作,其供需动态评估和不同情景下供需安全预测,有利于决策者及时掌握服务动态变化及准确把握湿地生态系统服务与经济发展之间的平衡点。

本文通过分析滨海湿地面积变化,对2000—2020年河北滨海湿地生态系统服务的供给量和社会对湿地提供的生态系统服务功能的需求量进行评估,进一步从社会需求的角度定量分析滨海湿地生态系统服务功能的供需特征,预测了2030年不同情景下滨海湿地供需安全状况,以期为滨海湿地功能修复、湿地生态系统服务提升、近海岸生态环境保护与生态安全管理提供参考。

## 1 研究区概况

河北省海岸带位于 38°07'14"~40°01'37"N, 117°23'07"~119°57'02"E, 海岸线北与辽宁省接壤, 南至山东省边界 (除去中间天津市部分), 滨海平原为河流逐渐向海淤积而成, 地势平坦, 平均海拔小于 5 m, 沿渤海西岸呈半环状分布有秦皇岛、唐山和沧州 3 市。

河北滨海区属于大陆性季风气候, 具有明显的暖温带半湿润季风气候特征, 多年平均气温 12.2 °C, 多年平均降水量 573.5 mm。河北省沿海共有入海河流 52 条, 由滦河、冀东沿海诸河和南运河三大水系入海。河流入海口主要有洋河口、大蒲河口、滦河

口、小清河口、涧河口、南排河口、大口河口等。多年平均入海水量为 42.60 亿 m<sup>3</sup>, 入海沙量 1113.37 万 t。

河北省滨海湿地主要由自然湿地、人工湿地和以河流沟渠为主的湿地生态廊道组成, 自然湿地沿渤海西岸由北向南, 位于秦皇岛、唐山、沧州市区内呈半环状分布。考虑到滨海湿地的尺度、代表性、资料可获得性等, 选择唐秦海岸带丰南区、曹妃甸区、滦南县、乐亭县、北戴河区、山海关区、抚宁区、海港区内曹妃甸湿地、滦河口湿地、黄金海岸湿地和北戴河湿地等滨海湿地, 沧州海岸带海兴县、黄骅市境内的海兴湿地、南大港湿地和黄骅湿地等滨海湿地作为研究区 (图 1)。

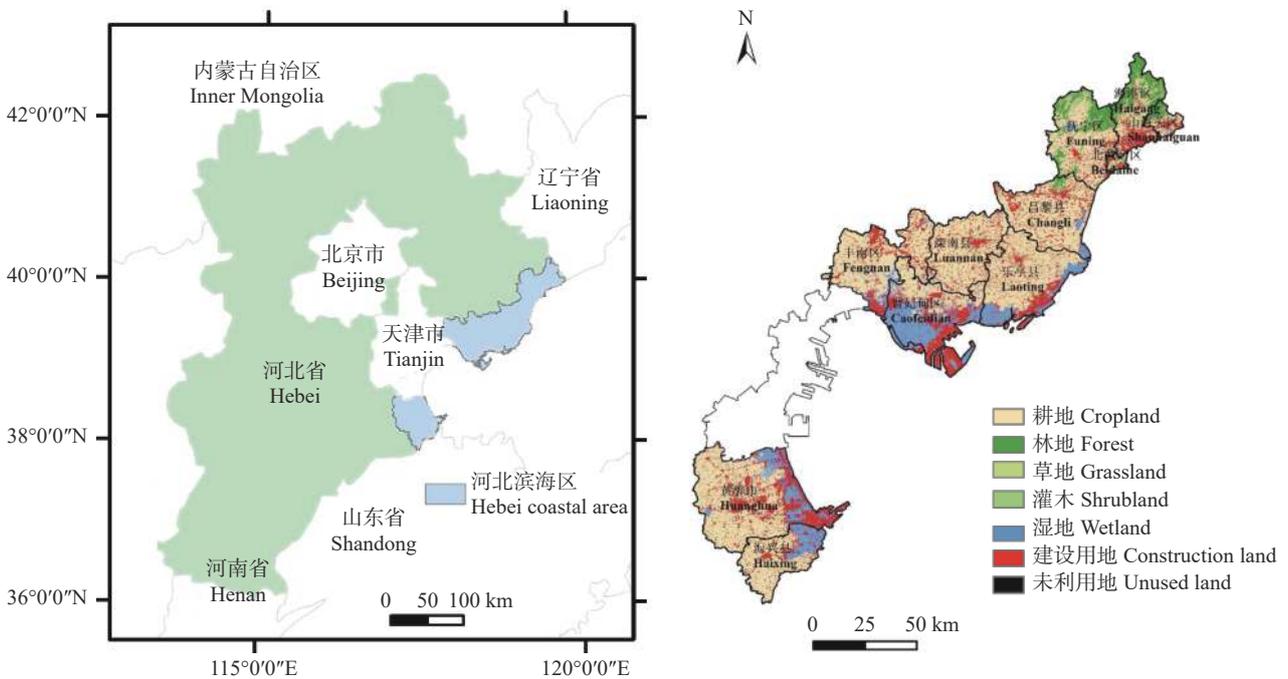


图 1 河北滨海区及其土地利用特征示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the location and land use types of the coastal district in Hebei Province

## 2 研究方法与数据来源

### 2.1 研究方法

#### 2.1.1 湿地生态系统服务供给量评估

基于河北滨海湿地面积进行生态系统服务供给的物质量和价值量评估, 评估方法参照当量法和 DB13\_T2784—2018 湿地生态系统服务评估规范<sup>[12]</sup>, 具体计算方法如表 1 所示。根据河北滨海湿地实际情况, 人工湿地主要以养殖水面为主, 人工湿地的水产品供给服务价值大于自然湿地, 自然湿地的调节服务、支持服务和文化服务大于人工湿地。湿地生态廊道具有过滤污染物、保护环境、调控洪水等多

种重要功能<sup>[13]</sup>, 生态廊道的净化水质和调节洪水功能大于人工湿地和其他自然湿地。

水产品供给服务、固碳服务和释氧服务的供给量评估采用物质量评估方法, 水资源供给服务、净化水质服务、调节洪水服务和美学景观服务的供给量评估采用价值量评估方法。

#### 2.1.2 湿地生态系统服务需求量估算

基于公式法计算河北滨海区域对湿地提供的各项生态系统服务的总需求量, 估算采用文献 [14-22] 中的方法, 估算参数来源于参考文献 [16-22]。具体评估方法如表 2 所示。

