

海州湾海洋牧场水环境的承载力

俞锦辰¹, 李娜¹, 张硕², 赵旭¹,
兰艳¹, 刘怡琳¹, 黄宏^{1*}

(1. 上海海洋大学海洋生态与环境学院, 上海 201306;

2. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306)

摘要: 海洋牧场是实现海洋环境保护与渔业资源养护的重要举措。本研究以2014年春季(5月)、夏(8月)、秋(10月)对海州湾海洋牧场示范区水环境数据为基础, 选取高锰酸盐指数(COD_{Mn})、溶解无机氮(DIN)、溶解无机磷(DIP)、生化需氧量(BOD)作为评价指标, 利用BP神经网络模型对该海域水环境承载力进行评价。结果显示, 2014年海州湾海洋牧场水环境承载力指数平均值高于0.6, 承载状态较理想。水环境承载力存在明显的季节变化, 呈现出夏季>春季>秋季; 海洋牧场区域水环境承载力优于对照区海域; COD_{Mn}、DIN浓度过高是导致部分站点轻度超载的主要原因, 这可能与陆源污染有关。研究表明, 航运对水环境承载状态有负面影响; BP神经网络模型构建方便快捷, 评价结果客观合理, 可应用于海洋牧场等海域水环境承载力的研究。

关键词: 海洋牧场; 水环境承载力; BP神经网络; 海州湾

中图分类号: S 931

文献标志码: A

近几十年来, 人们对全球性环境问题的认识不断深入, 逐渐意识到环境问题大多是由于人类活动产生的污染超过了环境承受范围所造成的^[1]。承载力的概念逐渐被引入整个生态系统中, 其内涵随着社会经济的发展不断拓展^[2], 由最初的自然生态系统种群密度承载力发展到资源、环境、生态承载力。其中, 水环境承载力(water environmental carrying capacity, WECC)逐渐成为承载力领域的热点之一^[3]。水环境承载力是指在某一时空尺度内, 水环境能够维持自身相应的环境功能要求下, 所能承受某区域开发活动的最大压力^[4]。水环境的承载状况反映了人类与生态环境相互作用的界面特征, 科学地评估水环境承载状况, 对于保障区域社会经济持续健康发展具有重要的现实意义。

诸多学者进行了水环境承载力评估方法构建和案例研究工作, 如王金南等^[5]在应用环境承

载力预警分析方法的基础上, 采用压力—状态—响应模型, 划分水环境承载预警等级, 分析了长江三角洲16个城市水环境承载力演变情况, 并提出了提高该区域水环境承载能力的建议; 李新等^[6]根据洱海流域水环境现状, 选取关键承载指标, 建立了多目标优化模型, 并运用指标体系评价法和层次分析法计算出2003—2009年洱海流域水环境承载力; 杨丽花等^[7]在分析松花江流域水环境承载力与社会经济发展之间关系的基础上, 选取人口、经济和社会相关指标, 建立了该区域的水环境承载力神经网络模型, 并对其进行了评价; Lu等^[8]采用层次分析法, 对2005—2014年淮河流域水环境承载力进行了研究, 结合该流域水环境条件和区域社会经济、环境特点, 提出了淮河流域水环境保护的对策。

海洋牧场作为新型海洋资源开发利用模式, 与传统海水养殖相比, 更加重视海洋生态

收稿日期: 2019-06-04 修回日期: 2019-07-22

资助项目: 国家重点研发计划(2018YFD0900704); 上海市科技兴农计划(沪农科字2018第4-16号); 国家海洋局海洋公益性行业科研专项(201505008)

通信作者: 黄宏, E-mail: hhuang@shou.edu.cn

系统修复与生态环境保护^[9]。海洋牧场建设主要是基于海洋生态系统原理,充分利用海洋自然生产力,采用人工鱼礁投放、增殖放流等技术,通过科学养护,达到改善生境生态、增殖生物资源的作用,从而实现渔业资源可持续健康发展^[10-11]。目前我国正在掀起海洋牧场建设热潮,各沿海省市也出台了相关支持政策,渔业发展取得一定的成效,但海洋牧场建设,尤其鱼礁投放对环境承载力影响评估的研究还鲜见报道。为有效评估并指导海洋牧场建设,避免环境资源的过度开发与利用,亟需开展海洋牧场区域环境承载力评估研究。为此,本研究以资源养护型海洋牧场——海州湾海洋牧场为研究区域,采用具有较强数据处理能力的误差反向传递算法的BP神经网络技术,构建海州湾海洋牧场水环境承载力评估模型,以期阐明该海域水环境承载力的时空变化,尝试评估海州湾海洋牧场建设的修复效果。

1 材料与方法

1.1 研究区域

海州湾位于江苏连云港东侧,是一个开放型海湾,特殊而优越的地理环境为海洋牧场建设提供了有利条件。江苏省海洋与渔业主管部门从2002年起在海州湾海域开始实施人工鱼礁投放、海洋生物增殖放流、贝藻场建设等综合性海洋牧场生态修复工程,已累计投放人工鱼礁总规模近20万空 m^3 ,鱼礁类型主要包括混凝土礁、浮鱼礁、旧船礁、石头礁等,为海洋生物提供了良好的生长、发育、繁殖场所;人工增殖放流对虾、梭子蟹、黑鲷(*Acanthopagrus schlegelii*)等苗种,增加海洋生物资源量;贝藻场建设,通过吊养藻类和贝类、底播放流等手段,实现了贝、藻、海参等综合立体化混养模式^[12-13]。2015年12月,海州湾被批准为全国首批国家级海洋牧场示范区,海洋牧场总面积已超过150 km^2 。

