◆海洋科学◆

滨海盐沼典型区域碳密度评估研究——以渤海辽河口为例*

吴翌丹[1,2],宋莎莎[1,2**],赵建平[1,2],张庆范[1,2],安　伟[1,2],张广帅[3]
(1.中海油能源发展股份有限公司安全环保分公司,天津　300452;2.中海油能源发展股份有限公司,海上油田安全环保重点实验室,天津　300450;3.国家海洋环境监测中心,辽宁大连　116023)

摘要:为剖析滨海盐沼湿地的碳密度特性,评估滨海盐沼湿地的碳密度现状,本研究以典型的渤海辽河口区域滨海盐沼湿地为例,在研究区域开展现场调查,根据盐沼湿地的植被类型、生态特征和地形变化,选取27个采样点,测定植被及土壤样本的生物量、有机碳含量等指标,对不同地物类型土壤和植被的碳密度进行计算,分析盐沼湿地碳密度现状并预估其变化。结果表明,研究区碳密度从大到小依次为光滩区域、盐地碱蓬区域、芦苇区域,平均碳密度分别为166.46、114.83、77.06 t/ha。气候变化导致的海平面上升将极大地降低滨海湿地碳汇潜力。本研究结果可为滨海盐沼湿地保护和碳循环研究提供基础支撑,对区域碳中和目标的实现具有潜在参考价值。

关键词:滨海盐沼;碳汇评估;辽河口;湿地;碳密度

中图分类号:P71,P74,P951　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1005-9164(2025)01-0059-09
DOI:10.13656/j.cnki.gxkx.20240819.001

海洋及其相关联的盐沼湿地是地球上最大的碳库,在缓解气候变化方面具有不可忽视的作用。当前,国际上广泛关注的海洋碳汇资源主要集中在政府间气候变化专门委员会(IPCC)承认的4种蓝碳生态系统上,即大型海藻场、红树林、海草床和盐沼[1]。其中,盐沼湿地由于深受气候变化和人类活动影响而备受瞩目。在区域上,盐沼湿地主要指海岸沿线受海洋潮汐周期性或间歇性影响的、被盐沼植物覆盖的咸水或淡咸水淤泥质滩涂[2]。由于生物量较高,盐沼湿地具有较高的单位面积固碳和埋碳能力,如全球盐沼湿地平均碳埋藏速率达168 g C/(m^2·a)[3],比陆地森林生态系统高约40倍[4]。我国滨海湿地面积约占全球滨海湿地总面积的1/4[5],在全球碳循环中占有重要地位。其中,盐沼湿地是我国面积最大的滨海湿地类型[6],在国家碳汇潜力评估中具有极为重要的地位,是碳循环领域关注的重点。

滨海盐沼湿地的碳循环与收支过程主要包含盐沼植物光合作用、光合生物碳分配、碳沉积埋藏、土壤

收稿日期:2024-06-15　　修回日期:2024-08-05
*中海油能源发展股份有限公司安全环保分公司科技项目(HFKJ-AH-AHY-2023-13)和中海油能源发展股份有限公司科技项目(HFKJ-CG-AH-2023-03)资助。
【第一作者简介】
吴翌丹(1995—),女,助理工程师,主要从事节能降碳、海洋碳汇过程与机制研究。
【**通信作者简介】
宋莎莎(1989—),女,高级工程师,主要从事海洋碳汇过程与机制研究,E-mail:songshsh2@cnooc.com.cn。
【引用本文】
吴翌丹,宋莎莎,赵建平,等.滨海盐沼典型区域碳密度评估研究:以渤海辽河口为例[J].广西科学,2025,32(1):59-67.
WU Y D,SONG S S,ZHAO J P,et al. Assessment of Carbon Density in Typical Areas of Coastal Salt Marshes:A Case Study of Liaohe Estuary of the Bohai Sea [J]. Guangxi Sciences,2025,32(1):59-67.

碳转化与输出 4 个过程。其中,盐沼植物光合作用即碳的生物固定过程,是指盐沼植物通过光合作用吸收二氧化碳,并将其转换为生物有机碳,形成初级生产力。在此过程中,盐沼植物会根据所处环境和自身的生长繁殖需求,将吸收的生物碳分配到不同的部位。与此同时,光合作用固定的生物碳在植物根系和土壤碳库的分配和转移规律也直接影响着土壤碳库的走向[7]。随着海平面的持续上升,滨海盐沼湿地不断向陆地推进,使得靠海一侧土壤中的有机碳和无机碳在潮汐的涨落过程中与近海水体进行交换,这种现象构成了一种重要的碳侧向输送方式。海水中大量的硫酸根离子能够有效抑制滨海盐沼湿地中甲烷等含碳气体的生成,从而降低滨海盐沼湿地的碳排放量,同时越来越多的陆相沉积物被海水淹没并埋藏到更深的土层中,在百年到万年的尺度上保持稳定状态,使得这些沉积物中的碳能在土壤中保存数千年而不会被释放回大气中,这也是盐沼湿地的碳封存能力远高于森林或其他陆地生态系统的重要原因[8]。因此,滨海盐沼湿地的碳汇机制研究越来越受到人们的关注,已成为当前热点研究领域之一。