表 1 河北滨海湿地生态系统服务供给量评估方法  
Table 1 Evaluation methods of ecosystem service supply of Hebei coastal wetland ecosystem

| 生态系统服务<br>Ecosystem service         |   | 供给量计算方法<br>Supply quantity calculation method  | 评估法<br>Evaluation method           |
|-------------------------------------|---|--|------------------------------------|
| 供给服务<br>Provisioning service<br>(P) | 水产品供给<br>Aquatic products supply<br>(AP, $\times 10^4$ t) | 供给量=单位面积水产品供给量 $\times$ 湿地面积<br>Supply = supply of aquatic products per unit area $\times$ wetland area  | 物质量评估<br>Quality assessment        |
|                                     | 水资源供给<br>Water resource supply<br>(WR, $\times 10^8$ 元)   | 供给量=单位面积水资源供给服务价值 $\times$ 湿地面积<br>Supply = the value of water resources supply service per unit area $\times$ wetland area  | 价值量评估<br>Value quantity assessment |
| 调节服务<br>Regulating service<br>(R)   | 净化水质<br>Water purification<br>(PW, $\times 10^8$ 元)       | 供给量=单位面积净化水质服务价值 $\times$ 湿地面积<br>Supply = value of water purification service per unit area $\times$ wetland area   | 价值量评估<br>Value quantity assessment |
|                                     | 调节洪水<br>Flood regulation<br>(RF, $\times 10^8$ 元)         | 供给量=单位面积调节洪水价值 $\times$ 湿地面积<br>Supply = unit area adjusted flood value $\times$ wetland area  | 价值量评估<br>Value quantity assessment |
| 支持服务<br>Supporting service<br>(S)   | 固碳<br>Carbon fixation<br>(FC, $\times 10^4$ t)            | 供给量=1.63 $\times$ 湿地面积 $\times$ 二氧化碳中碳的含量 $\times$ 单位面积的净初级生产量<br>Supply = 1.63 $\times$ wetland area $\times$ carbon content in CO <sub>2</sub> $\times$ net primary productivity (NPP) per unit area | 物质量评估<br>Quality assessment        |
|                                     | 释氧<br>Oxygen release<br>(RO, $\times 10^4$ t)             | 供给量=1.19 $\times$ 湿地面积 $\times$ 单位面积的净初级生产量<br>Supply = 1.19 $\times$ wetland area $\times$ NPP per unit area  | 物质量评估<br>Quality assessment        |
| 文化服务<br>Cultural service<br>(C)     | 美学景观<br>Aesthetic landscape<br>(AL, $\times 10^8$ 元)      | 供给量=单位面积文化服务价值 $\times$ 湿地面积<br>Supply = value of cultural services per unit area $\times$ wetland area  | 价值量评估<br>Value quantity assessment |

表 2 河北滨海湿地生态系统服务需求量估算方法  
Table 2 Estimation method for service demand of Hebei coastal wetland ecosystem

| 生态系统服务<br>Ecosystem service         |   | 需求量估算方法<br>Demand estimation method  | 评估法<br>Evaluation method           |
|-------------------------------------|---|--|------------------------------------|
| 供给服务<br>Provisioning service<br>(P) | 水产品供给<br>Aquatic products supply (AP, $\times 10^4$ t)  | 需求量=人均水产品需求量 $\times$ 总人口<br>Demand = demand for aquatic products per capita $\times$ total population   | 物质量评估<br>Quality assessment        |
|                                     | 水资源供给<br>Water resource supply<br>(WR, $\times 10^8$ 元) | 需求量=人均用水量 $\times$ 总人口 $\times$ 水价<br>Demand = water consumption per capita $\times$ total population $\times$ water price                             | 价值量评估<br>Value quantity assessment |
| 调节服务<br>Regulating service<br>(R)   | 净化水质<br>Water purification<br>(PW, $\times 10^8$ 元)     | 需求量=人均生活用水量 $\times$ 总人口 $\times$ 净化水体价格<br>Demand = domestic water consumption per capita $\times$ total population $\times$ water purification price | 价值量评估<br>Value quantity assessment |
|                                     | 调节洪水<br>Flood regulation<br>(RF, $\times 10^8$ 元)       | 需求量=水利建设当年新增固定资产<br>Demand = new fixed assets in the water conservancy construction year   | 价值量评估<br>Value quantity assessment |
| 支持服务<br>Supporting service<br>(S)   | 固碳<br>Carbon fixation<br>(FC, $\times 10^4$ t)          | 需求量=人均碳需求 $\times$ 总人口<br>Demand = carbon demand per capita $\times$ total population  | 物质量评估<br>Quality assessment        |
|                                     | 释氧<br>Oxygen release<br>(RO, $\times 10^4$ t)           | 需求量=人均氧气需求 $\times$ 总人口<br>Demand = oxygen demand per capita $\times$ total population   | 物质量评估<br>Quality assessment        |
| 文化服务<br>Cultural service<br>(C)     | 美学景观<br>Aesthetic landscape<br>(AL, $\times 10^8$ 元)    | 需求量=人均旅游花费 $\times$ 总人口<br>Demand = travel cost per capita $\times$ total population   | 价值量评估<br>Value quantity assessment |

水产品供给服务、固碳服务和释氧服务的需求量评估采用物质量评估方法, 水资源供给服务、净化水质服务、调节洪水服务和美学景观服务的需求量评估采用价值量评估方法。

### 2.1.3 情景设定

情景分析是一种系统地、创造性地针对研究对象设置系列情景来思考未来的方法<sup>[23]</sup>。滨海区域长时间尺度土地利用变化具有显著的系统性、复杂性和不确定性, 因此, 情景分析是一种行之有效的研究方法。生态系统服务供给量情景设定本文重点参照

Chen 等<sup>[24]</sup>和姜彤等<sup>[25]</sup>的研究成果以及《全国湿地保护规划(2022—2030年)》, 通过模拟未来湿地面积变化, 构建 2030 年河北滨海区域未来发展情景, 共设置以下 3 种情景:

情景①: 湿地自然发展情景, 设定自然湿地面积减少速率不变。

情景②: 湿地合理开发情景, 设定自然湿地面积减少速率减少 50%。

情景③: 湿地严格保护情景, 《全国湿地保护规划(2022—2030年)》指出以滨海湿地生态系统结构

恢复和服务功能提升为主攻方向,设定修复2000—2020年退化的湿地,自然湿地面积恢复40%,湿地生态系统服务供给量提高20%。

生态系统服务需求量情景设定本文重点参照第七次全国人口普查主要数据,人口年平均增长率为0.53%,通过模拟未来人口变化,模拟2030年河北滨海区湿地生态系统服务需求量。

## 2.2 数据来源与处理

### 2.2.1 湿地面积

自然湿地土地利用数据:利用GlobeLand30的2000年和2020年全球30 m地表覆盖数据。

人工湿地土地利用数据:利用已有研究成果《河北省滨海湿地退化及生态修复技术集成与应用研究报告》<sup>[26]</sup>,并对遥感数据进行处理,包括卫星遥感数据的检查、正射校正、数据配准、融合、图像增强、数据匀色、镶嵌、裁剪、质量检查等流程。

湿地生态廊道数据:河流是重要的生态廊道之一,起着传送物质、能量与信息的重要作用<sup>[27-28]</sup>,与内陆湿地不同的是,滨海湿地通过河流生态廊道近距离连通近岸海域,极大地影响了滩涂和海域的生态环境和水体质量,甚至影响了近海水生生物的生存与生态安全。因此,考虑数据可获取性,本研究以河流水面作为滨海湿地河流生态廊道,重点研究滨海湿地生态廊道在滨海湿地的作用。

### 2.2.2 社会与统计数据

研究区行政边界数据来源于中国科学院地理科学与资源研究所资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>)。

历史时期人口、人均水资源需求、人均水产品需求、水利投资、碳排放量等社会经济数据来源于《河北统计年鉴》《中国环境统计年鉴》《中国水利统计年鉴》、中国水利统计公报及文献资料等。