在海州湾海洋牧场区域内(34°52'~34°58' N; 119°20'~119°36'E),按照代表性、均匀性的原则,共选取15个采样站点(图1),海洋牧场区站点(RA1~12)选取在海洋牧场区域内,对照区站点(CA1~3)选取在海洋牧场外围,其中CA1为近岸对照点,CA2、CA3为远岸对照点。分别于2014

年的5月(春季)、8月(夏季)、10月(秋季)进行水质调查,水样采集、保存和检测均采用《海洋调查规范》^[14]中的相关方法。

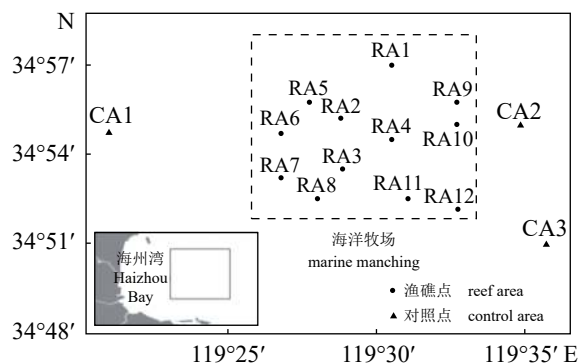


图1 海州湾海洋牧场站点示意图

Fig. 1 Map of Haizhou Bay marine ranching stations

1.2 水环境承载力指标体系

建立客观、合理的评价指标体系是水环境承载力研究的重要内容。在实际应用中,陆域的水环境承载力研究侧重于关注水环境对区域社会发展的支撑能力^[4-5],对社会发展与水资源、水环境相结合形成的系统进行评价;而海域中水环境承载力研究更关注对区域排污的容纳能力,通过水环境健康状况间接反映水环境对人类活动产生的各类污染物的承受与自净能力^[15]。海洋牧场作为海洋渔业资源养护的重要手段,其区域环境质量是水环境承载能力的最终表现,对污染物的浓度实测值与国家现行海水水质标准^[16]的对比表征的水环境承载力进行评价,是一种有效且科学合理的方式^[17]。

本研究对2014年海州湾海洋牧场水质调查数据进行分析,选取能反映养殖海域水环境质量状况的主要污染物指标高锰酸盐指数(COD_{Mn})、生化需氧量(BOD)、溶解无机氮(DIN)、溶解无机磷(DIP)作为评价指标。为了更直观地对水环境承载力进行评价,引入水环境承载力指数(water environmental carrying capacity index, WECCI)^[18]的概念,用于表征承载状态的优劣,水环境承载力指数区间范围为[0, 1],指数越接近1代表承载状态越好,指数越接近0代表承载状态越差。参考有关文献^[19-20],将水环境承载力划分为“良好可承载”、“可超载”、“轻度超载”、“中度超载”、“重度超载”5个等级,并与现行海水水质标准^[16]相对应(表1)。海州湾海洋牧场的功能区

表1 水环境承载力等级划分

Tab. 1 Classification of water environment carrying capacity

海水水质标准 marine water quality standard	水环境承载力指数 WECCI	等级划分 classification
I类 class I	0.8~1	良好可承载 good carrying capacity
II类 class II	0.6~0.8	可承载 bearable
III类 class III	0.4~0.6	轻度超载 light overload
IV类 class IV	0.2~0.4	中度超载 moderate overload
劣IV类 inferior class IV	0~0.2	重度超载 heavy overload

划分为水产养殖区, 执行第II类海水水质标准, 因此将第II类标准作为临界超载的界限, 即WECCI<0.6时表示超载。

1.3 BP神经网络模型

人工神经网络是基于模仿大脑神经网络结构和功能构建的一种信息处理系统^[21]。其中, 误差逆向传播算法训练的BP神经网络, 工作状态稳定、研究范例较多, 便于借鉴, 适用于模式识别及数据分类^[22]。近年来, 在环境承载力评估^[23]、环境质量评价^[24]、环境预报^[25]等方面已有一定应用。

BP神经网络模型拓扑结构包括输入层、隐含层和输出层, 各层之间的激活函数为sigmoid函数(式1)。模型的训练过程分为两部分, 前向传递输出值与逆向反馈误差, 基本思想: 输入样本进入网络的输入层, 经隐含层分析处理(式2)后, 在输出层得到输出结果(式3), 若输出结果与期望输出存在输出误差E(式4)并大于期望误差, 则进行误差的反向传播, 将误差按照一定的学习算法整理成相应的形式, 由隐含层传播至输入层, 并将误差分配给各层的所有神经元, 从而获得各层神经元的误差信号, 此误差信号即作为修正各神经元权值的依据。这种权值修正的过程不断迭代, 直至误差达到允许的范围, 样本训练结束。