开展滨海盐沼湿地碳汇潜力评估、修复与恢复工作对增强滨海盐沼湿地碳汇潜力和实现中国碳中和目标具有重要意义。近年来,随着城市化进程加快,对水资源的不合理利用导致滨海盐沼湿地的面积和资源日益减少,其固碳功能和效益也随之逐渐下降[9]。围垦、滩涂养殖等严重改变了湿地的水盐梯度格局,引起芦苇(*Phragmites australis*)、碱蓬群落萎缩,导致滨海盐沼湿地的生态稳定性和碳汇功能降低。在“碳达峰、碳中和”目标背景下,科学评估湿地碳汇格局,深入研究滨海盐沼湿地固碳增汇机理,积极开展湿地生态系统保护修复,建立完善的滨海盐沼湿地生态系统监测网络,探索建立盐沼碳汇交易机制等,对于滨海盐沼湿地固碳增汇具有重要意义。系统评估滨海盐沼碳汇资源现状是开展湿地修复与恢复工作的基础。为此,国内外已推出一系列与湿地修复相关的方法体系及工具模块[10],为滨海盐沼湿地碳汇的开发提供了科学支撑。然而,目前对典型滨海盐沼湿地碳汇潜力的评估还不够系统,缺少必要的观测数据。针对以上不足,本研究以渤海辽河口区域滨海盐沼湿地为例,基于滨海盐沼湿地资源状况的实地监测数据,对该区域的碳密度进行评估,以期为典型滨海盐沼湿地的修复增汇提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

渤海是我国半封闭型内海,地处北温带,多年平均气温为 10.7 ℃,降水量为 500-600 mm[11],海水盐度为 30[12]。渤海拥有盐沼湿地、海草床等多种典型生态系统,主要分布在辽河三角洲、黄河三角洲、海河河口 3 个区域。为有效维持良好的生态环境,渤海共设有 29 块滨海湿地保护优先区,总面积达 14 400 km^2。然而,由于受到人类活动和气候变化的影响,在 1990-2020 年盐沼湿地面积流失约 92.63%[13],这一现象值得关注。辽河口滨海盐沼湿地位于辽宁省盘锦市,是辽宁省最大的滨海湿地。该湿地由辽河、大凌河、小凌河等诸多河流冲积而成,地貌类型以冲积海积平原为主。辽河口滨海盐沼湿地生态保护红线区面积约为 520 km^2,自然湿地类型包括滩涂、碱蓬湿地、芦苇湿地和浅海水域,湿地植物以芦苇和盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)为主要群落,其植物碳汇能力平均值为 1.77 $kg/(m^2 \cdot a)$[14]。由于辽河携带了大量的泥沙和营养元素,辽河三角洲盘锦地区湿地植物的固碳能力与同等条件下温带落叶阔叶林的固碳能力大致相当[15]。

1.2 方法

1.2.1 研究区遥感调查

选取以辽河入海口为中心的区域作为研究区,面积约 2 470 km^2。为获取辽河口滨海盐沼湿地生态整体分布情况,首先基于高分辨率遥感影像进行景观解译,识别辽河口滨海盐沼湿地盐地碱蓬群落、芦苇群落及光滩分布区域并形成研究底图;所用影像为中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台提供的 Landsat 5 TM 和 Landsat 8 OLI 影像。然后基于遥感解译确定的研究底图,在辽河口西岸沿河口向海岸线方向设置调查样带,于 2022 年植物成熟期(10-11 月)对不同植被群落开展植物-土壤生态特征调查研究,同时利用无人机进行低空航拍,获取研究区的高程地形数据及群落景观影像。辽河口滨海盐沼湿地研究区位置及站位见图 1,样方信息见表 1。

1.2.2 样品采集及实验分析

现场共调查植物群落样方 27 个,涵盖盐地碱蓬样方 15 个、芦苇样方 10 个、其他样方 2 个。植被群落调查样方规格为 1 m×1 m,分析内容包括植被类型、植被密度、植物株高、植物盖度,采用收割法采集样方内植被地上部分并带回实验室分析,于 85 ℃烘