## 3 结果与分析

### 3.1 河北滨海湿地面积变化

2000年和2020年河北滨海湿地面积变化如表3所示。其中唐秦滨海湿地两年间始终为人工湿地面积最大,人工湿地面积呈增加趋势,自然湿地面积减少,主要是曹妃甸工业区旅游业和工业发展侵占了海岸带,挤压了滨海湿地的存在空间<sup>[27]</sup>;唐秦滨海湿地生态廊道面积增加,说明唐秦滨海湿地间连通性增加。在沧州滨海湿地2000年自然湿地面积大于人工湿地面积,2020年变为人工湿地面积大于自然湿地面积,主要是因为近年来人类活动加剧,大量河流水面被开发利用成盐田和养殖水面,导致河流水面面积逐年减少<sup>[26]</sup>;同时沧州滨海湿地生态廊道面积减少,说明沧州滨海湿地生态廊道受到了人类干扰,湿地间连通性降低。

表3 2000年和2020年河北滨海湿地面积  
Table 3 Areas of Hebei coastal wetland in 2000 and 2020

|   |                                    | km <sup>2</sup> |        |
|---|------------------------------------|-----------------|--------|
| 滨海地区<br>Coastal region                                  | 滨海湿地类型<br>Coastal wetland type     | 2000            | 2020   |
| 唐秦滨海湿地<br>Tangshan and Qinhuangdao Coastal Wetland (TQ) | 自然湿地 Natural wetland               | 105.60          | 28.81  |
|   | 人工湿地 Constructed wetland           | 112.24          | 182.41 |
|   | 湿地生态廊道 Wetland ecological corridor | 5.27            | 7.73   |
|   | 湿地总面积 Total wetland area           | 217.84          | 211.22 |
| 沧州滨海湿地<br>Cangzhou Coastal Wetland (CZ)                 | 自然湿地 Natural wetland               | 144.71          | 99.56  |
|   | 人工湿地 Constructed wetland           | 127.44          | 170.81 |
|   | 湿地生态廊道 Wetland ecological corridor | 6.47            | 3.40   |
|   | 湿地总面积 Total wetland area           | 272.15          | 270.37 |

面积可以作为湿地退化的重要标准。从生态廊道面积来看,生态廊道总面积减少,生态廊道是连接不同生态源地之间的重要通道,是生物进行迁移扩散的主要路径,湿地生态廊道面积的减少会导致湿地生境破碎化程度不断提高,甚至会导致生境斑块消失,使得滨海湿地生态系统功能日益衰退<sup>[28]</sup>。

### 3.2 湿地生态系统服务供给量评估

基于解译的湿地面积计算了2000年和2020年河北滨海湿地生态系统服务供给量变化率以及不同湿地类型、不同生态系统服务类型和不同区域的生

态生态系统服务供给量。

从整个河北滨海湿地的生态系统服务供给量来看(图2),2000—2020年除水产品供给服务增加外,其他生态系统服务供给均呈降低趋势,水产品供给增加8.05%,增加0.22万t。其他生态系统服务供给降低11.10%~22.30%。这主要是由于人工湿地面积增加、自然湿地面积减少,人类活动加剧使部分自然湿地被开发利用成为养殖用地。

从不同湿地类型的不同生态系统服务的供给量来看(图3),河北省滨海人工湿地的生态系统服务价值高

于自然湿地,这主要是由于人工湿地比自然湿地面积大所致。

从不同生态系统服务类型来看(图3),价值量评估中调节服务的调节洪水服务是滨海湿地生态系统服务中价值最高的服务,湿地作为蓄水库具有较高的调节洪水能力;物质量评估中固碳服务和释氧服务是河北滨海湿地生态系统服务中供给量最多的服务,湿地由于厌氧环境容易导致有机质不充分分解,湿地土壤中积累大量碳成为“碳汇”,因此湿地碳固定量也较高<sup>[29]</sup>。

从不同区域的生态系统服务供给量来看(图4),沧州滨海湿地的生态系统服务供给量大于唐秦滨海湿地的生态系统服务供给量,特别是调节服务中的调节洪水和支持服务中的释氧服务,主要由于沧州滨海湿地比唐秦滨海湿地面积大。

总体来看,河北滨海湿地生态系统具有供给、调节、支持、文化等多种生态系统服务功能,不但能够提供丰富的水产品和清洁的水资源,而且具备抵御自然洪涝灾害、固碳释氧和促进湿地生态旅游发展等得天独厚的优势条件,因此,对于社会福祉诸多方面的改善和提高均发挥着不可替代的作用<sup>[30-32]</sup>。根据英国《自然》杂志公布的研究成果全球生态系统价值为33万亿美元,其中只占地球表面积6%的湿地却提供了全球生态系统服务价值的45%,高达14.9万亿美元<sup>[33]</sup>,可见滨海湿地提供的生态系统服务不可替代。

### 3.3 湿地生态系统服务需求评估

河北滨海湿地生态系统服务的受益人数越多,对湿地生态系统服务的需求也会随之增长。基于河

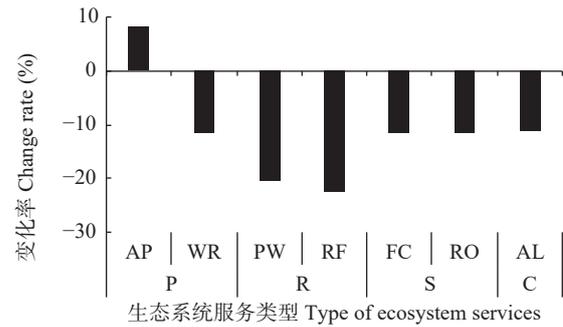


图2 2000—2020年河北滨海湿地生态系统服务供给量变化率

Fig. 2 Change rates of ecosystem service supply of Hebei coastal wetland ecosystem from 2000 to 2020

P、R、S和C分别为供给服务、调节服务、支持服务、文化服务;AP、WR、PW、RF、FC、RO和AL分别为水产品供给、水资源供给、净化水质、调节洪水、固碳、释氧和美学景观。P、R、S和C are provisioning service, regulating service, supporting service and cultural service; AP, WR, PW, RF, FC, RO and AL are aquatic product supply, water resource supply, water purification, flood regulation, carbon fixation, oxygen release and aesthetic landscape.

北滨海区各地市人口数量和人均需求计算出2000年和2020年河北滨海区社会对湿地生态系统服务的需求增加率、不同区域生态系统服务需求供需比。

从整个河北滨海湿地的生态系统服务需求量增加率来看(图5),2000年到2020年河北滨海区社会对湿地提供的不同生态系统服务的需求量均呈增加趋势,其中对水产品供给服务的需求增长350.53%,增加3.33万t。近年来受极端天气的影响,河北滨海区对调节洪水服务的需求也大幅增加,2020年比2000年增加418.64%。

从不同生态系统服务类型来看(图6),价值量评估中文化服务中的美学景观服务是河北滨海区社会

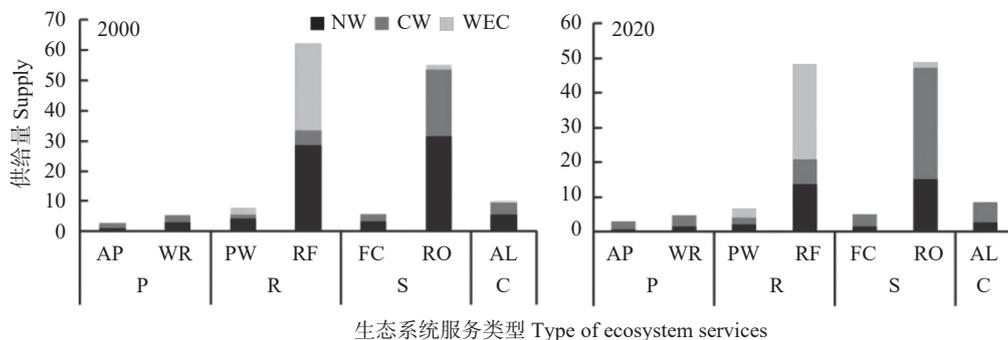


图3 2000年和2020年河北滨海湿地不同湿地类型的不同生态系统服务的供给量

Fig. 3 Supply of different ecosystem services for different wetland types in Hebei coastal wetland in 2000 and 2020