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-2x}} - 1 \quad (1)$$

$$h_j = f\left(\sum_{i=1}^n Vx_i - b_1\right) \quad (2)$$

$$y_k = f\left(\sum_{j=1}^n Wh_j - b_2\right) \quad (3)$$

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (d_k - y_k)^2 \quad (4)$$

式中, x_i 为输入样本, h_j 为隐含层处理样本, y_k 为输出结果, d_k 为期望输出, i 、 j 、 k 分别为输入层、隐含层、输出层神经元个数, V 为输入层与隐含层的连接权值, b_1 为隐含层各神经元的阈值, W 为隐含层与输出层的连接权值, b_2 为输出层各神经元阈值, E 为输出误差。

选取COD_{Mn}、DIN、DIP、BOD 4项污染物浓度值(mg/L)作为模型输入层指标, 输出结果为WECCI。即输入层神经元个数为4, 输出层神经元个数为1, 隐含层神经元个数采用试错法确定, 试错法公式^[26]:

$$t = \sqrt{m} + n + a \quad (5)$$

式中, t 为隐含层神经元个数, m 为输入层神经元个数, n 为输出层神经元个数, a 为1~10的常数。通过试错法, 得出隐含层神经元个数为6时, 模型误差最小, 得到4-6-1的模型拓扑结构。

模型训练需要较大的数据量, 对训练样本进行扩充可以提高模型的可靠性及准确度^[27]。运用rand函数对训练样本进行插值, 在各类海水水质标准区间内生成足够多的样本, 其对应的水环境承载力指数期望值0.1、0.2、0.4、0.6、0.8为输出值。本研究中, 在每个指标的分类区间内生成100个样本, 共4种污染物指标与5类水质标准, 总计2 200个训练样本。网络训练前, 运用mapminmax函数对训练样本的输入值与输出值进行归一化处理, 以消除单位及数量级对评价结果的影响, 可以提高BP神经网络样本训练的效率。另外, 海水水质标准中II类和III类海水, 无机磷浓度均为0.03 mg/L, 为更加精确地评价, 参考以往文献^[28-29], 对II类、III类海水标准的无机磷浓度进行了差别化细分, 分别取0.03 mg/L、0.037 5 mg/L作为II类与III类海水无机磷浓度阈值。

2 结果

2.1 BP神经网络模型构建

运用matlab R2014b软件构建BP神经网络模型。其中, 隐含层、输出层节点传递函数分别为tansig、purelin, 网络训练函数为trainlm, 训练最大次数为10⁴, 模型期望误差0.000 2, 学习速率为0.2, 其余网络参数均为默认值。训练结

束时，BP神经网络训练步长104次，此时网络输出误差达到规定期望误差 $\epsilon(\epsilon=0.0002)$ ，BP神经网络模型构建完成。将现行的海水水质标准指标阈值带入模型中进行检验计算，结果见表2。

可以看出，测试输出结果较为满意，说明BP神经网络模型拟合较好，具有一定的可信度。模型得到的输入层到中间层的连接权值V、隐含层阈值 b_1 、隐含层到输出层的连接权值W、输出层阈值 b_2 ：

$$V = \begin{pmatrix} -7.8567 & -12.6946 & -41.4936 & -9.6192 \\ 11.4944 & 15.3546 & 7.3176 & 21.2174 \\ 17.3093 & -5.7118 & 53.4436 & 11.8964 \\ -0.5885 & -0.5476 & -0.6121 & -0.3803 \\ -6.3734 & -10.1961 & -29.8461 & -7.0403 \\ -5.5566 & -5.0812 & -5.4722 & -3.4370 \end{pmatrix}$$

$$b_1 = \begin{pmatrix} 13.4065 \\ -32.9847 \\ -1.5102 \\ -0.8012 \\ 10.3972 \\ -0.4165 \end{pmatrix}$$

$$W = \begin{pmatrix} 0.0794 & -0.2255 & -0.1970 \\ 0.7815 & -0.1022 & -0.0738 \end{pmatrix}$$

$$b_2 = 0.0965$$

2.2 水环境承载力评估

将2014年春、夏、秋季各站点环境监测数据的污染物 COD_{Mn} 、DIN、DIP、BOD浓度值带入建立的BP网络模型中进行计算，输出结果为水环境承载力指数(表3)。结果显示，2014年春季鱼礁区3个站位低于0.6，占比25%；夏季均高于0.6；秋季4个站位低于0.6，占比33.33%。春季对照区均高于0.6；夏季1个站点低于0.6，占比33.33%；秋季1个站点低于0.6，占比33.33%。总体水环境承载状态较好，能够满足水产养殖功

能区要求。根据2014年东海区海洋环境公报^[30]，海州湾海域环境质量评定为优良，与本研究结果一致。

3 讨论

3.1 水环境承载力指数季节变化特征

2014年春季海州湾海洋牧场水环境承载力指数变化见图2-a(指数大于0.6为可承载)，WECCI变化范围为0.41~0.84，平均值为0.7 > 0.6，表示该区域春季水环境承载状态较好；WECCI最小值出现在航道渔礁站点RA1，为0.41，属于轻度超载。通过分析超载站点RA1、RA2、RA4的各项污染物指标，发现春季主要污染物为 COD_{Mn} ，平均浓度为3.80 mg/L，劣于海水水质Ⅱ类标准。夏季海州湾海洋牧场区域WECCI均值为0.73，大于0.6的站位占总调查站位数的93.3%(图2-b)，说明夏季承载状态良好。其中，超载站点CA1为近岸对照点，WECCI为0.54，属于轻度超载，主要污染物为DIN，浓度为0.37 mg/L，超过第Ⅱ类海水水质标准。与春季相比，夏季海洋牧场区域WECCI均值高于春季，对照区WECCI均值则相对较低。海州湾海洋牧场秋季WECCI变化范围为0.41~0.81，均值为0.66 > 0.6(图2-c)，表明秋季海洋牧场水环境承载状态较好，超载站位为RA1、RA5、RA8、RA9、CA1，属于轻度超载，其中DIN浓度过高是导致秋季水环境超载的主要原因，平均浓度为0.57 mg/L，远超过第Ⅳ类海水水质标准。