箱烘干至恒重，测定干重、碳含量，以各样方内植被地上生物量平均值作为本站位植被地上生物量。

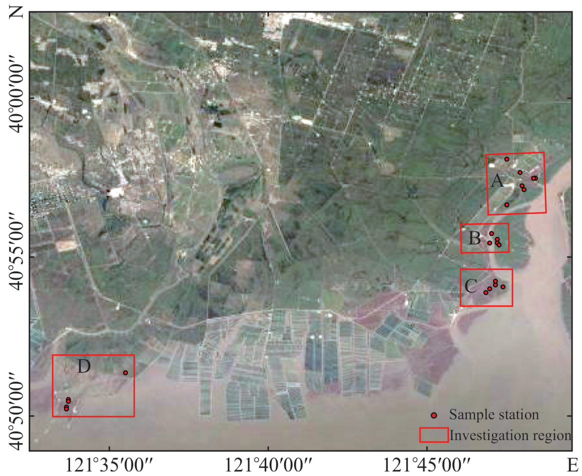

图 1　辽河口滨海盐沼湿地研究区位置及站位

Fig. 1　Location of study area and sample station of coastal salt marshes in Liaohe Estuary

表 1　辽河口滨海盐沼湿地研究区样方信息

Table 1　Quadrat information of study area of coastal salt marshes in Liaohe Estuary

研究分区 Investigation region	样方序号 Quadrat number	纬度 Latitude	经度 Longitude
A	1	40.968°N	121.792°E
	2	40.961°N	121.799°E
	3	40.952°N	121.801°E
	4	40.944°N	121.792°E
	5	40.954°N	121.800°E
	6	40.944°N	121.792°E
B	7	40.924°N	121.783°E
	8	40.924°N	121.783°E
	9	40.929°N	121.784°E
	10	40.929°N	121.784°E
	11	40.923°N	121.788°E
	12	40.926°N	121.787°E
	13	40.924°N	121.787°E
C	14	40.898°N	121.781°E
	15	40.900°N	121.783°E
	16	40.901°N	121.790°E
	17	40.902°N	121.786°E
	18	40.904°N	121.786°E
D	19	40.856°N	121.592°E
	20	40.842°N	121.562°E

续表

Continued table

研究分区 Investigation region	样方序号 Quadrat number	纬度 Latitude	经度 Longitude
	21	40.841°N	121.562°E
	22	40.838°N	121.561°E
	23	40.838°N	121.561°E
	24	40.837°N	121.561°E
	25	40.837°N	121.561°E
	26	40.845°N	121.591°E
	27	40.844°N	121.581°E

Note：the more specific location information of quadrats 22 and 23 is 40.838 41°N，121.561 31°E and 40.838 36°N，121.561 43°E，respectively. The more specific location information of quadrats 24 and 25 is 40.837 20°N，121.561 43°E and 40.836 90°N，121.561 10°E，respectively.

在调查植物样方的同时，采集土壤沉积物样品，并使用水分测定仪（型号：PR-3001-TRREC-N01，济南科宇电子信息技术有限公司）多点分层测定每个样方土壤的温度、湿度。采用土钻法在 0－30 cm 和＞30－100 cm 分层采集土壤样品，采样时缓慢打入土柱采样器，以确保垂向无明显压缩。采集的土壤样品装入自封袋并编号带回实验室进一步分析，分析指标包括容重、有机碳等。土壤样品经烘干、研磨、酸处理后待用。土壤沉积物有机碳的测定根据《海洋监测规范　第 5 部分：沉积物分析》（GB 17378.5－2007）的规定执行。对于土壤沉积物容重，首先称量采集后固定体积的样品湿重，然后将样品放入烘箱，60 ℃烘干至恒重，称量干重，最后用土壤沉积物干重除以沉积物原始体积来确定。

1.2.3　土壤碳密度估算

①取样柱样品碳密度

$$\rho_s = VM_s \times \varphi_s = m_s / V \times \varphi_s, \quad (1)$$

$$\omega_{si} = \sum_{j=1}^{a} \rho_{sij} \times h_{sij}, \quad (2)$$

式中，ρ_s 为研究分区中取样柱内单位体积土壤对应的碳含量（g/cm^3），VM_s 为土壤容重（g/cm^3），φ_s 为土壤中有机碳百分含量，m_s 为土壤干重（g），V 为原始体积（cm^3），ω_{si} 为某取样柱的土壤碳密度（g/cm^2），ρ_{sij} 为取样柱某层的碳含量（g/cm^3），h_{sij} 为取样柱各层的取样间隔（cm），a 为取样柱土壤层数。

②土壤碳含量

$$\overline{M}_{sd}=\overline{\omega}_{sd}\times S_d=\frac{\sum_{i=1}^{n}\omega_{sdi}}{n}\times S_d, \tag{3}$$

$$\overline{M}_s=\sum_{di=1}^{n}\overline{M}_{sdi}, \tag{4}$$

$$M_s=\overline{M}_s\pm\tau, \tag{5}$$

式中,$\overline{M}_{sd}$ 为研究分区内土壤样品的平均碳含量(g),$\overline{\omega}_{sd}$ 为研究分区内土壤样品的平均碳密度(g/cm^2),S_d 为研究分区面积(cm^2),ω_{sdi} 为研究分区内第 i 个取样柱样品的土壤碳密度(g/cm^2),n 为研究分区内取样柱样品的总数量,$\overline{M}_s$ 为土壤平均碳含量(g),$\overline{M}_{sdi}$ 为研究分区内第 i 个取样柱样品的平均碳含量(g),M_s 为土壤碳含量(g),τ 为土壤碳含量标准差(g)。