P、R、S和C分别为供给服务、调节服务、支持服务和文化服务;AP、WR、PW、RF、FC、RO和AL分别为水产品供给( $\times 10^4$  t)、水资源供给( $\times 10^8$  ¥)、净化水质( $\times 10^8$  ¥)、调节洪水( $\times 10^8$  ¥)、固碳( $\times 10^4$  t)、释氧( $\times 10^4$  t)和美学景观( $\times 10^8$  ¥)。NW为自然湿地,CW为人工湿地,WEC为湿地生态廊道。P、R、S和C are provisioning service, regulating service, supporting service, and cultural service; AP, WR, PW, RF, FC, RO and AL are aquatic product supply ( $\times 10^4$  t), water resource supply ( $\times 10^8$  ¥), water purification ( $\times 10^8$  ¥), flood regulation ( $\times 10^8$  ¥), carbon fixation ( $\times 10^4$  t), oxygen release ( $\times 10^4$  t) and aesthetic landscape ( $\times 10^8$  ¥). NW is natural wetland, CW is constructed wetland, and WEC is wetland ecological corridor.

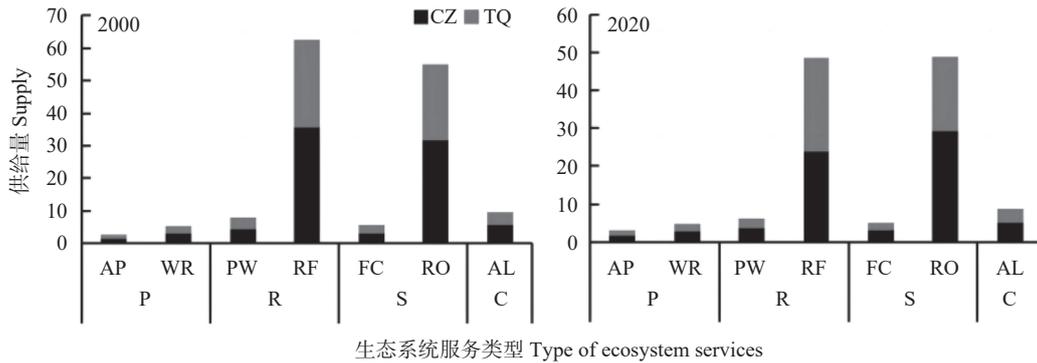


图 4 2000 年和 2020 年河北滨海湿地不同区域的生态系统服务供给量

Fig. 4 Supply of ecosystem services in different regions of Hebei coastal wetland in 2000 and 2020

P、R、S 和 C 分别为供给服务、调节服务、支持服务和文化服务; AP、WR、PW、RF、FC、RO 和 AL 分别为水产品供给 ( $\times 10^4$  t)、水资源供给 ( $\times 10^8$  元)、净化水质 ( $\times 10^8$  元)、调节洪水 ( $\times 10^8$  元)、固碳 ( $\times 10^4$  t)、释氧 ( $\times 10^4$  t) 和美学景观 ( $\times 10^8$  元)。CZ 为沧州滨海湿地, TQ 为唐秦滨海湿地。P, R, S and C are provisioning service, regulating service, supporting service, and cultural service; AP, WR, PW, RF, FC, RO and AL are aquatic product supply ( $\times 10^4$  t), water resource supply ( $\times 10^8$  元), water purification ( $\times 10^8$  元), flood regulation ( $\times 10^8$  元), carbon fixation ( $\times 10^4$  t), oxygen release ( $\times 10^4$  t) and aesthetic landscape ( $\times 10^8$  元)。CZ is Cangzhou Coastal Wetland, and TQ is Tangshan and Qinhuangdao Coastal Wetland.

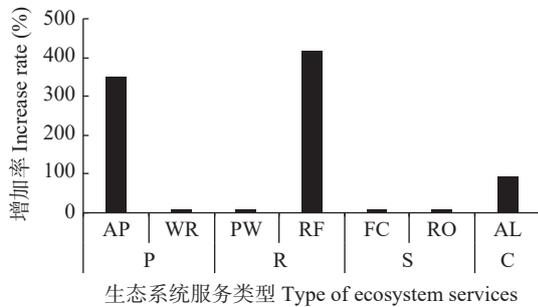


图 5 2000—2020 年河北滨海湿地生态系统服务需求量增加率

Fig. 5 Increase rates of service demand of Hebei coastal wetland ecosystem from 2000 to 2020

P、R、S 和 C 分别为供给服务、调节服务、支持服务、文化服务; AP、WR、PW、RF、FC、RO 和 AL 分别为水产品供给、水资源供给、净化水质、调节洪水、固碳、释氧和美学景观。P, R, S and C are provisioning service, regulating service, supporting service and cultural service; AP, WR, PW, RF, FC, RO and AL are aquatic product supply, water resource supply, water purification, flood regulation, carbon fixation, oxygen release and aesthetic landscape.

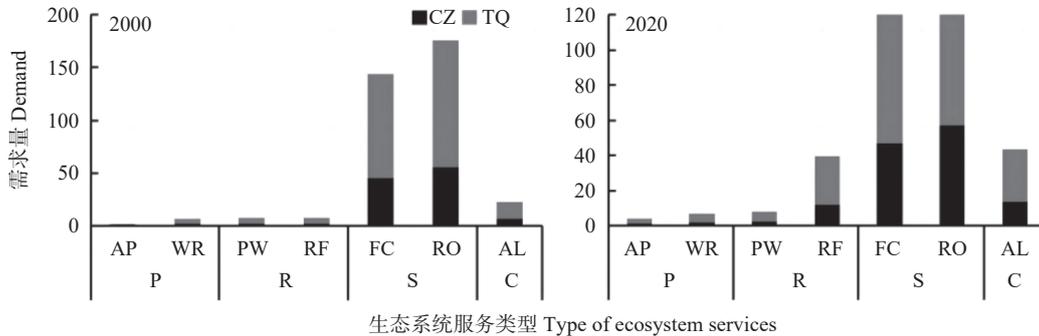


图 6 2000 年和 2020 年河北滨海湿地不同区域的生态系统服务需求量

Fig. 6 Demands for ecosystem services in different regions of Hebei coastal wetland in 2000 and 2020

P、R、S 和 C 分别为供给服务、调节服务、支持服务和文化服务; AP、WR、PW、RF、FC、RO 和 AL 分别为水产品供给 ( $\times 10^4$  t)、水资源供给 ( $\times 10^8$  元)、净化水质 ( $\times 10^8$  元)、调节洪水 ( $\times 10^8$  元)、固碳 ( $\times 10^4$  t)、释氧 ( $\times 10^4$  t) 和美学景观 ( $\times 10^8$  元)。CZ 为沧州滨海湿地, TQ 为唐秦滨海湿地。P, R, S and C are provisioning service, regulating service, supporting service and cultural service; AP, WR, PW, RF, FC, RO and AL are aquatic product supply ( $\times 10^4$  t), water resource supply ( $\times 10^8$  元), water purification ( $\times 10^8$  元), flood regulation ( $\times 10^8$  元), carbon fixation ( $\times 10^4$  t), oxygen release ( $\times 10^4$  t) and aesthetic landscape ( $\times 10^8$  元)。CZ is Cangzhou Coastal Wetland, and TQ is Tangshan and Qinhuangdao Coastal Wetland.

