

杭州湾南岸滩涂湿地多年蓝碳分析及情景预测

王珊珊^{1*},徐明伟²,韩宇¹,曹公平¹,黄惠明² (1.浙江省水利河口研究院(浙江省海洋规划设计研究院),浙江 杭州 310020; 2.河海大学港口海岸与近岸工程学院,江苏 南京 210024)

摘要: 选取 2003 年、2017 年杭州湾南岸遥感数据,利用 ENVI 软件和 ArcGIS 进行空间校正和图像处理,获得海岸带湿地数据,基于 InVEST 模型研究杭州湾南岸 15 年间滩涂湿地蓝碳及其价值的变化.结果显示:(1)2003~2017 年总碳储存量和单位面积碳储量最大值均呈上升趋势,总碳储存量由 0.223 亿 t 上升到 0.765 亿 t,增加 0.542 亿 t.单位面积碳储量最大值也由 451.27t/hm² 上升到 1775.42t/hm²,湿地碳汇潜力增加.(2)2003~2017 年研究区域无碳损失,总体表现为碳积累,蓝碳总量为 0.543 亿 t,单位面积净碳固定最大值为 1324.12t/hm².(3)2003~2017 年 15 年间杭州湾南岸海岸蓝碳总价值为 4761.3 亿元,单位面积蓝碳最大值为 148.8 万元,具有十分可观的生态价值.(4)滩涂蓝碳的储量同植被类型关系密切,研究区域芦苇作为优势种类,在提高本区域固碳能力中作用最大.(5)在预设的退塘还湿情景下,预测至 2030 年研究区固碳量和蓝碳价值增加明显.

关键词: 杭州湾; 滩涂湿地; 生态系统服务; 海岸蓝碳; InVEST 模型

中图分类号: X37 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2022)09-4380-09

DOI:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2022.0160

Analysis and scenario prediction of multi-year blue carbon in intertidal wetland on the south bank of Hangzhou Bay. WANG Shan-shan^{1*}, XU Ming-wei², HAN Yu¹, CAO Gong-ping¹, HUANG Hui-ming² (1.Zhejiang Institute of Hydraulics & Estuary (Zhejiang Institute of Marine Planning and Design), Hangzhou 310020, China; 2.College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China). *China Environmental Science*, 2022,42(9): 4380~4388

Abstract: This study was based on the remote sensing images of the south bank of Hangzhou Bay. We used ENVI and ArcGIS for spatial correction and processing of these images and obtained the coastal wetland datasets. InVEST model was performed to analyze the change of blue carbon of intertidal wetland and its evaluation during the past 15 years on the south bank of Hangzhou Bay. The results showed that (1) From 2003 to 2017, there were escalating trends for total carbon storage and maximum carbon storage per unit area, the total carbon storage increased from 22 million tons to 76 million tons, and the net carbon storage increased by 54.3 million tons. The maximum carbon storage per unit area increased from 451.27t/hm² to 1775.42t/hm². As a whole, the potential of wetland carbon sink was increased on the south bank of Hangzhou Bay. (2) From 2003 to 2017, there was no carbon loss, and the overall performance was carbon accumulation on the south bank of Hangzhou Bay. The total amount of blue carbon was 54 million tons, and the maximum net carbon fixation per unit area was 1324.12t/hm². (3) From 2003 to 2017, the total value of blue carbon was 476.13 billion yuan on the south bank of Hangzhou Bay, and the maximum value of blue carbon per unit area was 1.488 million yuan, which was a considerable ecological value. (4) As the storage of blue carbon in the intertidal is closely related to the vegetation type, *Phragmites australis* plays the most prominent role in improving the carbon sequestration capacity because it's the dominant species on the south bank of Hangzhou Bay. (5) Under the preset scenario of returning aquaculture ponds to wetlands, it is predicted that the carbon sequestration and blue carbon value will significantly increase on the south bank of Hangzhou Bay by 2030.

Key words: Hangzhou Bay; intertidal wetland; ecosystem services; coastal blue carbon; InVEST model

“蓝碳”是相对于陆地植被“绿碳”而言的,全球自然生态系统通过光合作用所固定的碳中约 55% 为“蓝碳”^[1].通常情况下海岸带蓝碳指由滨海湿地和盐沼、红树林、海草床等生态系统从大气的 CO₂ 吸收转化并长期保存到土壤中所固定的碳.海岸带作为连接陆地和海洋的特殊区域,拥有巨大的碳汇潜力,面积仅占海洋面积的 0.2%,但固碳量却约占全球海洋碳储量的一半^[2-3].蓝碳对缓解气候变暖、减少

温室气体排放具有重要作用,是实现碳减排的可行路径.研究表明,滨海湿地作为温室气体减排增汇的重要区域,年碳埋藏量可达 237.6Tg/a^[4],远高于深海碳埋藏速率,同时也高于陆地碳汇.

收稿日期: 2022-02-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42076178),浙江省水利科技计划项目(RC2064)