③土壤碳含量的标准差

$$\sigma_d=\sqrt{\frac{(\omega_{s1}-\overline{\omega}_{sd})^2+(\omega_{s2}-\overline{\omega}_{sd})^2+\cdots+(\omega_{sn}-\overline{\omega}_{sd})^2}{t-1}}, \tag{6}$$

$$\tau=\sqrt{\sum_{di=1}^{t}\sigma_{di}^2\times d_{di}}, \tag{7}$$

式中,σ_d 为研究分区内取样柱样品之间的碳密度标准差(g/cm^2);ω_{s1} 为研究分区内♯1 取样柱的土壤碳密度(g/cm^2),ω_{s2} 为研究分区内♯2 取样柱的土壤碳密度(g/cm^2),以此类推;t 为研究分区内站位数;σ_{di} 为 i 区域的土壤碳密度标准差(g/cm^2);d_{di} 为 i 区域面积(cm^2)。

④土壤平均碳密度

$$\overline{\omega}_s=\frac{\overline{M}_s}{S}, \tag{8}$$

式中,$\overline{\omega}_s$ 为土壤平均碳密度(g/cm^2),S 为研究区域总面积(cm^2)。

1.2.4 滨海盐沼植物生物量碳密度估算

①滨海盐沼植物地上生物量碳密度

$$VD_a=\frac{\sum_{i=1}^{t}\overline{VD}_{ai}}{t}, \tag{9}$$

$$\overline{VD}_a=\frac{\sum_{i=1}^{x}VA_i\times VC_{ai}}{x}, \tag{10}$$

式中,VD_a 为研究分区滨海盐沼植物地上生物量碳密度(g/cm^2),$\overline{VD}_{ai}$ 为研究分区第 i 个站位地上生物量平均碳密度(g/cm^2),$\overline{VD}_a$ 为研究站位植物地上生物量平均碳密度(g/cm^2),VA_i 为研究站位第 i 个样方单位面积植物地上生物量(g/cm^2),VC_{ai} 为研究站位第 i 个样方植物地上活体有机碳含量(%),x 为研究站位内样方数。

②滨海盐沼植物地下生物量碳密度

$$VD_b=\frac{\sum_{i=1}^{t}\overline{VD}_{bi}}{t}, \tag{11}$$

$$\overline{VD}_b=\frac{\sum_{i=1}^{x}VB_i\times VC_{bi}}{x}, \tag{12}$$

式中,VD_b 为研究分区滨海盐沼植物地下生物量碳密度(g/cm^2),$\overline{VD}_{bi}$ 为研究分区第 i 个站位地下生物量平均碳密度(g/cm^2),$\overline{VD}_b$ 为研究站位植物地下生物量平均碳密度(g/cm^2),VB_i 为研究站位第 i 个样方单位面积植物地下生物量(g/cm^2),VC_{bi} 为研究站位第 i 个样方植物地下活体有机碳含量(%)。

③滨海盐沼植物生物量碳密度

$$VD=VD_a+VD_b, \tag{13}$$

式中,VD 为研究分区滨海盐沼植物生物量碳密度(g/cm^2)。

2 结果与分析

辽河口滨海盐沼湿地研究区实际调查数据结果见表 2。基于表 2 计算可得,2022 年秋季,辽河口盐地碱蓬区域平均碳密度为 114.83 t/ha,芦苇区域平均碳密度为 77.06 t/ha,光滩区域平均碳密度为 166.46 t/ha;其中盐地碱蓬区域土壤平均碳密度、植物生物量平均碳密度分别为 112.40、2.43 t/ha,芦苇区域土壤平均碳密度、植物生物量平均碳密度分别为 72.60、4.46 t/ha,光滩区域土壤平均碳密度为 166.46 t/ha(表 3)。在辽河口滨海盐沼湿地,区域平均碳密度大小依次为光滩区域>盐地碱蓬区域>芦苇区域,与土壤平均碳密度大小排序相同,这可能是由于光滩区域具有高盐度、相对裸露、少受植被干扰的特性。土壤碳密度是辽河口滨海盐沼湿地碳密度的主要贡献者,占比超过 90%。植物生物量平均碳密度大小为芦苇>盐地碱蓬,其中,植物地上生物量平均碳密度大小为芦苇>盐地碱蓬,植物地下生物量平均碳密度大小为盐地碱蓬>芦苇(表 3)。芦苇地