需求最高的服务, 湿地包含着的丰富的自然景观和历史文化遗产, 具有科学研究及教育价值和旅游价值; 物质量评估中支持服务中的释氧服务和固碳服务是河北滨海区湿地提供的生态系统服务中需求量最高的服务。

从不同区域的生态系统服务需求量来看 (图 6), 唐秦滨海区对湿地提供的各项生态系统服务的需求大于沧州滨海区。

### 3.4 生态系统服务供需特征

生态系统服务供需比是供给量与需求量的比值, 反映了生态系统服务的供需安全状况, 基于计算的河北滨海湿地生态系统服务供给量和河北滨海区社会对湿地提供的各项服务的需求量计算得出 2000 年和 2020 年河北滨海湿地生态系统服务的不同类型和不同区域供需比。

从整个河北滨海湿地的生态系统服务需求比来看(图 7), 2000 年到 2020 年河北滨海生态系统服务供需比呈明显降低趋势, 其中水产品供给服务和调节洪水的供需比降低最多。2000 年, 水产品供给、净化水质和调节洪水 3 种服务的供需比均>1, 说明河北滨海湿地提供的这 3 种服务可以满足河北滨海区全社会的需求。2020 年, 只有调节洪水服务的供需比大于 1。

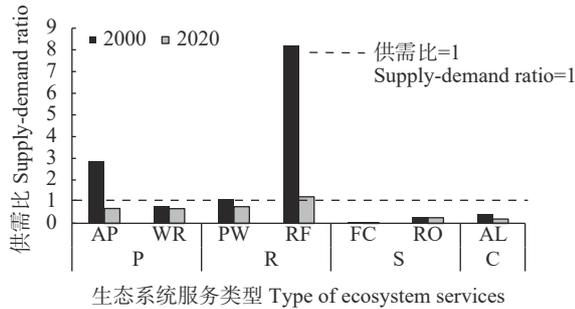


图 7 2000 年和 2020 年河北滨海湿地生态系统服务供需比

Fig. 7 Supply-demand ratios of Hebei coastal wetland ecosystem services in 2000 and 2020

P、R、S 和 C 分别为供给服务、调节服务、支持服务、文化服务; AP、WR、PW、RF、FC、RO 和 AL 分别为水产品供给、水资源供给、净化水质、调节洪水、固碳、释氧和美学景观。P、R、S 和 C are provisioning service, regulating service, supporting service and cultural service; AP, WR, PW, RF, FC, RO and AL are aquatic product supply, water resource supply, water purification, flood regulation, carbon fixation, oxygen release and aesthetic landscape.

从不同生态系统服务类型来看(图 7), 2000 年价值量评估中调节服务的调节洪水服务是河北滨海湿地供需比最高的服务, 物质量评估中供给服务中的水产品供给是供需比最高的服务。河北滨海湿地可提供社会总需求 2.85 倍的水产品供给服务、1.02 倍的净化水质服务和 8.19 倍的调节洪水服务。2020 年, 物质量评估中供给服务中的水产品供给提供了社会总需求 68.43% 的水产品供给服务, 调节服务中的调节洪水服务的供需比最高, 是社会总需求的 1.23 倍。可见, 随着河北滨海湿地的退化, 能提供的生态系统服务在满足河北滨海全域人类社会总需求的基础上, 各服务类型的供需余量显著降低。

从不同区域的生态系统服务供需比来看(图 8), 沧州滨海区湿地的供需比稍大于唐秦滨海区, 说明沧州滨海湿地供需安全状况与唐秦滨海湿地相比较好。

### 3.5 不同情景下生态系统服务供需预测

运用情景假设并参照第七次全国人口普查主要数据, 得到 2030 年 3 个情景下河北滨海湿地生态系统服务供给量(图 9a)、需求量(图 9b)和供需比

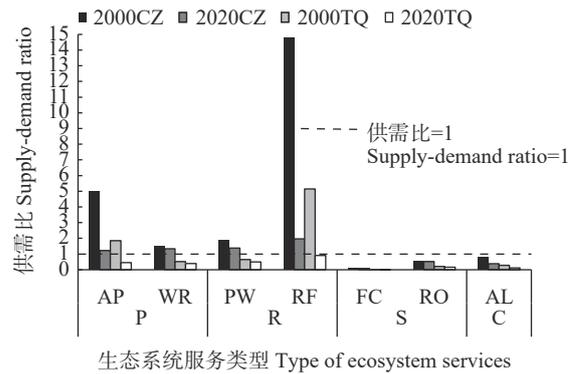


图 8 2000 年和 2020 年河北滨海湿地不同区域的生态系统服务供需比

Fig. 8 Supply-demand ratios of ecosystem services in different regions of Hebei coastal wetland in 2000 and 2020

P、R、S 和 C 分别为供给服务、调节服务、支持服务、文化服务; AP、WR、PW、RF、FC、RO 和 AL 分别为水产品供给、水资源供给、净化水质、调节洪水、固碳、释氧和美学景观。CZ 为沧州滨海湿地, TQ 为唐秦滨海湿地。P、R、S 和 C are provisioning service, regulating service, supporting service and cultural service; AP, WR, PW, RF, FC, RO and AL are aquatic product supply, water resource supply, water purification, flood regulation, carbon fixation, oxygen release and aesthetic landscape. CZ is Cangzhou Coastal Wetland, and TQ is Tangshan and Qinhuangdao Coastal Wetland.

(图 9c) 预测结果。

情景①为湿地自然发展情景, 设定湿地面积降低速率不变, 即河北滨海湿地会保持 2000—2020 年的退化速率, 湿地面积会持续减少。

情景②为湿地合理开发情景, 设定湿地面积降低速率减少 50%, 即降低河北滨海湿地的退化速率, 合理开发湿地, 集中发展养殖业, 能有效促进滨海湿地保护与修复, 从整个河北滨海湿地生态系统服务供需比来看, 情景②的供需比略大于情景①。

情景③为湿地严格保护情景, 即根据《全国湿地保护规划(2022—2030 年)》规划目标, 科学修复退化湿地, 提高湿地的生态系统服务功能。在湿地保护下, 河北滨海湿地空间分布由破碎化向恢复和扩大的趋势发展, 情景③的生态系统服务供需比大于情景①和情景②。

在自然发展情景(情景①)下, 湿地会延续以往的减少趋势, 相比之下, 如果根据湿地合理开发情景(情景②), 湿地面积的降低速率会放缓, 但仍不能避免湿地面积的减少, 无论情景①还是情景②, 湿地面积将会越来越少, 而河北滨海湿地已面临的生态安全问题将会得到放大。从供需比的变化不难看出, 随着湿地保护规划的贯彻实施(情景③), 退化的湿地得到恢复, 湿地面积将增加, 河北滨海湿地生态安全格局将趋于稳定。