* 责任作者, 教授级高级工程师, shanshwang2017@163.com

近年来,全世界对于减碳、固碳的需求明显增加,作为温室气体减排增汇的重要区,近岸河口滩涂湿地固碳能力的量化具有重要的意义.章海波等^[5]阐述了盐沼、红树林和海草床这3种生态系统固碳的机制和特征,并在此基础上,分析了海岸带系统中不同形态碳的交换和输送,探讨了海岸带固碳量对全球碳循环的影响.唐剑武等^[6]扩大海岸蓝碳的概念,在盐沼、红树林和海草床的基础上,又提出来广义上的蓝碳,在三种生态系统上又增加了浮游植物的微型生物碳泵和藻类、贝类生物的渔业碳汇等的固碳作用,提出了以碳收支的监测、模拟实验和模型研究的蓝碳研究方法以及蓝碳在海岸带生态保护和恢复中的应用.Kara 等^[7]量化研究了美国佛罗里达州坦帕湾16个盐沼、盐荒地和红树林的有机碳储量,发现有机碳含量随深度迅速下降,且数值低于全球平均水平,这可能跟坦帕湾的地理位置和栖息地转换有关.隋玉正等^[8]采用 InVEST 模型对胶州湾海岸带湿地数据变化下的蓝碳总量变化以及碳汇潜能价值变化等进行了模拟和计算,研究发现20年间蓝碳总量呈减少趋势.王亚丽等^[9]以广西珍珠湾为例,利用²²²Rn示踪技术估算了红树林海湾在枯季携带的碳通量,发现溶解无机碳和溶解有机碳是该区域海岸带蓝碳收支和生物地球化学循环中的重要组成.李森等^[10]以鳌江口海岸带红树林湿地为研究对象,通过 CH_4 和 CO_2 通量动态变化发现红树林植被的生物量对恢复区固碳增汇功能发挥有至关重要的作用,而不同林龄是影响红树林恢复区蓝碳通量的重要因素.Lee 等^[11]通过实地调查和遥感技术研究了韩国潮间带的有机碳储量和封存率,揭示了韩国潮滩的蓝碳潜力.戴子熠等^[12]基于《2006年IPCC国家温室气体清单指南目录》方法,对广西红树林湿地30年蓝碳储量变化进行了定量计算分析.Zheng^[13]通过实地调查和实验室分析,研究了盐城滩涂湿地典型植物群落中有机碳(OC)含量的变化,并构建了碳埋率和经济价值模型,分析了碳汇价值的构成.Lindsey 等^[14]分析了 Tampa Bay 湿地变化以及蓝碳储量的变化,并提出了相关的生态措施.Doughty 等^[15]研究了气候变化引起 Tampa Bay 红树林的扩张,研究发现红树林向盐沼的扩张可能会极大地改变沿海湿地的碳储存能力,导致全球陆地碳储量的显著增加.

近年来,随着杭州湾两岸滩涂围垦、填海造陆等人类活动的加剧,海岸带滩涂湿地面积不断减少,加上外来物种的入侵等问题的长期存在,物种的单一化等环境问题也日益突出^[16-18],这给杭州湾两岸生态环境造成了很大的压力.因此诸多学者开展了相关的研究.邵学新等^[16-17]研究了杭州湾湿地3种优势植物碳储量及其特征,并分析土壤中有机碳含量及其分布格局等.李楠等^[18]基于4年遥感数据和社会统计数据,对杭州湾滨海湿地生态系统的服务功能进行了计算,发现城市建设、过度围垦是生态系统价值降低的主要驱动因素.今后如何科学、合理的开发利用滩涂资源,高效恢复滩涂湿地的碳汇能力和潜力、制定碳减排的措施必将是重点关注的内容.基于此,本文主要采用 InVEST 模型,模拟分析区域滩涂湿地海岸蓝碳变化及其影响因素,为高效恢复滩涂湿地的碳汇能力提供参考.

1 材料与方法

1.1 研究区域

杭州湾位于浙江省的东北部,是钱塘江入东海形成的喇叭状河口湾.杭州湾西起浙江海盐县澉浦镇和上虞区之间的曹娥江丰收闸断面,东至扬子角到镇海角连线,与舟山、北仑港海域为邻;西接绍兴市,东连宁波市,北接嘉兴市、上海市.杭州湾滨海湿地位于杭州湾南岸滩涂淤涨最快的区段.本文选取西起余姚市,东至慈溪市,南从2003年滩涂与陆地交界处,北到2017年滩涂与海水交界处的区域为蓝碳研究区域,总面积约为 556.85km^2 (包含陆地和海水面积)(图1).

1.2 数据及方法

1.2.1 不同时期海岸带湿地类型信息的提取及研究对象的确定 杭州湾南岸人类活动剧烈,滩涂围垦、填海造陆,包括自然岸滩的淤积使得南岸岸线变化较快,因此考虑到数据的清晰性和可获取性,本文选取2003年和2017年的遥感数据,利用 ENVI 软件进行空间校正和图像处理,以2003年岸线为陆边界,2017年6m等深线为外边界,得到研究区域主要存在滩涂湿地和海水养殖场两种湿地类型^[19],除此之外研究区域还有人造陆地、水体两种土地利用类型(图2).

杭州湾海岸湿地以盐沼湿地为主,没有红树林和海草床,而光滩的固碳功能有限,因此海三棱藨草、互花米草和芦苇作为主要的湿地植被类型参与

蓝碳计算和分析.海岸地区的渔业碳汇作为“遗漏的碳汇”也是海岸带蓝碳的重要组成部分^[20].杭州湾的渔业碳汇主要为海产贝类养殖,因此本文还考虑了

海水养殖区域.最终,本文以海三棱蔗草、互花米草、芦苇和海水养殖这4种典型的海岸带湿地碳汇主要因素开展计算.

