2024 年曹妃甸海草床生态分布及碳储量估算

樊倩颖，吕红娟，张嵩月

［河北省地矿局第七地质大队（河北省地质矿产勘查开发局雄安地质调查监测中心） 廊坊 065201］

摘要：二氧化碳浓度在全球范围内的持续升高，使得气候变化问题成为 21 世纪突出的环境议题，沿海生态系统的“蓝碳”逐渐受到重视。海草床如同海洋的“绿色森林”，是近岸高生产力的生态系统，蕴藏着巨大的碳汇潜力，成为“蓝碳”的重要组成部分。通过采用实地采样和实验测量的方法，文章对曹妃甸海草床碳储量进行了定量估算，并系统分析了估算过程中的不确定性来源，结果表明：（1）基于 2024 年 6 月 GF-2 遥感影像数据，采取人工目视解译、无人机航拍及船舶走航圈定河北省曹妃甸海草床面积 42.82 km^2；（2）海草种类为鳗草（原名大叶藻），海草高度范围为 60 ～ 103 cm，盖度范围为 10%～ 60% ；（3）海草床植物生物量碳密度的变化范围为 0.05 ～ 0.19 Mg C/hm^2，沉积物碳密度范围为 14.27 ～ 31.12 Mg C/hm^2；（4）2024 年海草床生物量碳储量为 490 t，沉积物碳储量为 8.89×10^4 t，海草床总碳储量为（8.94 ± 2.32）$\times10^4$ t。

关键词：鳗草；沉积物；碳储量；海草床；蓝碳生态系统

中图分类号：X171.1；P7 **文献标志码：**A **文章编号：**1005-9857（2026）04-0072-08

Ecological Distribution and Carbon Storage Estimation of Seagrass Bed in Caofeidian in 2024

FAN Qianying，LYU Hongjuan，ZHANG Songyue

［The Seventh Geological Team of Hebei Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources（Xiongan Geological Survey and Monitoring Center of Hebei Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration and Development），Langfang 065201，China］

Abstract：With the continuous increase of global carbon dioxide（CO_2）concentration，climate change has become the most prominent environmental issue faced by human beings in the 21st century，and the “blue carbon” of coastal ecosystems has gradually attracted attention．Seagrass beds are one of the near-shore highly productive ecosystems with great potential for carbon storage and are an important component of “blue carbon”．Through field sampling and experimental measurement，this study quantitatively estimated the carbon storage of seagrass beds in Caofeidian，and systematically analyzed the sources of uncertainty in the estimation process．The results show that：（1）Based on

收稿日期：2025-10-24；**修订日期：**2026-04-10

基金项目：河北省自然资源厅（13000024P00EEC410252N）.

作者简介：樊倩颖，助理工程师，硕士，研究方向为海洋科学

通信作者：吕红娟，副高级工程师，硕士，研究方向为海洋碳汇

GF-2 remote sensing image data in June 2024, the area of 42.82 km^2 of seagrass bed in Caofeidian, Hebei Province was defined by manual visual interpretation, UAV aerial photography and ship surveying. (2) The seagrass species is Eelgrass (formerly known as *grass wrack*); the height range of seagrass is 60 ~ 103 cm. and coverage ranges from 10% to 60%. (3) The biomass carbon density of seagrass beds varied from 0.05 ~ 0.19 Mg C/hm^2, and the sediment carbon density ranged from 14.27 ~ 31.12 Mg C/hm^2. (4) In 2024, the biomass carbon storage of seagrass bed was 490 tons, the sediment carbon storage was 8.89×10^4 tons, and the total carbon storage of sebaceous grass bed was $(8.94 \pm 2.32) \times 10^4$ tons.

Keywords: Eelgrass; Sediment; Carbon storage; Seagrass beds; Blue carbon ecosystems

0　引言

曹妃甸海草床主要分布在龙岛（人工岛）周边及邻近海域，主要种类为鳗草，是中国北方现存面积最大的海草床之一，海草床也是国际公认的最有效的碳捕获和碳封存生态系统之一，其与红树林和盐沼共同构成全球重要的蓝色碳汇，简称“蓝碳”。在全球范围内，海草生态系统可以储存多达 19.9 Pg 的有机碳[1-2]。海草床沉积碳汇主要来自水体悬浮物的捕获。