总体分析，海州湾海洋牧场水环境承载状态呈现出夏季(0.73) > 春季(0.70) > 秋季(0.66)，WECCI存在明显的季节变化，这与李飞等^[31]对海州湾近岸海域环境质量综合分析结果具有相似

表 2 水环境承载力指数阈值训练结果

Tab. 2 Training results of threshold value of water environmental carrying capacity index

等级划分	classification	COD_{Mn}	DIN	DIP	BOD	期望值	expected value	WECCI
良好可承载	good carrying capacity	2	0.2	0.015 0	1	0.8		0.800 0
可承载	bearable	3	0.3	0.030 0	3	0.6		0.600 1
轻度超载	light overload	4	0.4	0.037 5	4	0.4		0.400 2
中度超载	moderate overload	5	0.5	0.045 0	5	0.2		0.201 8
重度超载	heavy overload	6	0.6	0.060 0	6	0.1		0.097 9

注： COD_{Mn} 、DIN、DIP、BOD单位为mg/L，下同
Notes: COD_{Mn} , DIN, DIP, BOD units are mg/L, the same below

表3 BP神经网络模型运行结果

Tab. 3 Output of BP neural network model

站点 sites	春季 spring					夏季 summer					秋季 autumn				
	COD _{Mn}	DIN	DIP	BOD	WECCI	COD _{Mn}	DIN	DIP	BOD	WECCI	COD _{Mn}	DIN	DIP	BOD	WECCI
RA1	4.21	0.14	0.031	2.80	0.41	1.98	0.29	0.004	2.35	0.74	0.67	0.97	0.024	2.36	0.40
RA2	1.84	0.27	0.025	1.43	0.71	0.60	0.39	0.004	0.49	0.79	0.94	0.51	0.016	0.91	0.71
RA3	4.51	0.27	0.022	3.79	0.47	2.12	0.22	0.004	2.39	0.76	2.17	0.56	0.004	0.84	0.67
RA4	2.70	0.56	0.010	2.49	0.53	1.35	0.42	0.004	1.88	0.73	1.29	0.36	0.013	1.83	0.75
RA5	3.22	0.15	0.027	1.48	0.69	1.611	0.24	0.002	1.76	0.79	0.64	1.10	0.019	0.28	0.39
RA6	2.46	0.35	0.024	1.91	0.62	2.15	0.13	0.005	2.70	0.64	1.48	0.32	0.003	2.56	0.78
RA7	1.53	0.07	0.03	2.72	0.78	1.31	0.44	0.006	0.92	0.70	0.90	0.43	0.002	1.74	0.78
RA8	1.44	0.24	0.020	2.99	0.73	1.92	0.36	0.004	2.74	0.71	1.05	0.88	0.003	0.82	0.55
RA9	4.62	0.03	0.025	1.94	0.67	2.27	0.28	0.004	3.07	0.70	1.13	0.86	0.013	0.01	0.51
RA10	2.02	0.25	0.024	0.59	0.74	1.79	0.34	0.003	1.85	0.73	1.23	0.34	0.003	1.16	0.81
RA11	1.28	0.11	0.015	0.09	0.84	1.52	0.36	0.005	2.50	0.74	1.53	0.44	0.003	1.73	0.75
RA12	1.76	0.23	0.021	0.45	0.78	2.52	0.31	0.002	3.03	0.70	1.2	0.42	0.002	0.39	0.80
CA1	2.36	0.18	0.015	1.70	0.77	2.70	0.37	0.005	3.20	0.54	1.02	0.79	0.002	2.73	0.55
CA2	1.98	0.14	0.007	0.02	0.84	1.86	0.29	0.005	1.39	0.72	0.84	0.58	0.016	0.65	0.68
CA3	2.21	0.02	0.016	2.62	0.81	3.43	0.27	0.005	3.26	0.61	1.14	0.47	0.019	2.89	0.63

性。夏季、秋季首要污染物为DIN, 可以认为氮营养盐浓度是决定该区域水环境承载力高低的关键因子。春季和夏季是浮游植物生长和繁殖的活跃季节, 对营养盐的吸收较大, 而秋季由于温度和光照相较于春夏两季较弱, 致使秋季浮游植物生长繁殖更为缓慢, 同时部分浮游植物残体分解释放出氮、磷等营养盐, 加上秋季海州湾风浪较大, 上下层水体交换增强, 将沉积物释放的营养盐带入表层海水, 致使该海域秋季的氮营养盐浓度高于春季和夏季^[32], 最终表现为秋季WECCI低于春季和夏季。3个季节的对照区站点水环境承载指数均表现为远岸对照点(CA2)>远岸对照点(CA3)>近岸对照点(CA1), 春季WECCI均值为0.81, 明显高于夏季(0.63)和秋季(0.62), 说明承载状态在一定程度上受陆源影响, 其中, 夏、秋2个季节受影响程度较大。