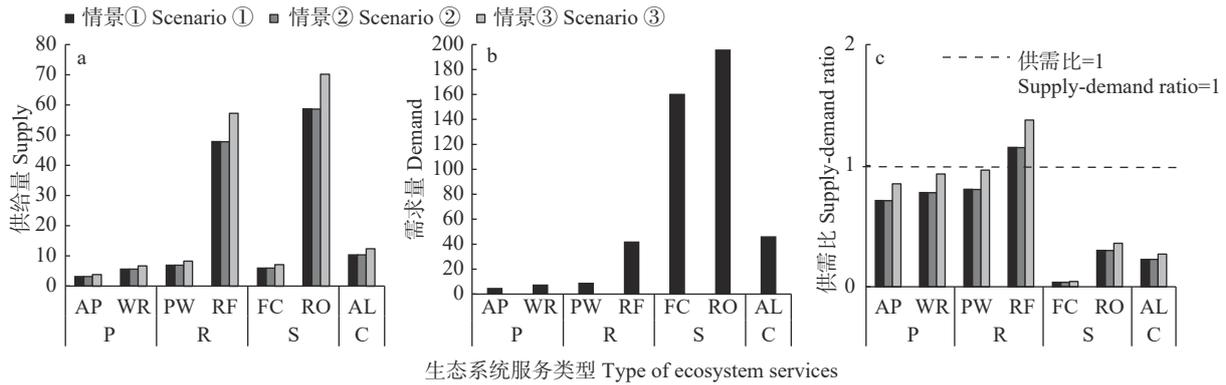


图9 河北滨海湿地不同情景下生态系统服务供给量(a)、需求量(b)及供需比(c)预测

Fig. 9 Forecast of ecosystem service supply (a), demand (b) and supply and demand ratio (c) under different scenarios of Hebei coastal wetland

P、R、S和C分别为供给服务、调节服务、支持服务、文化服务;AP、WR、PW、RF、FC、RO和AL分别为水产品供给、水资源供给、净化水质、调节洪水、固碳、释氧和美学景观。情景①为湿地自然发展情景,情景②为湿地合理开发情景,情景③为湿地严格保护情景。P、R、S and C are provisioning service, regulating service, supporting service and cultural service; AP, WR, PW, RF, FC, RO and AL are aquatic product supply, water resource supply, water purification, flood regulation, carbon fixation, oxygen release and aesthetic landscape. Scenario ① refers to the natural development of wetlands; Scenario ② refers to the reasonable development of wetlands, and Scenario ③ refers to the strict protection of wetlands.

综上所述,情景③的模拟效果总体最好,是河北滨海湿地生态系统未来发展最好的情景模式。

## 4 讨论

### 4.1 滨海湿地生态系统服务供需安全格局需要得到重视

生态安全指生态系统在面临威胁时保持结构、过程和功能完整性的能力,高质量的生态系统服务供给和供给满足人们需求后具有余量是保障生态安全的前提<sup>[34]</sup>。目前全球范围的湿地生态系统几乎都经历了极大程度的退化或消失,《千年生态系统评估报告》指出,全球湿地20世纪的退化率已超过50%<sup>[35]</sup>,有研究表明美国54%的湿地几乎全部转化为农业用地<sup>[36]</sup>;西班牙60%的天然湿地在1948—1990年间退化消失<sup>[37]</sup>;法国63%的天然湿地在1900—1993年间消失<sup>[38]</sup>。伴随着全世界湿地资源的退化与消失,对湿地生态系统服务需求量的迅速增加,湿地生态安全正遭遇巨大危机,湿地生态安全格局分析迫在眉睫。

本文基于河北滨海湿地生态廊道面积变化和生态系统服务供需比变化分析了湿地生态系统服务供需特征,研究表明人类对湿地生态系统的干预已经导致河北滨海湿地出现了潜在生态危机。从面积变化来看,在2000—2020年,河北滨海湿地人工湿地面积显著增加、自然湿地面积和生态廊道面积减少。从生态系统服务供需比来看,调节洪水服务供需比最高,调节洪水服务是目前暂时无需考虑的生态安全问题;河北滨海湿地面积仅占河北滨海区全域面

积的6.3%,而水产品供给服务、水资源供给服务和净化水质服务均提供社会总需求量的60%以上,是目前需要重点关注的生态安全问题,是未来可能影响区域生态安全的隐患;固碳、释氧和美学景观服务的供需比都较低,是未来生态安全发展中的短板。

已有研究表明,人口与社会经济活动等人为干扰是影响湿地生态安全的关键驱动力<sup>[39-40]</sup>,与人为活动相比,自然因素对湿地生态系统影响相对较小<sup>[39,41]</sup>。如海南岛湿地水产养殖事业发展、城市化扩张迅速,已经给湿地景观生态安全带来负面影响<sup>[42]</sup>。在宏观管理层面,我国第一部湿地保护法《中华人民共和国湿地保护法》已开始实施,同时《全国湿地保护规划(2022—2030年)》等湿地相关规划已出台,为今后湿地保护和管理提供强有力的法治保障,可以维护和强化区域生态空间格局的连续性和完整性,以最大限度发挥湿地生态功能。

### 4.2 不同情景下湿地生态保护与社会经济发展之间的权衡

中国湿地面积占世界湿地的10%,位于亚洲第1位,世界第4位<sup>[43]</sup>,然而我国人均湿地面积却不到世界人均湿地面积的1/5。量化湿地生态系统服务与社会需求之间的关系能够清晰表达湿地资源的生态价值,而且还能展现湿地资源可提供的社会经济效益。本文研究结果表明,河北滨海自然湿地面积减少,滨海经济发展与生态环境保护之间的矛盾进一步凸显,在目前湿地大规模退化和亟待保护的背景下,如何权衡生态效益和经济效益关系是当前面

临且急需解决的科学问题,基于此本研究利用情景分析进行了探讨。

湿地资源的过度开发以及利用方式改变通常是由于忽略了其提供的间接生态系统服务。本研究的优势在于,不仅考虑到各情景下生态系统服务功能的变化,同时也考虑各情景人类实际需求的变化,如果片面追求生态系统服务价值的最大化,这样的发展模式很难实现区域经济与环境的协调发展。利用情景分析法分析未来生态系统服务供需比,可以得到一个综合效益较优的解决方案,从而实现不同发展目标的土地利用方式及滨海湿地发展方向。

与其他方案相比,基于确定的最优情景假设方案湿地面积的增加可以满足滨海生态安全的需要,这也是该方案中湿地保护的趋向性决定的,但同时人工湿地和建设用地的发 展会为滨海生态环境保护做出一定的让步,但若优化产业结构、加快产业升级<sup>[27]</sup>,从湿地生态系统中寻求弹性较大、适应能力较强的生态经济发展模式不但能够加强地区经济发展与生态环境之间的协调性,而且也能够显著提高地区发展潜力和竞争优势。因此,走以自然的解决方案为指导的经济发展道路是河北滨海实现可持续发展的必然选择。

### 4.3 研究不足

本研究也存在一定的局限性,主要表现在以下方面:

1) 限于数据的精度和可获得性,本文选取 2000 年和 2020 年 2 期截面数据对河北省滨海湿地生态系统服务供需情况进行了分析,后续研究可考虑借助卫星遥感影像进行连续年份分析,以提高研究结果的准确性与可行性。

2) 由于国内外目前对于湿地的分类和湿地生态廊道的定义还没有统一的标准与方案,本研究并没有对河北滨海湿地进行细分,且只考虑了河流廊道这一种湿地生态廊道,会对本研究的结果造成一定误差。