富含纤维和木质素类物质的植株体形成的沉积碎屑层可达数米至十余米，其中，碳在微生物内参与生物化学过程形成的生物量碳，对碳的封存时间可达数千年。海草群落中积累的有机碳不仅来自海草的生长，还来自其他颗粒的捕获，因为海草的冠层能够促进沉积并减少再悬浮。海草群落中的碳沉积量在 $(0.48 \sim 1.12) \times 10^8$ t/a 之间[3-4]，能以惰性有机碳的形式储存[5]。尽管全球海草床的分布面积占海洋面积的比例不足 0.2%，但其每年为海洋有机碳埋藏的贡献高达 10%，其中，海草床植物和沉积物的碳储量分别达到 75 ~ 151 Tg/a 和 4 200 ~ 8 400 Tg/a，是滨海重要的碳库[2,6]。

我国广东省义丰溪、流沙湾和东海岛海草床的蓝碳储量分别为 82.43 Mg C/hm^2、62.58 Mg C/hm^2 和 33.80 Mg C/hm^2，其中，沉积物有机碳储量分别占蓝碳储量的 99.97%、99.81% 和 99.99%[7]。荣成马山里海域海草床面积为 58.26 hm^2，种类为红纤维虾形草和丛生鳗草。红纤维虾形草分布面积为 54.50 hm^2，平均生物量为 (297.0 ± 41.5) g/m^2。丛生鳗草分布面积为 3.76 hm^2，占海草床总面积的 6.5%，呈现斑块状分布，与红纤维虾形草交错而生，平均生物量为 (534.0 ± 70.7) g/m^2[8]。黎安港海菖蒲分布广泛，其次为圆叶丝粉草及泰来草，海草床分布面积约为 0.93 km^2，黎安南岸海草分布面积最大，海草平均覆盖度为 37.80%[9-10]。我国海草床每年碳汇量约为 $(3.2 \sim 5.7) \times 10^5$ Mg C[11-12]；山东桑沟湾鳗草海草床生态系统每年总固碳量约为 290 Mg C[13]，吸收碳的形式包括海草固碳、附生植物固碳、海草床捕获颗粒碳等，其中，海草固定的碳占总固碳量的 46%，为 54.35 Mg C/hm^2[14-15]。

尽管国内外针对海草床生态系统的碳储量开展了一定范围的调查与评估工作，但是对于曹妃甸海草分布特征及海草生态系统碳储量方面的研究未见报道。目前，我国大多数海草物种及其分布区域的碳储量数据仍相当稀缺。此外，部分评估研究因缺乏对区域海草种类、环境条件及沉积物特征等关键信息的系统掌握，其所得结果的准确性仍存在较大不确定性。期望本文在积累海草床碳汇基础数据的同时，为其他城市开展海草床碳汇监测提供参考[16]。曹妃甸是京津冀协同发展生态支撑区的核心组成部分，也是东亚—澳大利西亚候鸟迁徙路线上的关键停歇地与觅食地。在北方近海生态系统中，海草床资源本就稀缺且脆弱，曹妃甸海草床以超大的连片分布面积和完整的群落结构，成为北方温带近海生态系统的标杆。其生态覆盖范围广、连通性强，不仅维系着局部海域的生态平衡，更对整个渤海湾的水质净化、泥沙稳固和生物多样性维持起到全局性支撑作用，是北方滨海湿地生态系统中不可或缺的关键板块。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

曹妃甸是河北省唐山市下辖行政区，地处唐山南部沿海、渤海湾中心地带。曹妃甸区海草床位于39°07' N—39°27' N，118°12' E—118°43' E。以曹妃甸理论最低潮面起算，最高潮位为 3.90 m，最低潮位为 −0.39 m；平均高潮位为 2.52 m。潮间带以粉砂和黏土质粉砂为主，富含有机质，常见生物扰动构造。潮下带以细砂和粉砂为主，受波浪和潮流影响形成沙波或平行层理。潮汐为半日潮，潮差较大，可促进沉积物的悬浮和再分配。波浪在冬季偏北风时较强，夏季较弱，影响沿岸沉积物的分选。

本次采样布设 9 个站位，站位布设涵盖海草床生长曹妃甸—龙岛附近的砂质海域，每个站位布设 3 组生物量样方，共计 27 个样方；同时，每个站位布设 1 个沉积物样方，共计 9 个样方。在 HC03 处向海一侧和向陆一侧分别布设 1 个空白站位，共计 2 个空白站位，采集沉积物样品，具体站位布设如表 1 所示。