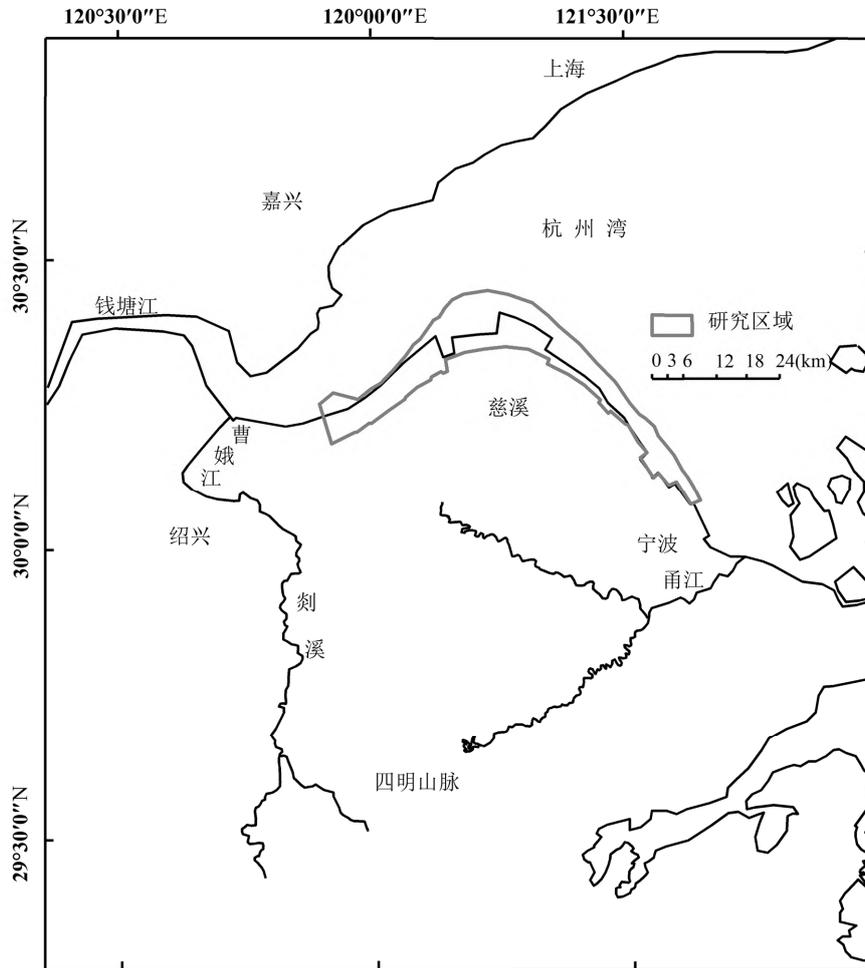


图1 研究区域及蓝碳计算范围示意

Fig.1 Study area and the calculation range of blue carbon

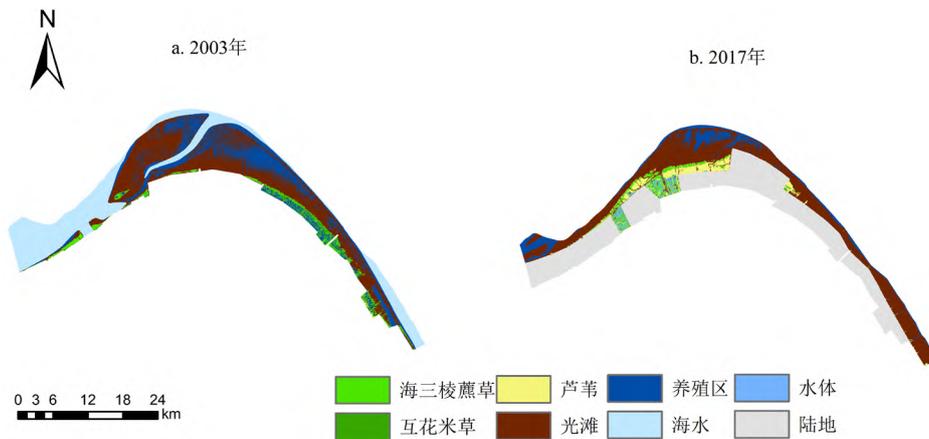


图2 2003年和2017年杭州湾海岸带类型

Fig.2 Coastal zone types of Hangzhou Bay in 2003 and 2017

2003~2017 年杭州湾海岸湿地内,海三棱藨草、互花米草、光滩、养殖区面积在减小(表 1),从总面积来看,湿地总面积是减小的,15 年间总面积减少了 8883.63hm²,下降 23.7%,年平均下降 567.3hm²,年平均下降率为 1.5%。这主要与海岸滩涂围垦有关,根据《宁波市滩涂围垦造地规划(2011—2020)》,仅在 2011~2020 年,宁波新建围垦工程面积约 5 万 hm²,其中主要用于工业开发^[21]。

2010 年国家海洋局启动“长江口、杭州湾海洋生态环境修复工程”项目。依托该项目,杭州湾南岸划出海岸生态防护带作为植物筛选区,种植芦苇等植物,因此杭州湾南岸滩涂湿地的芦苇面积在 2003~2017 年的 14 年内增加了 2732.67hm²。根据统计,虽然杭州湾 3 种优势高固碳植物中海三棱藨草和互花米草的面积减小,但是芦苇面积增大,因此 3 种植物的总面积有所增大(表 1)。

表 1 杭州湾不同类型湿地面积及其变化(hm²)

Table 1 The area and its change of different types of wetlands in Hangzhou Bay (hm²)

时间	海三棱藨草	互花米草	芦苇	光滩	养殖区	总面积
2003	2410.47	685.62	112.05	21275.55	13029.21	37512.90
2017	1836.81	113.04	2844.72	19126.98	4707.72	28629.27
2003~2017	-573.66	-572.58	2732.67	-2148.57	-8321.49	-8883.63
面积变化率(%)	-23.8	-83.5	2438.8	-10.1	-63.9	-23.7

1.2.2 滩涂湿地蓝碳计算和模拟 生态系统服务和权衡的综合评估模型 InVEST 模型由美国斯坦福大学、大自然保护协会与世界自然基金会在 2007 年联合开发,广泛应用于区域生态系统服务功能评估,主要包括水源供给、水土保持、生境质量、陆地碳储存、蓝碳等多种模块,此模型还可与 GIS 技术相结合,实现生态系统服务功能定量评估的空间化^[22]。

InVEST 海岸蓝碳模型利用海岸地区土地利用覆被和碳库数据,通过空间叠加计算得到相关的信息。蓝碳模型建立一个碳库,将地上与地下生物量合并为生物量碳库,枯落物碳库因数据缺少且不易获取,故在本文中不作考虑。

“渔业碳汇”主要指贝壳类生物等在吸收海水中悬浮颗粒有机碳,形成含钙化合物的贝类躯壳和个体软组织的生长中进行的生物固碳。海岸地区的

渔业碳汇也是海岸带蓝碳的重要组成部分。生物量碳库和土壤碳库数据参考文献[8,16-17]的研究。

杭州湾贝类养殖主要为青蛤,生物量受季节影响,冬、春两季生物量较低,夏、秋两季生物量较高(表 2),根据张继红等^[25]的研究,生物量碳库和土壤碳库的比是 2:3,由此根据已知的生物量碳库可以推算出土壤碳库。生物量碳积累率和土壤碳积累率分别参考文献[24,26]的研究(表 2)。

表 2 杭州湾海岸带动植物碳库
Table 2 Carbon pools of coastal plants and animals in Hangzhou Bay