上生物量平均碳密度约为盐地碱蓬的3倍,这主要是由于芦苇植株高大、生物量丰富。盐地碱蓬地下生物量平均碳密度约为芦苇地下生物量平均碳密度的4倍,地下生物量碳密度与地上生物量碳密度大小截然不同,原因可能是盐地碱蓬有更为发达的根系系统,可积累更多的地下碳储量。由此可见,辽河口滨海盐沼湿地的碳密度分布是一个多维度的复杂系统,其中土壤碳密度占据绝对主导地位,而植物生物量碳密度则因植被类型不同而有所差异。芦苇与盐地碱蓬作为该区域的主要植被类型,凭借各自独特的植株特性,在湿地碳循环中发挥着不同作用。

表2 辽河口滨海盐沼湿地植被生物量、碳含量和土壤有机碳含量

Table 2 Biomass and carbon content of vegetation, and content of soil organic carbon at coastal salt marshes in Liaohe Estuary

研究分区 Investigation region	样方序号 Sample number	地物类型 Land cover type	生物量/g Biomass/g		碳含量/(g/kg) Carbon/(g/kg)		土壤有机碳/% Soil organic carbon/%	
			地上植被 Above-ground vegetation	地下植被 Underground vegetation	地上植被 Above-ground vegetation	地下植被 Underground vegetation	深度0—30 cm Depth 0—30 cm	深度>30—100 cm Depth>30—100 cm
A	1	*Phragmites australis*	761.3	—	418.3	—	0.12	0.14
	2	*P. australis*	1 634	—	405.6	—	0.12	0.18
	3	*P. australis*	1 782.5	—	398.4	—	0.45	0.74
	4	*P. australis*	519.9	—	401.5	—	0.46	0.25
	5	*Suaeda salsa*	86	22.9	282.1	261.5	0.44	0.52
	6	*S. salsa*	229.3	60.5	286.7	263.2	0.32	0.36
B	7	*P. australis*	371.4	—	399.4	—	0.88	1.25
	8	*S. salsa*	172	44.8	255.3	236.8	0.82	1.53
	9	*S. salsa*	157.7	44.2	266.2	244.8	0.54	0.62
	10	*P. australis*	408.5	—	392.1	—	0.22	0.38
	11	*S. salsa*	200.7	51.6	261.5	242.5	0.49	0.65
	12	*S. salsa*	415.7	103.5	258.4	241.1	0.57	0.62
	13	*P. australis*	297.1	—	402.5	—	0.82	0.85
C	14	*S. salsa*	243.7	65.2	247.6	233.2	0.52	0.44
	15	*S. salsa*	387	101.4	252.3	228.7	0.68	0.52
	16	*P. australis*	130	—	401.3	—	0.26	0.34
	17	*P. australis*	352.8	—	405.4	—	0.48	0.86
	18	*S. salsa*	229.3	—	256.3	—	0.74	0.42
D	19	*P. australis*	222.8	—	352.6	—	0.22	0.44
	20	*S. salsa*	1 361.7	258.9	271.4	255.4	1.56	1.52
	21	*S. salsa*	1 075.1	283.6	282.5	260.2	0.82	0.77
	22	*S. salsa*	1 304.4	345.6	269.8	247.5	0.92	0.84
	23	*S. salsa*	587.7	152.3	272.3	251.4	0.86	0.55
	24	*S. salsa*	931.7	244.7	266.5	244.3	1.14	0.95
	25	*S. salsa*	1 677.1	451.6	270.4	249.6	1.33	1.26
	26	Bare land					1.23	0.78
	27	Bare land					1.15	1.48

表3 辽河口滨海盐沼湿地不同地物类型区域平均碳密度

Table 3 Carbon density in different types of coastal salt marsh wetland in Liaohe Estuary　　Unit:t/ha

地物类型 Land cover type	土壤 Soil	植物地上生物量 Vegetation aboveground biomass	植物地下生物量 Vegetation underground biomass	合计 Total
Suaeda salsa	112.40±52.80	1.60±1.46	0.83±1.17	114.83
Phragmites australis	72.60±55.70	4.27±2.13	0.19±0.10	77.06
Bare land	166.46±47.78			166.46