表 1 采样点位置

Table 1 Location of sampling points

站位编号	植被种类	纬度	经度
HC01	鳗草	39.115 886° N	118.690 322° E
HC02	鳗草	39.097 436° N	118.686 775° E
HC03	鳗草	39.108 771° N	118.726 656° E
HC04	鳗草	39.087 876° N	118.690 069° E
HC05	鳗草	39.086 818° N	118.723 913° E
HC06	鳗草	39.047 012° N	118.699 801° E
HC07	鳗草	39.038 066° N	118.699 069° E
HC08	鳗草	39.052 389° N	118.713 636° E
HC09	鳗草	39.038 046° N	118.725 397° E
KB01	鳗草	39.120 812° N	118.719 299° E
KB02	鳗草	39.093 435° N	118.716 807° E

每个站位设置 3 组生物量平行样方。样方大小整体反映调查站位的碳库组成特征，调查区整体植株低矮且分布较均匀，故本次海草植物样方设置为 0.5 m × 0.5 m；地上生物量和地下生物量样方大小一致，本次工作受海水潮汐影响未采集到凋落物；样方采用随机方式布设。同时，对河北省盐沼进行沉积物采样，将河北省盐沼不同植被沉积物碳密度和碳储量与海草床沉积物碳密度和碳储量进行对比。

1.2 研究方法

1.2.1 植被分布、样品采集与处理

本文基于 2024 年 GF-2 遥感影像数据（分辨率为 2 m），采用 ENVI 5.1 软件统一多光谱卫星影像的坐标和投影系统，对其进行辐射定标、大气校正、几何校正和图像增强处理。采用人工目视解译、无人机航拍及船舶走航圈定海草床面积的方法。结合光谱信息和空间特征对影像进行归一化植被指数（NDVI）计算。根据计算出的 NDVI 值，进行植被密度分割分类，最后进行栅格矢量化。由于植被覆盖度（FVC）的取值范围在［0,1］之间，因此，将不在［0,1］之间的数值重新赋值，利用波段计算工具重新对计算输出的 NDVI 栅格影像进行计算。为验证海草床分类结果的准确性，以无人机航拍影像与船舶走航实地调查数据为地面真值，采用随机均匀采样法选取验证样本，构建混淆矩阵计算总体精度与 Kappa 系数。结果显示，研究区海草床分类总体精度高于 85%，Kappa 系数大于 0.80，达到遥感分类理想精度水平，分类结果可靠，能够满足后续海草床分布与生物量估算的需求。

海草床调查部分涉及两景遥感影像，为了做到取值范围的一致性，将两景影像计算出的 NDVI 栅格数据进行了拼接。在 ENVI 软件中，在需要密度分割的栅格图像上选择新建密度分割。这个分割区间可以根据研究目的进行修改。将栅格图像转出的矢量文件加载到 ArcGIS 软件中，根据植被盖度区域的划分，将矢量重新分类，得到人工修改后的盖度分区。

根据海草物种根系长度确定采样深度，使用直径 10 ～ 25 cm 根系采样器，自上而下经过地上植物直接插入沉积物中，保证植物完整性，深度到达根区沉积物，根系长度为 20 ～ 40 cm，把取样器盖上并垂直取出；把土柱转移至筛网内，冲洗样品，去除沉积物（同盐沼采样方法）。同时，记录植被种类、高度、数量和盖度。使用剪刀将海草植株分离为地上生物量（叶片和叶鞘）和地下生物量（根

状茎和根）两部分，分别装入样品袋。沉积物柱状样品直径为 75 mm，深度为 100 cm；采样设备为柱状采样器，对于较硬的砂石底质，本次使用动力柱状采样器；采样器缓慢压入，确保垂直无明显压缩。采样器使用链条和绞盘拉出。植物样品在 4 ℃环境避光保存，沉积物柱状样品横放运输。

样品带回实验室后分别记录湿重；置于干燥箱 60 ℃烘干，记录干重；用陶瓷质研钵将干燥后的样品粉碎，过 100 目标准筛，置于小型密封袋中密封。沉积物柱状样品以 10 cm 为间距分层，每个柱状样共计 10 个样品；在每个深度间隔的样品中间位置二次取样，用于容重、粒度及有机碳分析。其中，容重样品应记录二次取样体积（V），粒度及有机碳样品取样量满足相关分析要求；每层样品置于干燥箱 60 ℃中烘干至恒重，容重样品记录干重（mg）；用陶瓷质研钵或球磨机将干燥后的样品粉碎，过 100 目标准筛，置于密封袋中，放入干燥器中待测。植物和沉积物样品总有机碳分析采用元素分析仪法。