海岸带生物类型	生物量初始碳储量(t/hm ²)	生物量碳积累率[t/(hm ² ·a)]	土壤初始碳储量(t/hm ²)	土壤碳积累率[t/(hm ² ·a)]
海三棱藨草	2.63	2.74	67.18	3.80
互花米草	18.41	18.55	89.62	5.30
芦苇	18.01	18.77	104.95	7.00
青蛤	8.89	1.10	13.34	0.39

1.2.3 海岸带蓝碳价值系数 (1)碳排放价格.不同国家和地区碳排放价格有明显差异,总体来看,欧洲国家碳税价格较高,其中冰岛、芬兰、挪威、法国等国家的碳税价格在 40~73 美元/t 之间;部分美洲和非洲国家碳税的价格较低,例如阿根廷、哥伦比亚、智利、墨西哥、南非等国家的碳税价格普遍低于 10 美元/t;美国的碳税为 15 美元/t.中国以 1990 年不变价格(约 32.6 美元/t)计算的造林成本费用来代替固碳价格.本文采用瑞典碳税法,数值为 150 美元/t^[27],以 1997 年为基础转化为人民币时需乘以当年汇率 8.27,即为 1240.5 元/t. (2)通货膨胀率.通货膨胀率反映的是碳固定价格随时间发生的变化.随着社会经济的发展,货币会发生通货膨胀,碳税的价格也会随之发生波动,因此在进行碳税计算时要考虑通货膨胀因素.本文通货膨胀率数值参考中国国家统计局多年的平均值 2.4%.(3)贴现率.贴现率指的是将未来利益改变为现在利益所产生的折扣.较低的贴现率注重于当前,趋向于当前采取措施,但会损害未来的利益,较高的贴现率注重于未来,趋向于在未来采取措施,从而会缩小未来的损失.目前的文献资料中贴现率一般取 1.95%~6%之间^[28],根据我国生态文明建设政策,在注重环境保护的前提下,宜采用较低的贴现率,但在我国快速经济发展条件下,过低的贴

现率不利于经济发展,不符合现行的经济政策.因此,本文的贴现率取中间值 4%.

2 结果与分析

2.1 碳存储

2003年研究区的年总固碳量约为0.223亿t,其中养殖区固碳量大约为0.118亿t,占整个湿地固碳量的53.1%,其次为海三棱藨草的固碳量大约为0.069亿t,占总固碳量的30.8%,互花米草固碳量大约为0.030亿t,芦苇固碳量大约为0.006亿t,分别占固碳量的13.6%和2.5%(表3).从2003~2017年,研究区域存在持续的

固碳效应,至2017年,研究区总固碳量大约为0.765亿t,其中芦苇的固碳量为0.426亿t,占总固碳量的55.7%,其次为养殖区,固碳量为0.215亿t,固碳占比28.1%,海三棱藨草和互花米草的固碳量分别为0.088亿t和0.036亿t,占比分别为11.5%和4.7%(表3).

就碳存储的空间分布而言,2003年,高固碳区域主要分布在近岸以及滩涂中部(图3a),至2017年,高固碳区域位于研究区中部(图3b),从实际位置而言,由于岸线外移,高固碳区域仍然靠近新形成的岸线,位于高滩之上,单位面积的碳储量可以达到1621.89~1775.42t/hm²(图3).

表3 2003~2017年杭州湾南岸滩涂湿地固碳量及碳累积量

Table 3 Carbon sequestration amount of wetland on the south bank of Hangzhou Bay from 2003 to 2017

项目	海三棱藨草		互花米草		芦苇		养殖区		总固碳量 (亿 t)	单位面积最大固 碳量(t/hm ²)	单位面积平均固碳 量(t/hm ²)
	固碳量 (亿 t)	占比 (%)									
固碳量(2003年)	0.069	30.8	0.030	13.6	0.006	2.5	0.118	53.1	0.223	451.27	593.28
固碳量(2017年)	0.051	21.0	0.005	2.1	0.143	59.2	0.043	17.7	0.241	451.30	841.20
2003~2017 碳存储量	0.088	11.5	0.036	4.7	0.426	55.7	0.215	28.1	0.765	1775.42	2672.57
2003~2017 碳累积量	0.019	3.6	0.006	1.0	0.421	77.5	0.097	17.9	0.543	1324.12	1895.19

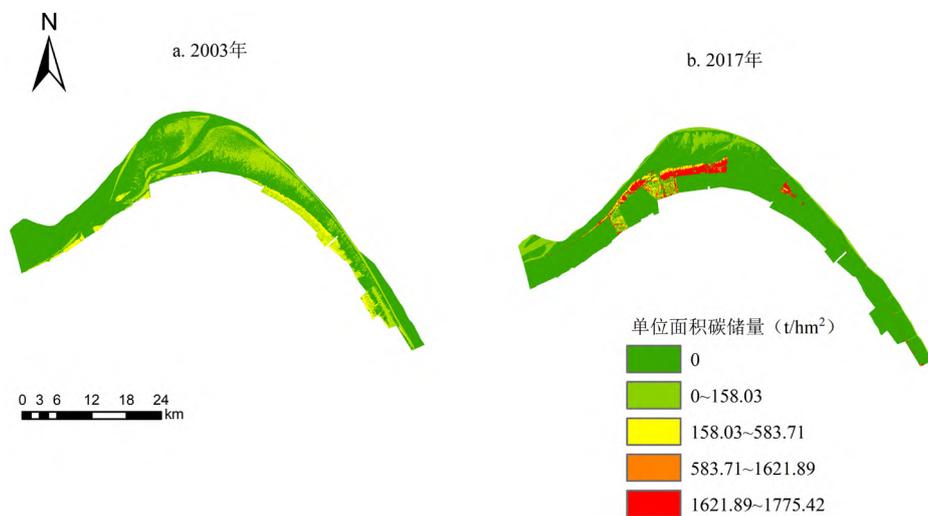


图3 2003年和2017年单位面积碳存储分布

Fig.3 Distribution of carbon storage per unit area in 2003 and 2017

2.2 碳累积和净碳固定

海岸带湿地净碳固定计算的模式为:净碳固定=碳积累-碳损失.研究区域无碳损失,因此净碳固定值就等于碳积累值.2003~2017年湿地总碳累积量为0.543亿t(表3,图4),单位面积碳累积量最小值为0,最大值为1324.12t/hm²(图4a).就空间分布而言,碳累