3.2 水环境承载力指数空间变化特征

图3为海州湾水环境承载力指数空间变化, 其中, 指数数值越大的区域表现为绿色, 数值越小则表现为红色。春季WECCI空间变化特征表现为海洋牧场中心区域<对照区域, 首要污染

物为COD_{Mn}。其中, RA3的COD_{Mn}浓度最高, 该站点为贝藻场建设区, 这可能与吊养藻类、贝类等养殖活动造成的内源污染有关, 浮游生物在适宜的光照和温度下产生大量有机物^[33], 加上养殖造成的DO含量降低, 致使牧场中心区域COD降解较慢, 从而导致WECCI较低。夏、秋2个季度的WECCI都呈现出海洋牧场区域>远岸对照点>近岸对照点, 李飞等^[34]研究表明, 在海州湾近岸海域的海水养殖产生的营养盐负荷较陆域输入小, 可以认为营养盐浓度受陆源影响较大。夏季是沿岸河流的丰水期, 入海径流量携带着大量的营养盐, 所以夏季近岸对照点CA1的DIN浓度最高, 营养盐的这种消耗和补给的关系反映在WECCI上的结果是近岸对照点的承载状态弱于海洋牧场区域站点。这与符小明等^[35]的研究结果具有一定的相似性, 均体现为海洋牧场区域水环境质量明显优于对照区海域。

春季与秋季的海州湾海洋牧场WECCI北部与东部区域承载状态最差, 其中航道渔礁点RA1水环境承载状态最差, 而夏季RA1承载状态良好, 可能伏季禁渔期航道上过往船只减少,

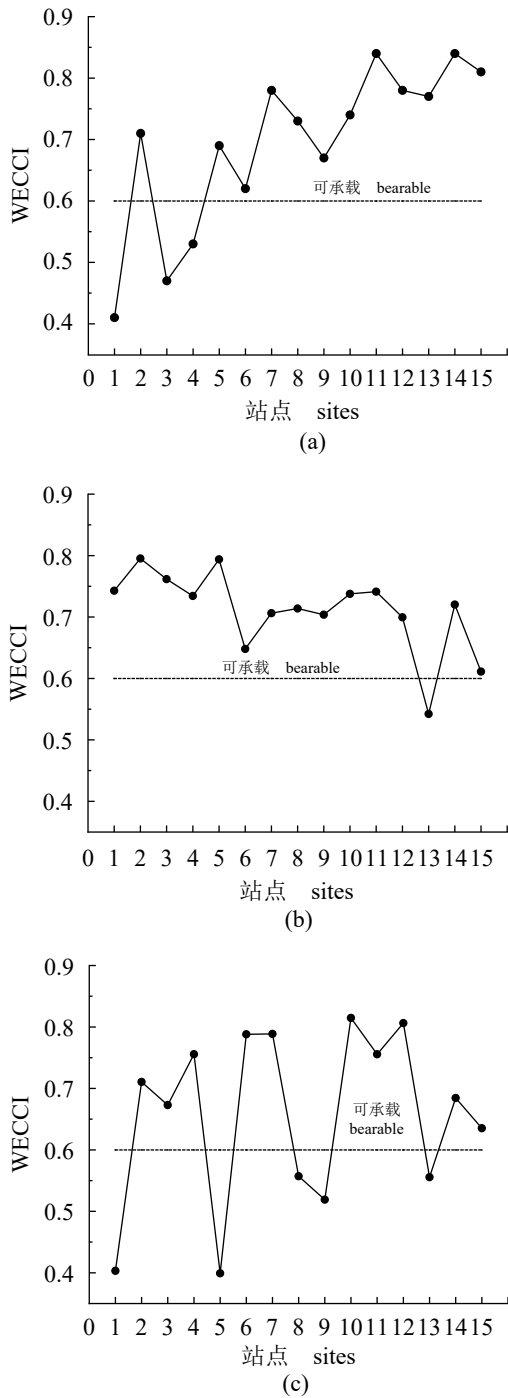


图2 2014年春季(a)、夏季(b)、秋季(c)海州湾海洋牧场水环境承载力指数变化

1~12为站点RA1~RA12, 13~15为站点CA1~CA3, 下同

Fig. 2 Variation of water environmental carrying capacity index of marine ranching in Haizhou Bay in spring (a), summer (b) and autumn (c) in 2014