1.2.2　碳密度与碳储量计算方法

（1）调查站位生物量碳密度计算：

$$VC_{den}=VC_a+VC_b \quad (1)$$

式中：VC_{den} 为调查站位生物量碳密度；VC_a 为地上生物量碳密度，单位为兆克碳每公顷（Mg C/hm^2）；VC_b 为地下生物量碳密度，单位为兆克碳每公顷（Mg C/hm^2）。

（2）沉积物碳密度计算：

$$VC_{col}=\sum_{j=1}^{n}\omega_{C_{som,j}}\times\rho_j\times H_j\times10^2 \quad (2)$$

式中：VC_{col} 为 100 cm 或实际调查深度的柱状样沉积物碳密度，单位为兆克碳每公顷（Mg C/hm^2）；n 为实际调查深度的柱状样层数；$\omega_{C_{som,j}}$ 为第 j 层沉积物有机碳质量分数，单位为百分比（%）；ρ_j 为第 j 层沉积物容重，单位为克每立方厘米（g/cm^3）；H_j 为第 j 层沉积物厚度，单位为厘米（cm），每层厚度均为 10 cm。

（3）总碳储量计算：

$$C_{stock}=\sum_{i=1}^{m}(SC_{den,i}+SC_{l,i}+SC_{col,i}) \quad (3)$$

式中：C_{stock} 为海草床生态系统总碳储量，单位为兆克碳（Mg C）；$SC_{den,i}$ 为第 i 个调查分区生物量碳储量，单位为兆克碳（Mg C）；$SC_{l,i}$ 为第 i 个调查分区凋落物碳储量，单位为兆克碳（Mg C）；$SC_{col,i}$ 为第 i 个调查分区沉积物碳储量，单位为兆克碳（Mg C）；m 为调查范围内调查分区数量。

1.2.3　不确定性分析方法

海草床生态系统碳储量不确定度评估通过不同调查分区海草床碳密度的不确定性计算，不同调查分区海草床总碳密度不确定性计算方法为：

$$U_{D-i}=\frac{\sqrt{\sum(U_{D-i,j}\cdot\bar{D}_{i,j})^2}}{\bar{D}_i}=\frac{\sqrt{\sum(U_{D-i,j}\cdot\bar{D}_{i,j})^2}}{\sum\bar{D}_{i,j}} \quad (4)$$

式中：U_{D-i} 为第 i 个调查分区总碳密度的不确定性；$U_{D-i,j}$ 为第 i 个调查分区第 j 个碳库碳密度的不确定性；$\bar{D}_{i,j}$ 为第 i 个调查分区第 j 个碳库碳密度平均值；$\bar{D}_i$ 为第 i 个调查分区地下总碳密度平均值，为所有碳库碳密度平均值的加和；i 为调查分区，以植被类型、地理区域、潮区或其他要素划分；j 为碳库，对海草床生态系统来说，j=1−4，分别为地上生物量（AGB）、地下生物量（BGB）、凋落物（Li）和沉积物（SO）。其中，第 i 个调查分区第 j 个碳库碳密度的不确定性（$U_{D-i,j}$），本标准仅考虑抽样不确定性。

2　结果

2.1　植被分布特征

根据遥感卫星实测数据，本文圈定海草床面积 42.82 km^2，其中，北片海草床面积约 27.73 km^2，南片海草床面积约 14.56 km^2，距离北片海草床西侧 3 km 处，还分布有 0.53 km^2 的海草床。2024 年 6—9 月，进行海草样品采集，根据采集的海草样品鉴定，海草种类为鳗草（原名大叶藻），肉眼观察，海草有根状匍匐茎，茎多分节，节上生须根。茎先端向上生出枝，叶鞘直立，一侧膜质、管状。新叶从老叶叶鞘内发出，叶互生，长条形，宽 3 ～ 6 mm，有 5 ～ 7 条叶脉；先端钝圆，全缘。

海草高度范围为 60 ～ 103 cm，平均高度为 78 cm，盖度范围为 10%～60%，样方密度为 36～116 株 /m^2，其根状茎长度在（2.67 ± 1.70）cm 到（22.20 ± 3.92）cm 之间，根长在（3.67 ± 2.36）cm 到