3) 本研究中虽对生态系统服务供需安全格局进行了量化分析,但其背后的作用机制与影响因素还有待深入研究,以更好地指导河北滨海湿地的生态安全管理。

## 5 结论

本文通过对 2000 年和 2020 年河北滨海湿地生态系统服务的供给量和社会对湿地提供的生态系统服务功能的需求量进行评估的基础上,以供需比从社会需求的角度定量分析了河北滨海湿地生态系统

服务功能的供需关系,并利用情景分析预测了未来供需状况。主要得到以下结论:

1) 2000 年到 2020 年,河北滨海湿地面积呈退化趋势,主要表现为自然湿地面积和湿地生态廊道面积减少。

2) 2000 年到 2020 年,除水产品供给服务增加外,河北滨海湿地的水资源供给、净化环境、调节洪水、固碳、释氧和美学景观等生态系统服务供给量均减少,河北滨海区社会对湿地提供的不同生态系统服务的需求均呈增加趋势。

3) 河北滨海湿地面积仅占河北滨海区全域面积的 6.3%,但其提供的调节洪水服务可以满足河北滨海区全域对这种服务的需求。

4) 不同情景下,湿地严格保护情景的生态系统服务供给量和供需比最高,是河北滨海湿地生态系统未来发展的最好情景模式。

5) 调节洪水服务是目前河北滨海湿地暂时无需考虑的生态安全问题;水产品供给服务、水资源供给服务和净化水质服务是目前需要重点关注的生态安全问题,是未来可能影响研究区生态安全的隐患;固碳、释氧和美学景观服务是未来研究区生态安全发展中的短板。

河北滨海湿地生态廊道面积减少、生态系统服务供需比降低,湿地的退化使河北滨海地区整体生态系统服务水平呈降低趋势,随着社会经济的发展,河北滨海湿地生态安全受到严重威胁,根据本文评估结果的分析,可以采取以下应对措施:

1) 严格遵循《全国湿地保护规划(2022—2030 年)》。坚持保护优先、自然恢复为主。实行最严格的湿地保护制度,严守生态保护红线。

2) 提高生态系统服务质量。要在有限的面积上创造更多的服务,需要通过提高和恢复生态系统的健康状况,除自然恢复外,人工干扰可加快生态恢复进程,如改善土壤盐渍化、实施植被恢复工程等。

## 参考文献 References

- [1] 杨会利. 河北省典型滨海湿地演变与退化状况研究[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2008  
YANG H L. The study of the evolution and degradation of the typical coastal wetland in Hebei Province[D]. Shijiazhuang: Hebei Normal University, 2008
- [2] 杨永兴. 国际湿地科学研究的主要特点、进展与展望[J]. 地理科学进展, 2002, 21(2): 111-120  
YANG Y X. Main characteristics, progress and prospect of international wetland science research[J]. Progress in Geography, 2002, 21(2): 111-120

- [3] 刘晓辉, 吕宪国, 姜明, 等. 湿地生态系统服务功能的价值评估[J]. *生态学报*, 2008, 28(11): 5625-5631  
LIU X H, LYU X G, JIANG M, et al. Research on the valuation of wetland ecosystem services[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(11): 5625-5631
- [4] 傅娇艳, 丁振华. 湿地生态系统服务、功能和价值评价研究进展[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(3): 681-686  
FU J Y, DING Z H. Research progress on wetland ecosystem service and its valuation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(3): 681-686
- [5] 杨丽雯, 王大勇, 李双成. 生态系统文化服务供需关系量化方法研究——以平陆大天鹅景区为例[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2021, 57(4): 691-698  
YANG L W, WANG D Y, LI S C. Quantitative assessment on supply-demand budget of culture ecosystem service: a case study in Pinglu Swan Scenic Spot[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2021, 57(4): 691-698
- [6] 贺芳丁. 山东省湿地演变与生态修复规划研究[D]. 济南: 山东大学, 2006  
HE F D. Research for the evolvement and repair programming of the wetland[D]. Jinan: Shandong University, 2006
- [7] 姜明, 武海涛, 吕宪国, 等. 湿地生态廊道设计的理论、模式及实践——以三江平原浓江河湿地生态廊道为例[J]. *湿地科学*, 2009, 7(2): 99-105  
JIANG M, WU H T, LYU X G, et al. Theory, mode and practice for the design of wetland ecological corridor — A case of Nongjiang River wetland ecological corridor, the Sanjiang Plain[J]. *Wetland Science*, 2009, 7(2): 99-105
- [8] 李楠, 李龙伟, 张银龙, 等. 杭州湾滨海湿地生态系统服务价值变化[J]. *浙江农林大学学报*, 2019, 36(1): 118-129  
LI N, LI L W, ZHANG Y L, et al. Changes of ecosystem services value of Hangzhou Bay Coastal Wetland[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2019, 36(1): 118-129
- [9] 魏强, 席增雷, 苏寒云, 等. 曹妃甸滨海湿地生态系统支持服务价值空间分异研究[J]. *地理科学*, 2021, 41(5): 890-899  
WEI Q, XI Z L, SU H Y, et al. Spatial differentiation of supporting service value of coastal wetland ecosystem in the Caofeidian District of Tangshan in Hebei Province[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2021, 41(5): 890-899
- [10] 商慧敏, 郝敏, 李悦, 等. 胶州湾滨海湿地生态系统服务价值变化[J]. *生态学报*, 2018, 38(2): 421-431  
SHANG H M, XI M, LI Y, et al. Evaluation of changes in the ecosystem services of Jiaozhou Bay coastal wetland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(2): 421-431
- [11] 程敏, 张丽云, 崔丽娟, 等. 滨海湿地生态系统服务及其价值评估研究进展[J]. *生态学报*, 2016, 36(23): 7509-7518  
CHENG M, ZHANG L Y, CUI L J, et al. Progress in ecosystem services value valuation of coastal wetlands[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(23): 7509-7518
- [12] 河北省市场监督管理局. DB13/T 2784—2018湿地生态系统服务评估规范[S]. 石家庄: 河北标准出版社, 2018  
Hebei Provincial Market Supervision and Administration Bureau. DB13/T 2784—2018 Wetland Ecosystem Service Evaluation Specification[S]. Shijiazhuang: Hebei Standards Publishing House, 2018
- [13] WU J. Hierarchy and scaling: extrapolating information along a scaling ladder[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 1999, 25(4): 367-380
- [14] 王文美, 吴璇, 李洪远. 滨海新区生态系统服务功能供需量化研究[J]. *生态科学*, 2013, 32(3): 379-385  
WANG W M, WU X, LI H Y. Quantitative research on the supply and demand of ecosystem service function of Tianjin Binhai New Area[J]. *Ecological Science*, 2013, 32(3): 379-385
- [15] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(8): 1243-1254  
XIE G D, ZHANG C X, ZHANG L M, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(8): 1243-1254
- [16] VILLAMAGNA A M, ANGERMEIER P L, BENNETT E M. Capacity, pressure, demand, and flow: a conceptual framework for analyzing ecosystem service provision and delivery[J]. *Ecological Complexity*, 2013, 15: 114-121
- [17] SCHRÖTER M, BARTON D N, REMME R P, et al. Accounting for capacity and flow of ecosystem services: a conceptual model and a case study for Telemark, Norway[J]. *Ecological Indicators*, 2014, 36: 539-551
- [18] 郑婵娟, 赵秀阁, 黄楠, 等. 我国成人饮水摄入量研究[J]. *环境与健康杂志*, 2014, 31(11): 967-970  
ZHENG C J, ZHAO X G, HUANG N, et al. Investigation of drinking water intake rate of adults in China[J]. *Journal of Environment and Health*, 2014, 31(11): 967-970
- [19] 王继燕, 李爱农, 靳华安. 湿地植被净初级生产力估算模型研究综述[J]. *湿地科学*, 2015, 13(5): 636-644  
WANG J Y, LI A N, JIN H A. A review on research advances in estimation models for net primary production of vegetation in wetlands[J]. *Wetland Science*, 2015, 13(5): 636-644
- [20] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算[J]. *植物生态学报*, 2007, 31(3): 413-424  
ZHU W Q, PAN Y Z, ZHANG J S. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(3): 413-424
- [21] 侯思琰, 徐鹤, 刘德文. 七里海湿地生态服务功能价值评估[J]. *海河水利*, 2021(3): 24-27  
HOU S Y, XU H, LIU D W. Evaluation of the ecological service function of Qilihai wetland[J]. *Haihe Water Resources*, 2021(3): 24-27
- [22] 年蔚, 陈艳梅, 高吉喜, 等. 京津冀固碳释氧生态服务供需关系分析[J]. *生态与农村环境学报*, 2017, 33(9): 783-791  
NIAN W, CHEN Y M, GAO J X, et al. Relationship between provision and reception of ecological service of carbon fixation and oxygen release in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2017, 33(9): 783-791
- [23] 王婉莹, 刘琳, 李梦娇, 等. 生态-经济发展情景下内蒙古宏观生态系统模拟与分析[J]. *生态学报*, 2021, 41(14): 5888-5898  
WANG W Y, LIU L, LI M J, et al. Scenario-based simulation and analysis of future terrestrial ecosystem changes in Inner Mongolia under different ecological-economic development