3 讨论

3.1 辽河口滨海盐沼湿地不同地物类型区域的碳密度对比

张广帅等[14]2020年11月对辽河口养殖圩堤附近滩涂和退养还湿后盐沼湿地碳库的研究结果显示,盐地碱蓬群落土壤固碳能力最强,其次为光滩,芦苇群落最低。本研究中芦苇群落土壤固碳能力低于二者,与张广帅等[14]的研究结果一致;而光滩区域平均碳密度大于盐地碱蓬区域,与该文献研究结果不同。这种不一致性可能源于多方面因素的综合作用,其中,本研究的样本采集数量不均衡是较为关键的原因。本研究采样站点数量分布为盐地碱蓬区域(15个站点)>芦苇区域(10个站点)≫光滩区域(2个站点),样本量分布不均衡可能导致统计结果出现偏差,特别是当特定区域的土壤特性、植被覆盖度或微环境条件存在显著差异时,少量代表性不强的样本可能会显著影响整体碳密度的估算,后续研究将更加注重样本采集的均衡性和代表性,鉴别排除异常数据。本研究中盐地碱蓬地上生物量碳密度最大值为3.06 t/ha,最小值为0.14 t/ha,其中最小值与张广帅等[14]研究中报道的0.17 t/ha较为接近。

3.2 辽河口滨海盐沼湿地不同植被类型区域的碳密度差异

不同盐沼湿地植被类型是影响土壤有机碳储量分布的重要因素,而光滩区域土壤有机碳储量分布主要受潮汐与沉积作用的影响。辽河口滨海盐沼湿地植被群落分布格局受到地形高程的显著影响,随着河口湿地高程降低,依次分布有芦苇群落、高密度碱蓬群落、中密度碱蓬群落、低密度碱蓬群落、光滩。研究区内芦苇群落分布的高程范围是1.0−5.0 m,平均高程为2.87 m;高密度碱蓬群落分布的高程范围是1.0−3.0 m,平均高程为2.02 m;中密度碱蓬群落分布的高程范围是1.0−2.0 m,平均高程为1.21 m;低密度碱蓬群落分布的高程范围是0.5−1.0 m,平均高程为0.68 m;光滩的高程范围是0−0.7 m,平均高程为0.43 m。土壤沉积物碳密度大小依次为光滩区域>碱蓬区域>芦苇区域,与植物群落高程分布趋势相反。

根据本研究实际调查情况,研究区盐地碱蓬群落平均密度为285株/m^2,平均株高为25.4 cm,平均盖度为47%;芦苇群落平均密度为38株/m^2,平均株高为147.6 cm,平均盖度为62%。盐地碱蓬群落的平均密度明显高于芦苇群落,但芦苇凭借其较高的株高和较大的盖度在三维空间上占据更广阔的生态位,从而可能更有效地捕获和利用光能进行光合作用,进而积累更多的生物碳,因此芦苇群落的植物地上生物量平均碳密度显著高于盐地碱蓬。

3.3 与其他滨海盐沼湿地的碳密度比较

与全国盐沼湿地碳密度及其他地区盐沼湿地碳密度进行比较,发现本研究中区域土壤碳密度较全国盐沼湿地[16]和江苏盐城滨海盐沼湿地[17]土壤碳密度略低,但高于杭州湾北岸鹦鹉洲盐沼恢复湿地[18];植物生物量碳密度较全国平均水平偏低,但盐地碱蓬地上生物量碳密度较莱州湾滨海湿地的大[19]。根据莱州湾滨海湿地植被碳储量研究结果,莱州湾滨海湿地分布有柽柳(*Tamarix chinensis*)、盐地碱蓬及混生群落,植被生物量为949.0 g/m^2,植被碳密度为3.9 t/ha,该区域碱蓬群落碳密度约为0.4 t/ha[19]。江苏盐城滨海盐沼湿地0−100 cm深度沉积物有机碳密度为23.07 kg/m^3(按1 m深度计算,约230.7 t/ha),不同盐沼群落沉积物有机碳密度排序为芦苇>互花米草(*Spartina alterniflora*)>盐地碱蓬[17]。杭州湾北岸鹦鹉洲盐沼恢复湿地土壤碳密度为71.70 t/ha,植被碳密度为11.79 t/ha[18]。崇明东滩盐沼湿地土壤碳储空间分布特征表现为高潮滩芦苇带>中潮滩互花米草带>低潮滩海三棱藨草(×*Bolboschoenoplectus mariqueter*)带>光滩[20],与本

研究中不同植被群落土壤碳密度随高程变化趋势相反。这些差异很大程度上是受区域位置和潮汐等的影响，不同地区的土壤类型和质地存在显著区别，直接影响土壤对有机碳的储存能力。