1-12 are sites RA1~RA12, 13-15 are sites CA1~CA3, the same below

对水环境影响较小, 说明养殖区域水环境承载状态在一定程度上受航运的影响。可能是来往

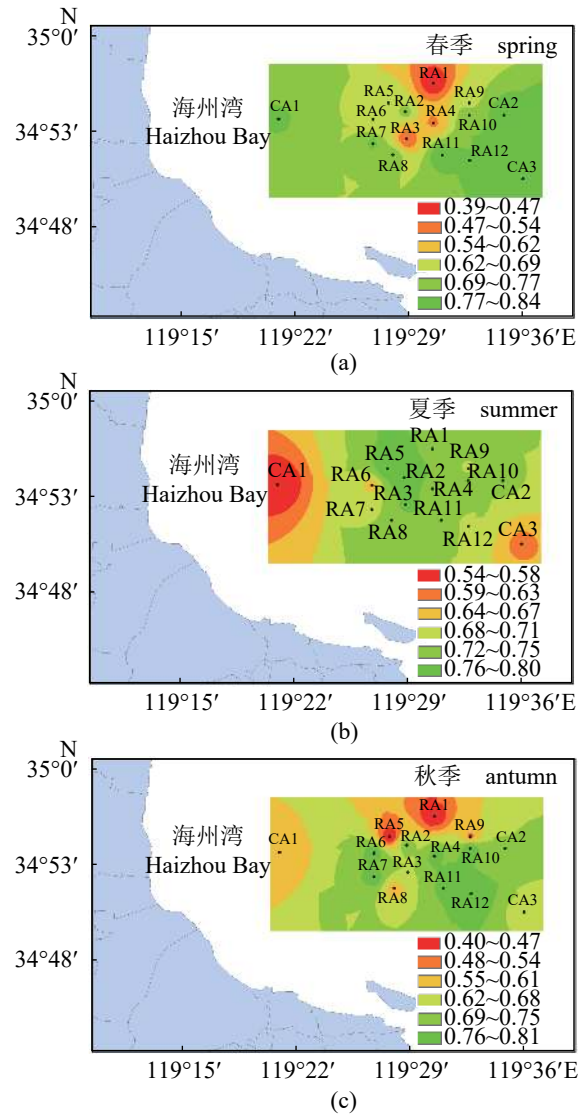


图3 2014年春季(a)、夏季(b)、秋季(c)水环境承载力指数空间变化

Fig. 3 Spatial variation of water environmental carrying capacity index in spring(a), summer(b) and autumn(c) in 2014

的船只影响了浮游生物对营养盐的吸收, 以及船上生活垃圾直接排入海中造成的污染, 最终导致了航道站点的WECCI较低。陈静等^[36]研究也表明, 航道站点的各项污染物浓度均高于养殖区, 且差异显著。

3.3 不同评估方法对比

近岸海域常用的水质健康评价方法为有机污染评价指数法^[37]与富营养化指数法^[38], 海水有机污染评价指数(A)是根据溶解氧、化学需氧量、无机氮、无机磷等污染指标来判断水体的

有机污染程度; 富营养化指数(E)为评价海域富营养化程度的指标, 具体公式:

$$A = \frac{COD}{COD_s} + \frac{DIN}{DIN_s} + \frac{DIP}{DIP_s} - \frac{DO}{DO_s} \quad (6)$$

$$E = \frac{COD \times DIN \times DIP \times 10^6}{4500} \quad (7)$$

式中, COD、DIN、DIP、DO分别为实测浓度值, 单位为mg/L, COD_s、DIN_s、DIP_s、DO_s分别为相对应的标准值, 本研究采用第Ⅱ类海水水质标准, A<1时表示海水水质清洁, A>1时, 表示海水受到有机物污染; 1<E<3时表示海水轻度富营养化, 3<E<9时表示海水中度富营养化, E>9时表示海水重度富营养化。

将BP神经网络模型的水环境承载力评估结果WECCI与海水有机污染评价指数A、富营养化指数E的评价结果进行比较(图4)(将WECCI的倒数与指数E、A进行作图, 表现为指数的数值越大, 水环境越不健康)。结果表明, 夏季的富营养化水平低于春、秋2季, 这与李亚丽等^[39]的调查结果一致; 有机污染状况呈现秋季劣于春季劣于夏季。总体分析, 该海域在春季出现一定程度的富营养化, 而WECCI与有机污染评价指数在春季的评价结果较好, 从计算公式可以看出, 富营养化指数的计算结果容易受“短板效应”影响, 即某一种污染物浓度过高而放大水体的受污染程度; 有机污染评价指数对这种“短板效应”有一定的修正, 通过对比标准值从而降低最高值对最终结果的影响; BP神经网络模型通过对典型样本的学习, 利用误差反传算法不断调整网络权值, 使WECCI输出值更客观、科学^[28]。春、夏、秋季各站点的WECCI与水环境受有机污染情况、富营养化程度的趋势均有一定程度的相关性, 说明本研究建立的BP神经网络模型运行稳定、可靠性强, 能够满足海州湾海洋牧场的水环境承载力评价要求。

4 结论

本研究利用BP神经网络构建了海州湾海洋牧场水环境承载力模型, 并对海州湾海洋牧场2014年春、夏、秋季的水环境承载力进行评估。发现该区域水环境承载状态呈现出夏季>春季>秋季, 海洋牧场区域水环境承载力较理想, 总体符合水产养殖区的要求。部分站点处于轻度