- pathways[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(14): 5888–5898
- [24] CHEN Y D, GUO F, WANG J C, et al. Provincial and gridded population projection for China under shared socioeconomic pathways from 2010 to 2100[J]. *Scientific Data*, 2020, 7: 83
- [25] 姜彤, 赵晶, 曹丽格, 等. 共享社会经济路径下中国及分省经济变化预测[J]. *气候变化研究进展*, 2018, 14(1): 50–58
- JIANG T, ZHAO J, CAO L G, et al. Projection of national and provincial economy under the shared socioeconomic pathways in China[J]. *Climate Change Research*, 2018, 14(1): 50–58
- [26] 马旺, 左丽明, 胡琦, 等. 河北省滨海湿地退化及生态修复技术集成与应用研究报告[R]. 石家庄: 河北省水文工程地质勘察院, 2022
- MA W, ZUO L M, HU Q, et al. Research Report on Integration and Application of Coastal Wetland Degradation and Ecological Restoration Technology in Hebei Province[R]. Shijiazhuang: Hebei Institute of Hydrological Engineering Geology, 2022
- [27] 韩春晓. 河北省海岸带生态系统健康评价研究[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2012
- HAN C X. The study on coastal ecosystem health assessment in Hebei coastal zone[D]. Shijiazhuang: Hebei Normal University, 2012
- [28] RUSHDI A M A, HASSAN A K. Reliability of migration between habitat patches with heterogeneous ecological corridors[J]. *Ecological Modelling*, 2015, 304: 1–10
- [29] 李金煜. 济南市小清河河流廊道水生态系统服务供需评估与优化[D]. 济南: 山东建筑大学, 2022
- LI J Y. Supply and demand assessment and optimization of water ecosystem services in Xiaoqing River corridor of Jinan City[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2022
- [30] 孙志高, 刘景双, 秦泗刚, 等. 三江平原湿地农业开发的生态环境问题与区域可持续发展[J]. *干旱区资源与环境*, 2006, 20(4): 55–60
- SUN Z G, LIU J S, QIN S G, et al. Study on the eco-environmental problems caused by agricultural exploitation of wetland in Sanjiang Plain and regional sustainable development[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2006, 20(4): 55–60
- [31] 张春丽, 刘继斌, 佟连军. 湿地生态旅游发展模式研究——以三江平原湿地为例[J]. *安徽农业科学*, 2007, 35(24): 7579–7581
- ZHANG C L, LIU J B, TONG L J. Research on the wetland ecotourism pattern[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2007, 35(24): 7579–7581
- [32] 刘晓辉, 吕宪国. 三江平原湿地生态系统固碳功能及其价值评估[J]. *湿地科学*, 2008, 6(2): 212–217
- LIU X H, LYU X G. Assessment of service value of wetland ecosystem carbon sequestration in the Sanjiang Plain excluded Muling-Xingkai Plain on south of Wanda Mountain[J]. *Wetland Science*, 2008, 6(2): 212–217
- [33] 冯达, 郑云玉, 温亚利. 我国湿地生态效益补偿制度的需求分析[J]. *资源开发与市场*, 2010, 26(9): 831–834
- FENG D, ZHENG Y Y, WEN Y L. Analysis of wetland ecological compensation system needs in China[J]. *Resource Development & Market*, 2010, 26(9): 831–834
- [34] JIANG H, PENG J, DONG J Q, et al. Linking ecological background and demand to identify ecological security patterns across the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area in China[J]. *Landscape Ecology*, 2021, 36(7): 2135–2150
- [35] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well Being: Synthesis*[R]. Washington D C: Island Press, 2005: 7, 40
- [36] TINER R W. *Wetlands of the United States: Current Status and Recent Trends*[M]. Washington, D. C.: National Wetlands Inventory, Fish and Wildlife Service, 1984
- [37] MALTBY E. Wetland management goals: wise use and conservation[J]. *Landscape and Urban Planning*, 1991, 20(1/2/3): 9–18
- [38] WESTERBERG V H, LIFRAN R, OLSEN S B. To restore or not? A valuation of social and ecological functions of the Marais des Baux wetland in Southern France[J]. *Ecological Economics*, 2010, 69(12): 2383–2393
- [39] 廖柳文, 秦建新. 环长株潭城市群湿地生态安全研究[J]. *地球信息科学学报*, 2016, 18(9): 1217–1226
- LIAO L W, QIN J X. Ecological security of wetland in Chang-Zhu-Tan urban agglomeration[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2016, 18(9): 1217–1226
- [40] 李悦, 袁若愚, 刘洋, 等. 基于综合权重法的青岛市湿地生态安全评价[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(3): 847–855
- LI Y, YUAN R Y, LIU Y, et al. Ecological security evaluation of wetlands in Qingdao based on the comprehensive weighting method[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(3): 847–855
- [41] 王泉泉, 王行, 张卫国, 等. 滇西北高原湿地景观变化与人为、自然因子的相关性[J]. *生态学报*, 2019, 39(2): 726–738
- WANG Q Q, WANG H, ZHANG W G, et al. The correlations between wetland landscape and social-natural factors on Northwestern Yunnan Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(2): 726–738
- [42] 雷金睿, 陈宗铸, 陈毅青, 等. 1990—2018年海南岛湿地景观生态安全格局演变[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(2): 293–302
- LEI J R, CHEN Z Z, CHEN Y Q, et al. Dynamic analysis of wetland landscape ecological security pattern of Hainan Island in 1990–2018[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(2): 293–302
- [43] 周莉. 辽河三角洲芦苇湿地生态系统水碳通量动态及其控制机制[D]. 北京: 中国科学院植物研究所, 2005
- ZHOU L. Dynamics and control mechanism of water and carbon flux in reed wetland ecosystem in Liaohe Delta[D]. Beijing: Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, 2005