3.4 不同排放情景下的盐沼碳排放

IPCC 第五次评估报告构建的气候情景框架包含 4 种典型浓度路径（Representative Concentration Pathways，RCPs），按 2100 年辐射强迫增量由高到低排序分别为 RCP8.5、RCP6.0、RCP4.5、RCP2.6，分别代表在相应排放路径下，至 2100 年温室气体浓度所导致的辐射强迫相对于工业化前水平的增量达到约 8.5、6.0、4.5、2.6 W/m^2 的情景。在 RCP8.5 情景下，化石能源消费强度大且没有任何减排措施，21 世纪末全球平均气温会比工业革命前上升 5 ℃，全球海平面相比 1986－2005 年平均上升约 0.84 m（上升范围为 0.61－1.10 m）；在 RCP2.6 情景下，通过采取有效方式应对气候变化，温室气体排放可显著下降，到 21 世纪末，全球表面平均温度相较 1986－2005 年将上升 0.3－1.7 ℃，全球海平面相比 1986－2005 年平均上升约 0.43 m（上升范围为 0.29－0.59 m）[21]。在气候变暖的不同情景下，全球海平面将呈现上升趋势。结合 RCP8.5 和 RCP2.6 情景，对本研究辽河口研究区域滨海盐沼碳损失进行粗略估算分析，其中高、中和低密度碱蓬群落分别按占比 30％、40％和 30％估算。光滩是一种较为特殊的滨海盐沼类型，当光滩被淹没时，土壤和植被中的碳元素可能会溶解进入海水中。虽然这并不意味着碳完全从生态系统中流失，但其存在形式和储存位置发生了变化，从而成为海洋碳循环的一部分。此外，沉积物的覆盖与压实等物理过程也可能影响光滩在淹没状态下的碳储存和释放行为。这些过程都可能减缓有机质的分解速率，从而减少碳排放，因此光滩被淹对碳储量的影响是复杂且多变的，取决于多种因素的综合作用。在此仅对光滩产生碳损失作讨论。

估算结果表明，RCP8.5 情景下，本研究涉及的辽河口滨海盐沼湿地研究区各地物类型均将受到严重影响，光滩和低密度碱蓬区域几乎全被淹没，中、高密度碱蓬及芦苇区域将受到不同程度的淹没影响，总的碳损失速率约为 217 t/ha，与目前相比，碳密度损失比例将超 60％；在 RCP2.6 情景下光滩区域绝大部分将被淹没，低密度碱蓬区域也有相当一部分面积将受到影响，估算总碳损失速率约为 173 t/ha，与目前相比，碳密度损失比例将接近 50％（表 4）。可见，不论何种排放情景，海平面上升都将导致滨海盐沼湿地碳储量显著降低，这更凸显了开展海洋生态环境保护修复的重要性与必要性。

表 4 不同排放情景下盐沼碳排放分析

Table 4 Carbon emissions from salt marshes under different emission scenarios

排放情景 Emission scenario	海平面上升平均值（可能范围）/m Average sea level rises (possible range)/m	地物类型 Land cover type	高程平均值（可能范围）/m Average salt marshes elevation (possible range)/m	受影响比例/％ Proportion affected/％	碳损失/(t/ha) Carbon loss/(t/ha)
RCP8.5	0.84 (0.61－1.10)	Bare land	0.43 (0－0.70)	100	166.5
		Low-density *Suaeda salsa* community	0.68 (0.50－1.00)	100	34.4
		Medium-density *S. salsa* community	1.21 (1.00－2.00)	20	9.2
		High-density *S. salsa* community	2.02 (1.00－3.00)	10	3.4
		Phragmites australis community	2.87 (1.00－5.00)	5	3.9
RCP2.6	0.43 (0.29－0.59)	Bare land	0.43 (0－0.70)	90	150.0
		Low-density *S. salsa* community	0.68 (0.50－1.00)	20	23.0

4 结论

辽河口滨海盐沼湿地碳密度研究结果表明，不同植物群落的生物量碳密度呈现较大差异。光滩区域、盐地碱蓬区域和芦苇区域的平均碳密度分别为 166.46、114.83 和 77.06 t/ha，呈现出光滩区域＞碱蓬区域＞芦苇区域的趋势。该分布特征与盐沼植物群落的高程分布趋势相反。尽管芦苇群落在株高和盖度上均显著高于盐地碱蓬群落，但芦苇区域平均碳密度却低于光滩和盐地碱蓬区域，这可能与植物碳分配格局及土壤理化性质差异有关。与其他滨海盐沼湿地对比研究表明，本研究的区域土壤碳密度处于国内中等水平，但植被碳密度则处于全国偏低水平。基于 RCP8.5 和 RCP2.6 两种情景的模拟研究表明，海

平面上升将对该区域滨海盐沼湿地的碳密度产生显著影响,预计碳密度将减少约50%甚至更高。因此,海洋生态环境保护与修复工作已刻不容缓,需要采取积极措施应对气候变化对滨海湿地生态系统的影响。

参考文献

[1] 张继红,刘毅,吴文广,等.海洋渔业碳汇项目方法学探究[J].渔业科学进展,2022,43(5):151-159.

[2] 仲启铖,王开运,周凯,等.潮间带湿地碳循环及其环境控制机制研究进展[J].生态环境学报,2015,24(1):174-182.

[3] MCLEOD E,CHMURA G L,BOUILLON S,et al. A blueprint for blue carbon:toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO_2[J]. Frontiers in Ecology and the Environment,2011,9(10):552-560.