（8.00 ± 1.90）cm 之间。根据植被盖度区域的划分，得到人工修改后的盖度分区。

2024 年，曹妃甸海草床分为密集区、较密集区、一般区、较稀疏区和稀疏区五个部分。其中，密集区共 143.76 hm^2，较密集区共 256.53 hm^2，一般区共 526.57 hm^2，较稀疏区共 2 819.61 hm^2，稀疏区共 534.72 hm^2，具体如表 2 所示。

表 2 曹妃甸海草床生态系统分布情况

Table 2 Distribution of seagrass bed ecosystem in Caofeidian

指标	密集区	较密集区	一般区	较稀疏区	稀疏区
面积 /hm^2	143.76	256.53	526.57	2 819.61	534.72
占比 /%	3.36	5.99	12.30	65.86	12.49

2.2 碳密度与碳储量

碳密度为植物干重与单位面积有机碳的乘积，沉积物碳密度为单位厚度土壤容重的乘积。碳储量为碳密度与面积的乘积。综合生物量及有机碳分析结果，曹妃甸海草床生态系统地上植被碳密度范围为 0.04 ～ 0.121 Mg C/hm^2，平均值为 0.083 Mg C/hm^2，标准差为 0.027 Mg C/hm^2；地下植被碳密度范围为 0.013 ～ 0.064 Mg C/hm^2，平均值为 0.032 Mg C/hm^2，标准差为 0.015 Mg C/hm^2；海草床植物生物量碳密度的变化范围为 0.05 ～ 0.19 Mg C/hm^2，平均为 0.11 Mg C/hm^2，标准差为 0.04 Mg C/hm^2。

2024 年 9 月，曹妃甸海草床生态系统沉积物碳密度范围为 14.27 ～ 31.12 Mg C/hm^2，平均值为 20.76 Mg C/hm^2，标准差为 5.44 Mg C/hm^2。同样，对河北省不同植被盐沼进行沉积物碳密度计算，互花米草的沉积物碳密度分布范围为 43.57 ～ 123.07 Mg C/hm^2，沉积物碳密度平均值为 89.70 Mg C/hm^2；盐地碱蓬的沉积物碳密度分布范围为 17.59 ～ 61.30 Mg C/hm^2，沉积物碳密度平均值为 39.04 Mg C/hm^2；芦苇沉积物碳密度分布范围为 14.51 ～ 66.42 Mg C/hm^2，平均值为 34.85 Mg C/hm^2。沉积物碳密度平均值由大到小依次为：互花米草、盐地碱蓬、芦苇、海草床。海草草甸的退化和消失会导致海草床地上部分的碳储量严重下降，也会导致地下部分的碳汇随着时间的推移而散逸在空气中。河北省淤泥质岸滩的沉积物平均碳密度为 36.28 Mg C/hm^2，大于海草床生态系统的沉积物碳密度。

海草床的碳汇功能主要通过 3 种途径实现：一是截留水体中的悬浮颗粒物；二是由富含纤维和木质素的植物残体堆积形成沉积层；三是通过微生物参与的生化作用固定生物量碳。这些沉积层厚度可达数米至十余米，能够将碳封存长达数千年。2024 年，海草床生物量碳储量为 490 t，沉积物碳储量为 8.89×10^4 t，海草床总碳储量为（8.94 ± 2.32）$\times 10^4$ t。

2.3 碳密度的垂向分布

2022 年 6 月，曹妃甸海草床生态系统沉积物容重范围为 1.34 ～ 1.61 g/cm^3，平均值为 1.48 g/cm^3；沉积物有机碳含量为 0.056％～ 0.093％，平均值为 0.075％。2022 年 10 月，曹妃甸海草床生态系统沉积物容重范围为 1.14 ～ 1.19 g/cm^3，平均值为 1.17 g/cm^3；沉积物有机碳含量为 0.057％～ 0.084％，平均值为 0.069％。2022 年所测的两期容重和有机碳值均低于 2024 年，随着时间的推移，存在有机碳累积。

土壤容重在 35 cm 处达到最高值，土壤容重随土壤紧实程度而变化，表层一般低于底层，这可能与表层受到的压力小和有机质含量高等因素有关。沉积物有机碳含量在约 45 cm 处达到最大值，95 cm 处同样为最大值 0.15％。