积主要发生在湿地中部靠近陆地的一侧,最高值也分布在此区域(图4a).从土地类型而言,高碳累积区的土地类型主要为湿地植物,芦苇为区域固碳能力最强的植物类型,而且芦苇等湿地植物的土壤和生物碳积累率高,加之2003~2017年芦苇面积增加了2732.67hm²,增幅达2438.8%,与2003年相比增加了

23 倍多(表 1),其中芦苇的碳累积量占总湿地碳累积量的 77.5%,达到 0.421 亿 t,其次为养殖区,碳累积量占湿地总碳累积量的 17.9%,为 0.097 亿 t,海三棱蔗

草和互花米草的占比较小,分别约为 3.6%和 1.0%(表 3)。因此,14 年间,碳在杭州湾南岸的滩涂湿地得到了有效的积累。

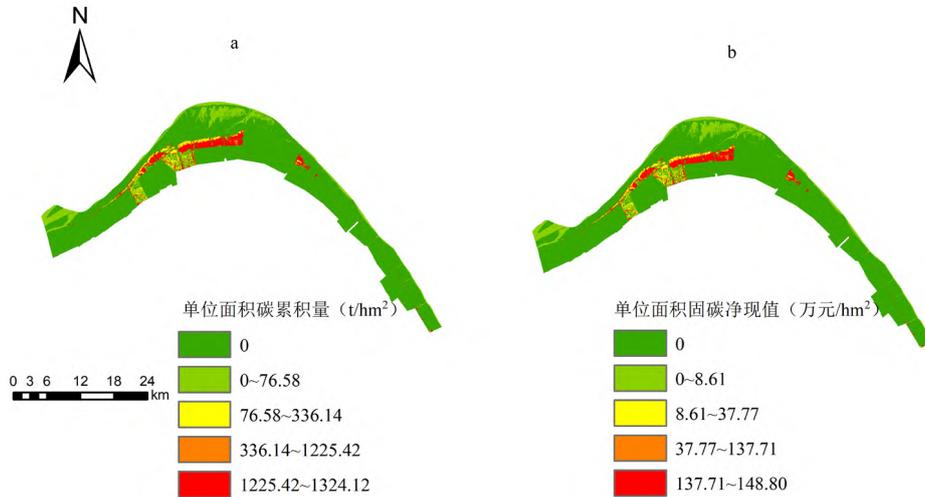


图 4 2003~2017 年单位面积碳累积量和碳固定净现值分布

Fig.4 Distribution of fixed net present value of carbon per unit area from 2003 to 2017

2.3 固碳净现值

2003~2017 年湿地固碳净现值,即海岸带蓝碳价值,为 4761.3 亿元,约为 2017 年宁波市生产总值(9846.9 亿元)的 48%,单位面积固碳净现值最大值为 148.8 万元/hm²,最大值主要分布在湿地的中部以及西南和东南的部分区域(图 4b),这些区域主要为芦苇湿地,因芦苇的固碳能力在所有湿地植物中为最强,所以芦苇湿地具有最大固碳净现值。

对比杭州湾海岸湿地 3 种优势植被海三棱蔗草、互花米草和芦苇,海三棱蔗草和互花米草的面积在减少,而芦苇的面积在增加,且芦苇的生物量和土壤碳储量约为 123t/hm²,积累率约为 26t/(hm²·a),在所有植被中最高,因此芦苇的固碳量大,蓝碳价值高。因此,为达到碳中和的目标,又满足经济发展的需求,在有限的滩涂湿地中种植芦苇是优选方法。

3 讨论

3.1 滩涂湿地蓝碳储存能力比较

本文中,杭州湾南岸滩涂湿地的年碳储存在 2017 年为 0.241 亿 t,单位面积平均固碳量为 841.20t/hm²,相比较于其他区域,例如盐城市沿海滩涂湿地植物群落面积为 46802.2hm²,碳储存量为 0.0031 亿 t,单位面积平均固碳量为 6.67t/hm²[29];

宁波市海岸带植物群落面积为 12057.48hm²,总固碳量为 0.0013 亿 t,单位面积平均固碳量为 10.58t/hm²[30];胶州湾海岸带湿地单位面积平均净固碳量最大值为 247t/hm²[8]。杭州湾南岸滩涂湿地固碳能力远超前于其他区域滩涂湿地的固碳能力,且固碳量大。杭州湾南岸滩涂湿地固碳能力和固碳潜力巨大。

3.2 湿地类型对固碳的影响

空间分布上,无论是碳储存还是碳累积,2003 和 2017 年的高值主要分布在沿陆地一侧(图 5),该区域为海三棱蔗草、互花米草、芦苇等高固碳植物群落分布区域(图 2)。年碳存储量计算得到,2003 年碳储存为 0.223 亿 t,2017 年碳储存为 0.241 亿 t,单位面积平均固碳量分别为 593.28t/hm²和 841.20t/hm²,2017 年固碳能力明显高于 2003 年(表 3)。从面积的变化而言,2003 年至 2017 年海三棱蔗草和互花米草的面积共减少 1146.24hm²,而芦苇的面积增加 2732.67hm²(表 1),固碳区域增加的面积大于减少的面积,虽然养殖区的面积减少较多,但是它的固碳能力较弱,因此湿地的总固碳能力有所增加,表现为碳积累趋势。从湿地类型转化来看,芦苇主要由光滩、养殖区、海三棱蔗草和互花米草等类型转化而来,即由无固碳能力或低固碳能力区域转化为高固碳能力区域。芦苇

的固碳占比也从2003年2.5%增加为2017年的59.2%，区域表现为碳积累(图6)。湿地的海三棱藨草、互花米草等湿地类型转化为陆地、光滩和芦苇等，虽然海三棱藨草、互花米草等高固碳能力区域转化为陆地、光滩等无固碳能力区域应该表现为碳损失，但是由于海三棱藨草、互花米草等也转化为了芦苇，且芦苇为湿地固碳能力最强的植物，它抵消了碳损失，因此湿地总体表现为碳积累。