[4] 周金戈,覃国铭,张靖凡,等.中国盐沼湿地蓝碳碳汇研究进展[J].热带亚热带植物学报,2022,30(6):765-781.

[5] 曹磊,宋金明,李学刚,等.中国滨海盐沼湿地碳收支与碳循环过程研究进展[J].生态学报,2013,33(17):5141-5152.

[6] MENG W Q,FEAGIN R A,HU B B,et al. The spatial distribution of blue carbon in the coastal wetlands of China [J]. Estuarine Coastal and Shelf Science,2019,222:13-20.

[7] XU X,LIU H,LIU Y Z,et al. Human eutrophication drives biogeographic salt marsh productivity patterns in China [J]. Ecological Applications,2020,30(2):e02045.

[8] WANG F M,SANDERS C J,SANTOS I R,et al. Global blue carbon accumulation in tidal wetlands increases with climate change [J]. National Science Review,2021,8(9):nwaa296.

[9] LI J G,PU L J,ZHU M,et al. Evolution of soil properties following reclamation in coastal areas:a review [J]. Geoderma,2014,226/227:130-139.

[10] 王金爽.湿地生态修复技术研究进展[J].农业科技与装备,2019,9:13-15.

[11] 刘炳亮,苏金豹,马建章.建设渤海跨海通道的生态影响述评[J].海洋科学,2023,47(1):108-118.

[12] 张江泉,郑崇伟,李荣川,等.黄渤海风、浪、流等海洋水文要素特征分析[J].能源与环境,2013,31:112-115.

[13] YIN H Y,HU Y M,LIU M,et al. Ecological and environmental effects of estuarine wetland loss using keyhole and landsat data in Liao River delta,China [J]. Remote Sensing,2021,13(2):311.

[14] 张广帅,蔡悦荫,闫吉顺,等.滨海湿地碳汇潜力研究及碳中和建议:以辽河口盐沼湿地为例[J].环境影响评价,2021,43(5):18-22.

[15] 索安宁,赵冬至,张丰收.我国北方河口湿地植被储碳、固碳功能研究:以辽河三角洲盘锦地区为例[J].海洋学研究,2010,28(3):67-71.

[16] 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.

[17] 彭修强,闫玉茹,孙祝友,等.江苏盐城滨海盐沼湿地沉积物有机碳含量及碳储量研究[J].海洋通报,2023,42(3):407-417.

[18] 杜明卉,李昌达,杨华蕾,等.海岸带蓝碳生态系统碳库规模与投融资机制[J].海洋环境科学,2023,42(2):294-301.

[19] 谢琳萍,王敏,王保栋,等.莱州湾滨海柽柳林湿地植被碳储量的分布特征及其影响因素[J].应用生态学报,2017,28(4):1103-1111.

[20] 陈怀璞,张天雨,葛振鸣,等.崇明东滩盐沼湿地土壤碳氮储量分布特征[J].生态与农村环境学报,2017,33(3):242-251.

[21] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate change 2014:impacts,adaptation,and vulnerability:part A:global and sectoral aspects [M]. Cambridge:Cambridge University Press,2014.

Assessment of Carbon Density in Typical Areas of Coastal Salt Marshes:A Case Study of Liaohe Estuary of the Bohai Sea

WU Yidan[1,2],SONG Shasha[1,2**],ZHAO Jianping[1,2],ZHANG Qingfan[1,2],AN Wei[1,2],ZHANG Guangshuai[3]

(1. CNOOC Energy Development Co. Ltd. Safety and Environmental Protection Branch,Tianjin,300452,China;2. Key Laboratory for Safety & Environmental Protection of Offshore Oil Field,CNOOC Energy Development Co. Ltd. Tianjin,300450,China;3. National Marine Environmental Monitoring Center,Dalian,Liaoning,116023,China)

Abstract:To analyze the carbon density characteristics of coastal salt marshes and evaluate the current status of carbon density. An on-site survey was carried out in the typical coastal salt marshes in the Liaohe Estuary area of the Bohai Sea. According to the vegetation types,ecological characteristics,and topographic changes of salt marshes,27 sampling points were selected to determine the biomass and organic carbon content of vegetation and soil samples. The carbon densities of different types of soil and vegetation were calculated,and the carbon density status and changes of salt marshes were estimated. The results indicated that the carbon density in the study area followed the descending order of bare land,*Suaeda salsa* area,and *Phragmites australis* area,which showed the average carbon densities of 166. 46,114. 83,and 77. 06 t/ha,respectively. Sea level rise caused by climate change greatly reduced the carbon sink of coastal wetlands. The findings provide basic support for wetland protection and carbon cycle research and have potential reference value for the achievement of regional carbon neutrality.

Key words:coastal salt marsh;carbon sink assessment;Liaohe Estuary;wetland;carbon density

责任编辑:梁　晓