海草床有大部分的有机碳储存在沉积物中，对其沉积物进行分析，砂、粉砂和黏土构成了曹妃甸海底表层沉积物，这些物质主要由海河、黄河和滦河携带入海沉积形成[17-19]。曹妃甸海草床区域沉积物类型以砂和粉砂质砂为主，其总占比分别为 53.64％和 45.45％，部分类型为砂质粉砂，占比为 0.91％。沉积物容重范围为 1.5 ～ 1.79 g/cm^3，平均值为 1.55 g/cm^3，有机碳含量范围为 0.048％～ 0.394％，平均值为 0.133％。

3 碳储量不确定性分析

海草床不确定性分析结果显示，不确定性变化幅度为 20.15％～ 36.90％。其中，地下生物量碳密度不确定性最大，为 36.90％；其次为地上生物量碳密度不确定性，为 25.42％（图 1），结果可接受。

影响海草床碳储量估算精度的因素众多，从沉积物深度到分布面积等参数均会产生影响[5,20]，特别是沉积物采样深度的合理设定对获取准确的单位面积碳储量数据至关重要。

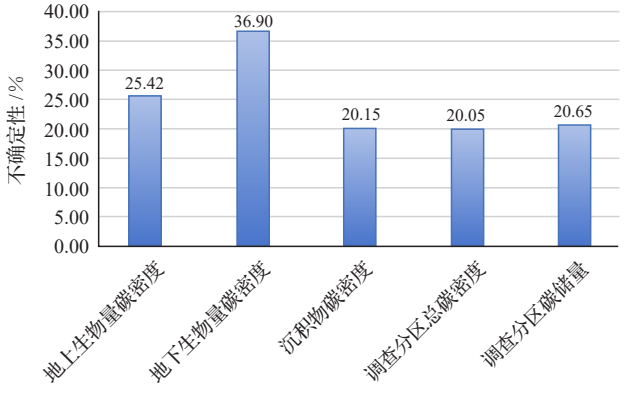

图 1　碳储量不确定性分析结果

Fig.1　Results of uncertainty analysis of carbon stocks

4　讨论

由于海洋水动力环境的影响，底质环境存在一定的差异性，经过采样化验分析，该区域 100 cm 以内的沉积物的粒径、容重和有机碳含量有所不同，可能导致海草床生态系统不同区域沉积物碳密度有所差别，也会带来碳密度的不确定性。曹妃甸海草床基本淹没于海水中，在低潮期水深仍有 1 m 左右，较难准确采集到样方内的生物量样品，因此，样品采集时存在一定的人为误差。这些都会对生物量及碳储量的不确定性评估造成影响。

海草床的开放系统特性使得海草生长区与邻近裸滩保持物质交换，研究发现，有机碳通过海浪驱动的凋落物迁移从有植被区向无植被区转移[21]，长期积累导致一些裸滩区域的沉积物碳密度甚至超过了海草生长区。在海草床生态系统碳储量评估中，若仅考虑海草生长区的碳储量而忽略与之相连的裸滩区沉积物碳储量，将导致对系统总碳储量的估算不足。因此，有必要将具有连通性的裸滩区碳储量一并纳入评估范围。例如，对肯尼亚加齐湾海草床储碳情况调查发现，所有海草生长区站位沉积物储碳密度都显著高于裸滩对照站位[22]，且高出 4 ～ 6 倍。海草床碳的来源复杂，可以概括为内源（来自海草生态系统自身）和外源（来自系统外部），外源碳是由海草床以外的生态系统产生，并通过物理过程输送到海草床中并被捕获、埋藏。海草床沉积物有机碳含量与多种因素有关，其中，水动力条件和底质类型是影响沉积物有机碳含量的重要因素[23-24]。

曹妃甸海草床基本没于海水中，在低潮期水深仍有 30 cm 到 1.5 m，较难准确采集到样方内的生物量样品，因此，样品采集时存在一定人为误差。这些都会对生物量及碳储量的不确定性评估造成影响。

考虑到技术规程中站位布设要求，本次海草床站位布设涵盖曹妃甸—龙岛附近区域，各个站位的海草植被植株大小、高度等均有所不同。因此，采集样品的碳密度也存在一定差异。比如，本次生态修复区采集的海草植被盖度在 10％～ 25％，所得样品碳密度为 0.05 ～ 0.11 Mg C/hm^2，均相对较小，这对碳密度不确定性有一定影响。本次海草床范围根据低潮期遥感影像和现场核查确定，由于收集低潮期遥感影像受天气、水文和潮汐等因素的影响，加之现场核查时存在人为误差，因此，获得的海草床范围精确度存在不确定性。