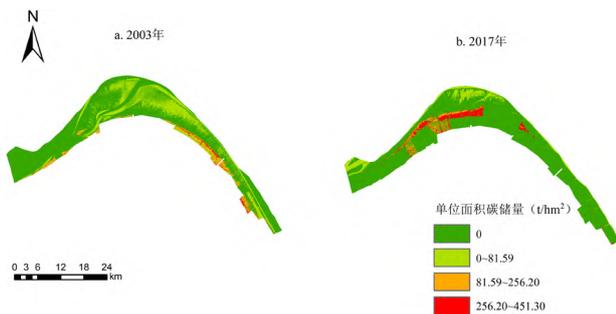


图5 2003年和2017年单位面积年碳储存分布
Fig.5 Distribution of carbon storage per unit area in 2003 and 2017

渔业养殖提供的“渔业碳汇”因为其经济和环境意义而很受关注。在滨海湿地固碳能力的研究中，滨海沼泽湿地围垦为养殖塘明显降低滨海湿地碳储量，因此，退塘还湿生态恢复对于滨海湿地固碳增汇起到积极的作用^[31]。杭州湾南岸滩涂湿地的养殖区面积从2003年的13029.21hm²减少为2017年的4707.72hm²，减少了8321.49hm²，其中部分区域变成人工陆地，还有部分区域转变成芦苇、海三棱藨草、互花米草区域，这部分区域增加了湿地的固碳能力。

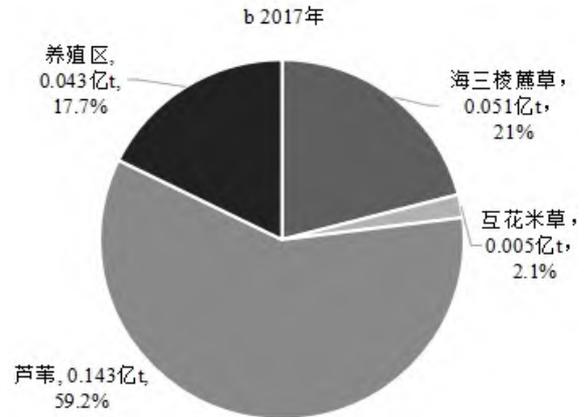
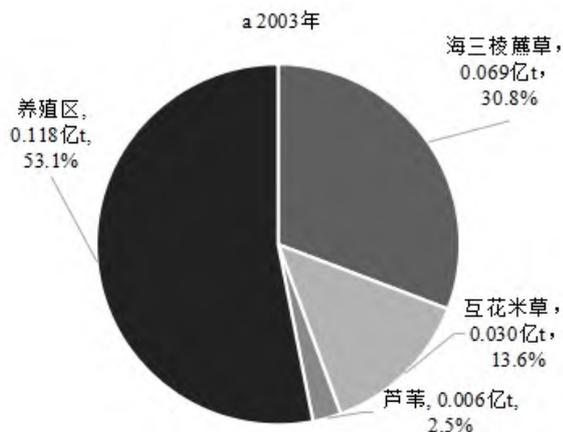


图6 杭州湾南岸湿地2003年和2017年不同湿地类型固碳量百分比
Fig.6 Percentage of carbon sequestration of different wetland types on the south bank of Hangzhou Bay in 2003 and 2017

3.3 退塘还湿情景下杭州湾湿地固碳预测

如前文所分析，退塘还湿生态恢复对于滨海湿地固碳增汇起到积极作用^[31]。因此从提高本区域的碳汇能力的角度，在不考虑滩涂自然淤长演变的情况下，设定退塘还湿的区域发展模式(图7)，即将养殖塘全部转变成高固碳能力的芦苇，以2017年为基础年，计算至2030年(碳达峰)研究区域的固碳能力和固碳净现值情况。

经过计算，2030年碳储存量为0.74亿t，单位面积最大碳储存为1680.84t/hm²(图8a)，2017~2030年碳积累量为0.50亿t，单位面积最大碳积累为1229.54t/hm²(图8b)，固碳净现值为7414.7亿元，单位面积最大净现值为1809.73万元(图8c)。

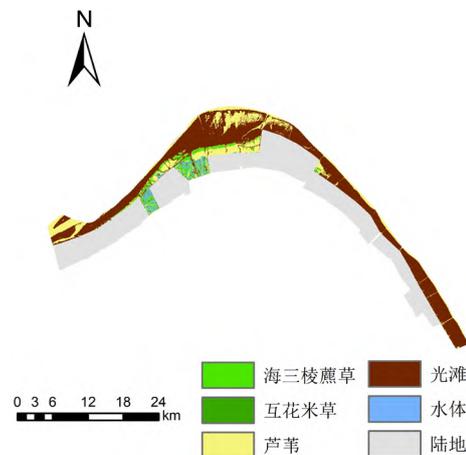


图7 退塘还湿情景下杭州湾南岸海岸带类型
Fig.7 Types of Hangzhou Bay coastal zone under the scenario of returning aquaculture ponds to wetlands

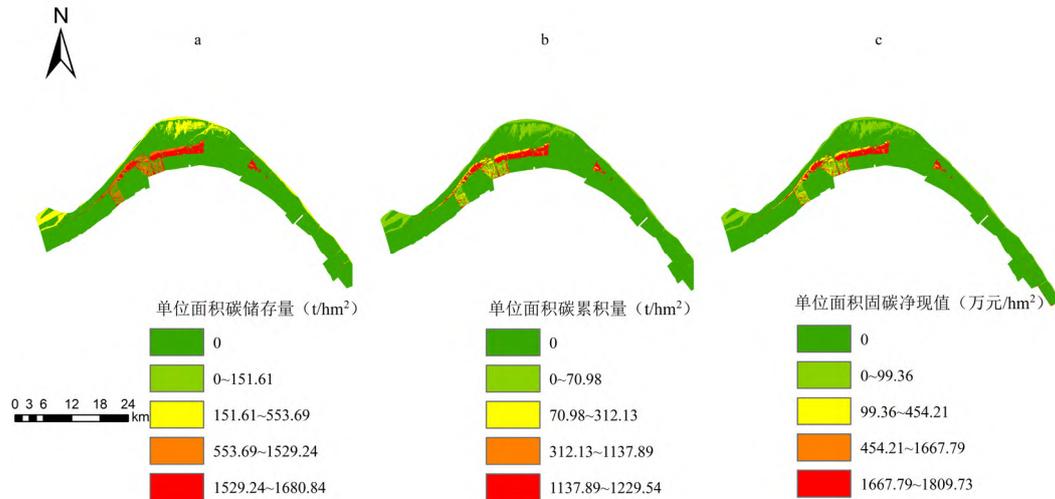


图8 退塘还湿情景下至2030年湿地的碳储量、碳积累量和固碳净现值空间分布

Fig.8 Spatial distribution of carbon storage, carbon accumulation and net present value of carbon sequestration in wetlands by 2030 under the scenario of returning aquaculture ponds to wetlands

(a)碳储量空间分布(b)碳积累量空间分布(c)固碳净现值空间分布

4 结论

4.1 2003~2017年杭州湾南岸滩涂湿地面积减少,但碳储量增加.研究区总碳储量由2003年的0.223亿t上升到2017年的0.765亿t.单位面积碳储量最大值由451.27t/hm²上升到1775.42t/hm²,杭州湾南岸滩涂湿地固碳能力和潜力呈现增强趋势.研究区总碳积累量为0.543亿t,单位面积碳积累量最小值为0,最大值为1324.12t/hm².

4.2 2003~2017年杭州湾南岸滩涂湿地碳固定净现值,即海岸带蓝碳价值,为4761.3亿元,单位面积固碳净现值最大值为148.8万元/hm².蓝碳价值约为2017年宁波市生产总值的48%.杭州湾南岸滩涂湿地碳汇能力和潜力巨大,对海岸蓝碳生态系统的保护也要给予足够的重视.

4.3 湿地类型对于滩涂湿地的固碳能力有很大的影响,在杭州湾南岸的滩涂湿地中,芦苇湿地固碳量大,蓝碳价值高,为优选植被类型.

4.4 在退塘还湿条件下,研究区域固碳极端发展.至2030年,碳储量为0.74亿t,碳积累量为0.50亿t,固碳价值为7414.7亿元.预测模拟情况为杭州湾南岸滩涂湿地在2030年碳达峰年的固碳发展方式.

参考文献:

[1] 潘德炉,李腾,白雁.海洋:地球最巨大的碳库[J].海洋学研究,2012,30(3):1-7.
Pan D L, Li T, Bai Y. Ocean: the largest carbon pool on earth [J].

Oceanographic Research, 2012,30(3):1-7.

- [2] 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 CO₂ [J].Frontiers in Ecology and the Environment, 2011,9(10):552-560.
- [3] Duarte C M, Losada I J, Hendriks I E, et al. The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation [J]. Nature Climate Change, 2013,3(11):961-968.
- [4] Nellemann C, Corcoran E, Duarte C M, et al. BlueCarbon: The role of healthy oceans in binding carbon [R/OL]. United Nations Environment Programme, GRID-Arendal, 2009:1-80. <https://www.grida.no/publications/145>.
- [5] 章海波,骆永明,刘兴华,等.海岸带蓝碳研究及其展望[J].中国科学:地球科学,2015,45(11):1641-1648.
Zhang H B, Luo Y M, Liu X H, et al. Research and prospect of blue carbon in coastal zone [J]. Chinese Science: Earth Science, 2015,45(11):1641-1648.
- [6] 唐剑武,叶属峰,陈雪初,等.海岸带蓝碳的科学概念、研究方法以及在生态恢复中的应用[J].中国科学:地球科学,2018,48(6):661-670.
Tang J W, Ye S F, Chen X C, et al. Scientific concept, research method and application of coastal zone blue carbon in ecological restoration [J]. Chinese Science: Earth Science, 2018,48(6):661-670.
- [7] Kara R R, Ryan P M, Amanda R C, et al. Coastal blue carbon assessment of mangroves, salt marshes, and salt barrens in Tampa Bay, Florida, USA [J]. Estuaries and Coasts, 2018,41(5):1496-1510.
- [8] 隋玉正,陈小璇,李淑娟,等.海岸带蓝碳时空演变及其服务价值评估——以胶州湾为例[J].资源科学,2019,41(11):2119-2130.
Sui Y Z, Chen X X, Li S J, et al. Spatial and temporal evolution of blue carbon in coastal zone and its service value evaluation — a case study of Jiaozhou Bay [J]. Resource Science, 2019,41(11):2119-2130.
- [9] 王亚丽,张芬芬,陈小刚,等.海底地下水排放对典型红树林蓝碳收支的影响——以广西珍珠湾为例[J].海洋学报,2020,42(10):37-46.
Wang Y L, Zhang F F, Chen X G, et al. Effects of submarine groundwater discharge on blue carbon budget of typical mangroves —