5　结论

河北省海草床主要分布于曹妃甸近岸海域至龙岛附近浅水海域，研究结果显示，该区域海草床整体呈片区化集中分布特征，共划分为 3 个主要区片，海草床总分布面积达 42.82 km^2，主要优势物种为鳗草（原大叶藻）。从植被覆盖疏密特征来看，2024 年曹妃甸海域海草床植被长势空间差异性显著，可划分为密集区、较密集区、一般区、较稀疏区与稀疏区五个等级。各等级分布面积差异明显，整体呈现出稀疏、较稀疏区域广布，密集、高覆盖区域零散分布的特点。碳储量调查结果表明，海草床沉积物具备极强的碳封存潜力，是区域蓝碳生态系统重要的碳储载体。

参考文献（References）：

[1] 任玉正，刘松林，罗红雪，等. 海草床退化与修复对其沉积物有机碳储存的影响过程[J]. 科学通报，2023，68(22)：2961-2972.
REN Yuzheng，LIU Songlin，LUO Hongxue，et al. Influence processes of seagrass degradation and restoration on sediment organic carbon storage[J]. Chinese Science Bulletin，2023，68(22)：2961-2972.

[2] FOURQUREAN J W，DUARTE C M，KENNEDY H，et al. Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock[J]. Nature Geoscience，2012，5(7)：505-509.

[3] KENNEDY H，BEGGINS J，DUARTE C M，et al. Seagrass sediments as a global carbon sink：isotopic constraints[J]. Global Biogeochemical Cycles，2010，24(4)：GB4026.

[4] GUNATHILAKA W G I T，THILAKARATHNE E P D N，EGODAUYANA K P U T，et al. Carbon and nitrogen storage estimation of tropical seagrass meadows on the eastern coast of Sri Lanka[J]. Regional Studies in Marine Science，2025，90：104423.

[5] 于国旭，张彦浩，赵祥，等. 海草床的固碳潜力及其生物量监测方法研究进展[J]. 水产科学，2024，43(3)：499-508.
YU Guoxu，ZHANG Yanhao，ZHAO Xiang，et al. Research advancement on potential of carbon sink and biomass monitoring methods of seagrass beds：a review[J]. Fisheries Science，2024，43(3)：499-508.

[6] ZHAO Xiang，SUN Jie，LI Fan，et al. Current status and influencing factors of blue carbon in seagrass beds：an extensive survey and comprehensive analysis in the Yellow and Bohai Seas，China[J]. Journal of Environmental Management，2025，393：127038.

[7] 陈海. 广东典型海草床蓝碳储量及其来源研究[D]. 广州：广东工业大学，2023.
CHEN Hai. Blue carbon stocks and sources of typical seagrass meadows in Guangdong Province[D]. Guangzhou：Guangdong University of Technology，2023.

[8] 邓筱凡，张宏瑜，吴忠迅，等. 荣成马山里海域海草床分布现状及其生态特征[J]. 海洋学报（中文版），2022，44(8)：97-109.
DENG Xiaofan，ZHANG Hongyu，WU Zhongxun，et al. Distribution and ecological characteristics of seagrass bed of Mashanli sea area in Rongcheng[J]. Haiyang Xuebao，2022，44(8)：97-109.

[9] 陈石泉，庞巧珠，蔡泽富，等. 海南黎安港海草床分布特征、健康状况及影响因素分析[J]. 海洋科学，2020，44(11)：57-64.
CHEN Shiquan，PANG Qiaozhu，CAI Zefu，et al. Analysis of distribution characteristics，health status，and influencing factors of seagrass bed in Li'an lagoon，Hainan Island[J]. Marine Sciences，2020，44(11)：57-64.

[10] 杨熙，余威，何静，等. 海南黎安港海草床碳储量评估[J]. 海洋科学，2022，46(11)：116-125.
YANG Xi，YU Wei，HE Jing，et al. Carbon storage in the seagrass beds of Li'an Bay，Hainan[J]. Marine Sciences，2022，46(11)：116-125.

[11] 李捷，刘译蔓，孙辉，等. 中国海岸带蓝碳现状分析[J]. 环境科学与技术，2019，42(10)：207-216.
LI Jie，LIU Yiman，SUN Hui，et al. Analysis of blue carbon in China's coastal zone[J]. Environmental Science & Technology，2019，42(10)：207-216.

[12] 周晨昊，毛覃愉，徐晓，等. 中国海岸带蓝碳生态系统碳汇潜力的初步分析[J]. 中国科学：生命科学，2016，46(4)：475-486.
ZHOU Chenhao，MAO Qinyu，XU Xiao，et al. Preliminary analysis of C sequestration potential of blue carbon ecosystems on Chinese coastal zone[J]. Scientia Sinica(Vitae)，2016，46(4)：475-486.

[13] 高亚平，方建光，唐望，等. 桑沟湾大叶藻海草床生态系统碳汇扩增力的估算[J]. 渔业科学进展，2013，34(1)：17-21.
GAO Yaping，FANG Jianguang，TANG Wang，et al. Seagrass meadow carbon sink and amplification of the carbon sink for eelgrass bed in Sanggou Bay[J]. Progress in Fishery Sciences，2013，34(1)：17-21.

[14] HUANG Y H，LEE C L，CHUNG C Y，et al. Carbon budgets of multispecies seagrass beds at Dongsha Island in the South China Sea[J]. Marine Environmental Research，2015，106：92-102.

[15] 吴钟解，陈石泉，蔡泽富，等. 海南岛海草床分布变化及恢复建议[J]. 海洋环境科学，2021，40(4)：542-549.
WU Zhongjie，CHEN Shiquan，CAI Zefu，et al. Analysis of distribution change and restoration suggestion of the seagrass beds in Hainan Island[J]. Marine Environmental Science，2021，40(4)：542-549.

[16] 王曼华，纪德钰，王伟，等. "双碳"背景下海草床碳汇监测路径探索[J]. 资源节约与环保，2025(4)：102-106.
WANG Manhua，JI Deyu，WANG Wei，et al. Exploration on monitoring path of carbon sequestration in seagrass bed under the background of "double carbon"[J]. Resources Economization & Environmental Protection，2025(4)：102-106.

[17] 祝贺，孙志高，衣华鹏，等. 曹妃甸近岸表层沉积物粒度和粘土矿物分布特征研究[J]. 地球与环境，2017，45(3)：306-313.

ZHU He，SUN Zhigao，YI Huapeng，et al. Research on distribution characteristics of sediment grain size and clay mineral in Caofeidian inshore，China[J]. Earth and Environment，2017，45(3)：306-313.

[18] 邹昊. 渤海湾北部沉积物分布特征及沉积环境[D]. 青岛：中国海洋大学，2009.
ZOU Hao. Sediment distribution characteristics and sedimentary environment of northern Bohai Bay[D]. Qingdao：Ocean University of China，2009.

[19] 冯永财，郝连成，胡延斌，等. 渤海湾曹妃甸海域沉积物粒度分布特征及运移趋势分析[J]. 海洋地质前沿，2024，40(11)：57-69.
FENG Yongcai，HAO Liancheng，HU Yanbin，et al. Characterization of grain size distribution of sediments and transport trend analysis in Caofeidian sea area，Bohai Bay[J]. Marine Geology Frontiers，2024，40(11)：57-69.

[20] NAVA-FÉLIX T F，VAN TUSSENBROEK B I，MATEO-CID L E，et al. Blue carbon stocks in seagrass tissues：a case study from the northern Mexican Caribbean[J]. Estuarine，Coastal and Shelf Science，2025，323：109395.

[21] 罗慧珏. 海菖蒲 (Enhalus acoroides) 光合生理及其草床固碳速率和碳储量研究[D]. 三亚：海南热带海洋学院，2024.
LUO Huijue. Photosynthetic physiology of Enhalus acoroides and its seagrass bed carbon sequestration rate and carbon storage[D]. Sanya：Hainan Tropical Ocean University，2024.

[22] GITHAIGA M N，KAIRO J G，GILPIN L，et al. Carbon storage in the seagrass meadows of Gazi Bay，Kenya[J]. PLoS One，2017，12(5)：e0177001.

[23] MAZARRASA I，SAMPER-VILLARREAL J，SERRANO O，et al. Habitat characteristics provide insights of carbon storage in seagrass meadows[J]. Marine Pollution Bulletin，2018，134：106-117.

[24] 刘松林，江志坚，吴云超，等. 海草床沉积物储碳机制及其对富营养化的响应[J]. 科学通报，2017，62(S2)：3309-3318.
LIU Songlin，JIANG Zhijian，WU Yunchao，et al. Mechanisms of sediment carbon sequestration in seagrass meadows and its responses to eutrophication[J]. Chinese Science Bulletin，2017，62(S2)：3309-3318.