- a case study of Zhenzhu Bay, Guangxi [J]. *Journal of Oceanography*, 2020,42(10):37-46.
- [10] 李 森,蔡厚才,陈万东,等.海岸带生态恢复区不同林龄红树林对 CH₄ 和 CO₂ 排放通量的影响 [J]. *生态环境学报*, 2020,29(12):2414-2422.
Li S, Cai H C, Chen W D, et al. Effects of mangroves of different ages on CH₄ and CO₂ emission fluxes in coastal ecological restoration area [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020,29(12):2414-2422.
- [11] Lee J, Kim B, Noh J, et al. The first national scale evaluation of organic carbon stocks and sequestration rates of coastal sediments along the West Sea, South Sea, and East Sea of South Korea [J]. *Science of the Total Environment*, 2021,793:148568-148568.
- [12] 戴子熠,廖丽蓉,梁嘉慧,等.1988~2018 年广西北海红树林蓝碳储量变化分析 [J]. *海洋环境科学*, 2022,41(1):8-16.
Dai Z Y, Liao L R, Liang J H, et al. Analysis on changes of blue carbon reserves of mangroves in Beihai, Guangxi from 1988 to 2018 [J]. *Marine Environmental Science*, 2022,41(1):8-16.
- [13] Zheng Z. Analysis of intrinsic value and estimating losses of "blue carbon" in coastal wetlands: a case study of Yancheng, China [J]. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2019,5(1):216-225.
- [14] Lindsey S, Edward T S, Ryan P M, et al. Blue Carbon: an additional driver for restoring and preserving ecological services of coastal wetlands in Tampa Bay (Florida, USA) [J]. *Wetlands*, 2019,39:1317-1328.
- [15] Doughty C L, Langley J A, Walker W S, et al. Mangrove range expansion rapidly increases coastal wetland carbon storage [J]. *Estuaries and Coasts*, 2016,39(2):385-396.
- [16] 邵学新,杨文英,吴 明,等.杭州湾滨海湿地土壤有机碳含量及其分布格局 [J]. *应用生态学报*, 2011,22(3):658-664.
Shao X X, Yang W Y, Wu M, et al. Soil organic carbon content and its distribution pattern in Hangzhou Bay Coastal Wetland [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011,22(3):658-664.
- [17] 邵学新,李文华,吴 明,等.杭州湾潮滩湿地 3 种优势植物碳氮磷储量特征研究 [J]. *环境科学*, 2013,34(9):3451-3457.
Shao X X, Li W H, Wu M, et al. Study on carbon, nitrogen and phosphorus storage characteristics of three dominant plants in tidal flat wetland of Hangzhou Bay [J]. *Environmental Science*, 2013,34(9):3451-3457.
- [18] 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. Change of ecosystem service value of coastal wetland in Hangzhou Bay [J]. *Journal of Zhejiang Agriculture and Forestry University*, 2019,36(1):118-129.
- [19] GB/T24708-2009 湿地分类 [S].
GB/T24708-2009 Wetland Classification [S].
- [20] 徐敬俊,覃恬恬,韩立民.海洋"碳汇渔业"研究述评 [J]. *资源科学*, 2018,40(1):161-172.
Xu J J, Qin T T, Han L M. Review on marine "Fishery carbon sink" [J]. *Resource Science*, 2018,40(1):161-172.
- [21] 宁波市国土资源局.宁波市滩涂围垦造地规划(2011~2020) [R]. 宁波市政府, 2011.
Ningbo Municipal Bureau of land and resources. Ningbo tidal flat reclamation planning (2011~2020) [R]. Ningbo municipal government, 2011.
- [22] 杨园园,戴尔阜,付 华.基于 InVEST 模型的生态系统服务功能价值评估研究框架 [J]. *首都师范大学学报(自然科学版)*, 2012,33(3):41-47.
Yang Y Y, Dai E F, Fu H. Research framework of ecosystem service function value evaluation based on InVEST model [J]. *Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition)*, 2012,33(3):41-47.
- [23] 咎肖肖.胶州湾湿地菲律宾蛤仔(*Ruditapes philippinarum*)和芦苇(*Phragmites australis*)生物学与生态化学计量学研究 [D]. 青岛:中国海洋大学, 2013.
Zan X X. Biological and ecological chemometrics of *Ruditapes philippinarum* and *Phragmites australis* in Jiaozhou Bay Wetland [D]. Qingdao: Chinese Marine University, 2013.
- [24] 宁波市国土资源局.宁波市滩涂围垦造地规划(2011~2020) [R]. 宁波市政府, 2011.
Ningbo Municipal Bureau of land and resources. Ningbo tidal flat reclamation planning (2011~2020) [R]. Ningbo municipal government, 2011.
- [25] 张继红,方建光,唐启升.中国浅海贝藻养殖对海洋碳循环的贡献 [J]. *地球科学进展*, 2005,20(3):359-365.
Zhang J H, Fang J G, Tang Q S. Contribution of shellfish culture to marine carbon cycle in shallow waters of China [J]. *Advances in Earth Science*, 2005,20(3):359-365.
- [26] 张继红,方建光,唐启升,等.桑沟湾不同区域养殖栉孔扇贝的固碳速率 [J]. *渔业科学进展*, 2013,34(1):12-16.
Zhang J H, Fang J G, Tang Q S, et al. Carbon sequestration rate of *Chlamys farreri* cultured in different areas of Sanggou Bay [J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2013,34(1):12-16.
- [27] 李海晏,陈 涛,张海燕,等.中国贝类养殖对海洋碳循环的贡献评估 [J]. *海洋科学*, 2014,38(5):39-45.
Li H Y, Chen T, Zhang H Y, et al. Assessment of the contribution of Chinese shellfish culture to the marine carbon cycle [J]. *Marine Sciences*, 2014,38(5):39-45.
- [28] Editorial Committee of State Report on Biodiversity of China Committee. *Statereport on biodiversity of China* [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1997.
- [29] 刘昌义.气候变化经济学中贴现率问题的最新研究进展 [J]. *经济学动态*, 2012,25(3):123-129.
Liu C Y. The latest research progress of discount rate in the economics of climate change [J]. *Economic Perspectives*, 2012,25(3):123-129.
- [30] 何冬梅,王 磊,倪 霞,等.江苏盐城沿海滩涂湿地生态系统服务价值评估 [J]. *江苏林业科技*, 2016,43(6):29-33.
He D M, Wang L, Ni X, et al. Evaluation on ecosystem service value of coastal tidal flat wetland in Yancheng, Jiangsu Province [J]. *Journal of Jiangsu Forestry Science & Technology*, 2016,43(6):29-33.
- [31] 叶林安,张海波,孔定江,等.宁波市海岸带蓝碳固碳能力估算研究 [J]. *环境科学与管理*, 2022,47(5):27-31.
Ye L A, Zhang H B, Kon D J, et al. Study on the estimation of carbon sequestration capacity of blue carbon in Ningbo coastal zone [J]. *Environmental Science and Management*, 2022,47(5):27-31.
- [32] 曹 琼,黄佳芳,罗 敏,等.滨海沼泽湿地转化为养殖塘对其碳储量的影响 [J]. *中国环境科学*, 2022,42(3):1335-134.
Cao Q, Huang J F, Luo M, et al. Effect of conversion of coastal swamp wetland into aquaculture pond on its carbon storage [J]. *China Environmental Science*, 2022,42(3):1335-134.

作者简介:王珊珊(1980-),女,山东青岛人,教授级高工,从事海洋环境沉积动力学、河口海岸滩涂湿地环境评估及修复等相关研究.发表论文 20 余篇.