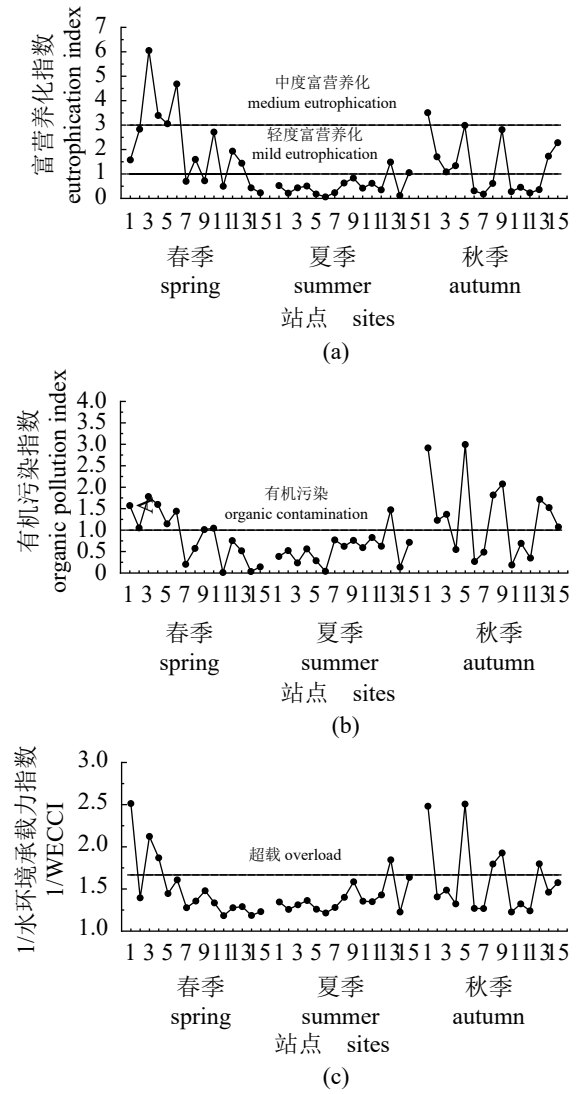


图4 富营养化指数(a)、有机污染指数(b)与水环境承载力指数(c)评价结果对比

Fig. 4 Comparison of eutrophication index (a), organic pollution index (b) and water environment carrying capacity index (c)

超载区, COD_{Mn}、DIN浓度过高是导致超载的主要原因。

分析水环境承载力指数空间变化, WECCI远岸对照点>近岸对照点, 说明陆源污染对营养盐浓度有一定影响; WECCI海洋牧场站点>对照区站点, 说明海洋牧场区域水环境承载状态优于对照区; 航运对水环境承载状态有明显的负面影响。

BP神经网络模型建模方便, 只需要根据实际需求, 选取指标体系、确定网络结构, 通过对样本数据的学习, 得到模型权值用于实际计算。与富营养化指数、有机污染指数等评价方

法对比, 本研究建立的BP神经网络模型评价结果直观可靠, 可应用于海洋牧场等海域水环境承载力的研究。

参考文献:

- [1] 唐剑武, 叶文虎. 环境承载力的本质及其定量化初步研究[J]. *中国环境科学*, 1998, 18(3): 227-230.
Tang J W, Ye W H. Study on environmental bearing capacity and its quantification[J]. *China Environmental Science*, 1998, 18(3): 227-230(in Chinese).
- [2] 封志明, 杨艳昭, 闫慧敏, 等. 百年来的资源环境承载力研究: 从理论到实践[J]. *资源科学*, 2017, 39(3): 379-395.
Feng Z M, Yang Y Z, Yan H M, *et al.* A review of resources and environment carrying capacity research since the 20th century: from theory to practice[J]. *Resources Science*, 2017, 39(3): 379-395(in Chinese).
- [3] 徐志青, 刘雪瑜, 袁鹏, 等. 南京市水环境承载力动态变化研究[J]. *环境科学研究*, 2019, 32(4): 557-564.
Xu Z Q, Liu X Y, Yuan P, *et al.* Dynamic change of water environment carrying capacity in Nanjing City[J]. *Research of Environmental Science*, 2019, 32(4): 557-564(in Chinese).
- [4] 吴国栋. 南黄海辐射沙洲内缘区水环境承载力研究[D]. 江苏: 南京师范大学, 2017.
Wu G D. Water environment carrying capacity of the radial sand ridge in the South Yellow Sea[D]. Jiangsu: Nanjing Normal University, 2017(in Chinese).
- [5] 王金南, 于雷, 万军, 等. 长江三角洲地区城市水环境承载力评估[J]. *中国环境科学*, 2013, 33(6): 1147-1151.
Wang J N, Yu L, Wan J, *et al.* Assessment on water environmental carrying capacity in the Yangtze River Delta[J]. *China Environmental Science*, 2013, 33(6): 1147-1151(in Chinese).
- [6] 李新, 石建屏, 曹洪. 基于指标体系和层次分析法的洱海流域水环境承载力动态研究[J]. *环境科学学报*, 2011, 31(6): 1338-1344.
Li X, Shi J P, Cao H. Water environment carrying capacity of Erhai Lake based on index system and analytic hierarchy process[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(6): 1338-1344(in Chinese).
- [7] 杨丽花, 佟连军. 基于BP神经网络模型的松花江流域(吉林省段)水环境承载力研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(9): 135-140.
Yang L H, Tong L J. Water environment carrying capacity in the Songhua River basin (Jilin Province) based on BP[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2013, 27(9): 135-140(in Chinese).
- [8] Lu Y, Xu H W, Wang Y X, *et al.* Evaluation of water environmental carrying capacity of city in Huaihe River Basin based on the AHP method: a case in Huai'an City[J]. *Water Resources and Industry*, 2017, 18: 71-77.
- [9] 杨红生, 章守宇, 张秀梅, 等. 中国现代化海洋牧场建设的战略思考[J]. *水产学报*, 2019, 43(4): 1255-1262.
Yang H S, Zhang S Y, Zhang X M, *et al.* Strategic thinking on the construction of modern marine ranching in China[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2019, 43(4): 1255-1262(in Chinese).
- [10] 杨红生. 我国海洋牧场建设回顾与展望[J]. *水产学报*, 2016, 40(7): 1133-1140.
Yang H S. Construction of marine ranching in China: reviews and prospects[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2016, 40(7): 1133-1140(in Chinese).
- [11] 章守宇, 周曦杰, 王凯, 等. 蓝色增长背景下的海洋生物生态城市化设想与海洋牧场建设关键技术研究综述[J]. *水产学报*, 2019, 43(1): 81-96.
Zhang S Y, Zhou X J, Wang K, *et al.* Review of marine livestock ecological urbanization hypothesis and marine ranching construction key-technology against blue growth background[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2019, 43(1): 81-96(in Chinese).
- [12] 陈骁, 许祝华, 丁艳锋. 江苏海州湾海域海洋牧场建设现状及发展对策建议[J]. *中国资源综合利用*, 2016, 34(5): 43-45.
Chen X, Xu Z H, Ding Y F. Jiangsu Haizhou bay marine farm construction present situation and development countermeasures and suggestions[J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2016, 34(5): 43-45(in Chinese).
- [13] 李大鹏. 海州湾海洋牧场生态环境效应研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2018.
Li D P. The eco-environmental effects of marine ranching in Haizhou bay[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2018(in Chinese).
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 海洋调查规范第4部分: 海水化学要素调查: GB/T 12763.4-2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, National Standardization Management Committee of China. Specifications for oceanographic survey-Part 4: survey-Part 4: Survey of chemical parameters in sea water: GB/T 12763.4-2007[S]. Beijing: China Standards Publishing House, 2008(in Chinese).
- [15] 胡溪, 刘年磊, 蒋洪强, 等. 基于环境质量标准的长江经济带水环境承载力评价[J]. 环境保护, 2018, 46(21): 36-40.
- Hu X, Liu N L, Jiang H Q, *et al.* The water environmental carrying capacity assessment of Yangtze River economic zone based on environmental quality standards[J]. Environmental Protection, 2018, 46(21): 36-40(in Chinese).
- [16] 国家环境保护局, 国家海洋局. 海水水质标准: GB 3097-1997[S]. 北京: 环境科学出版社, 2004.
- State Environmental Protection Agency, State Oceanic Administration. Marine water quality standard: GB 3097-1997[S]. Beijing: Environmental Science Press, 2004(in Chinese).
- [17] 刘年磊, 卢亚灵, 蒋洪强, 等. 基于环境质量标准的环境承载力评价方法及其应用[J]. 地理科学进展, 2017, 36(3): 296-305.
- Liu N L, Lu Y L, Jiang H Q, *et al.* Environmental carrying capacity evaluation methods and application based on environmental quality standards[J]. Progress in Geography, 2017, 36(3): 296-305(in Chinese).
- [18] 崔凤军. 城市水环境承载力及其实证研究[J]. 自然资源学报, 1998, 13(1): 58-62.
- Cui F J. The carrying capacity of municipal water environment and its case study[J]. Journal of Natural Resources, 1998, 13(1): 58-62(in Chinese).
- [19] 池源, 石洪华, 王媛媛, 等. 海岛生态系统承载力空间分异性评估——以庙岛群岛南部岛群为例[J]. 中国环境科学, 2017, 37(3): 1188-1200.
- Chi Y, Shi H H, Wang Y Y, *et al.* Evaluation on spatial heterogeneity of island ecosystem carrying capacity - a case study of southern Miaodao Archipelago[J]. China Environmental Science, 2017, 37(3): 1188-1200(in Chinese).
- [20] 余金龙, 尹亮, 鲍广强, 等. 基于BP神经网络的腾格里湖水环境承载力研究[J]. 中国农村水利水电, 2017(11): 83-86, 93.
- Yu J L, Yin L, Bao G Q, *et al.* Research on water environmental carrying capacity of Tenggeli lake based on BP neural networks[J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(11): 83-86, 93(in Chinese).
- [21] 丛爽. 面向MATLAB工具箱的神经网络理论与应用[M]. 第3版. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.
- Cong S. Neural network theory and applications with MATLAB Toolboxes[M]. 3rd ed. Hefei: University of Science and Technology Press, 2009(in Chinese).
- [22] 杨秋林, 张淑贞. 基于BP神经网络的水环境承载力评价[J]. 国土与自然资源研究, 2009(4): 70-72.
- Yang Q L, Zhang S Z. Evaluation of water environmental carrying capacity based on BP neural network[J]. Territory & Natural Resources Study, 2009(4): 70-72(in Chinese).
- [23] 柴磊. 人工神经网络在汉江上游水环境承载力中的应用研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2007.
- Chai L. Studies on application of artificial neural network in Hanjiang upstream basin water environment ultimate carrying capacity[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007(in Chinese).
- [24] 何璠. 基于BP人工神经网络的环境质量评价模型研究[D]. 成都: 四川大学, 2006.
- He F. A study on the environmental quality assessment model based on BP artificial neural network[D]. Chengdu: Sichuan University, 2006(in Chinese).
- [25] 夏晓玲, 尚媛媛, 宋丹. 基于BP神经网络的贵阳市空气质量指数预报模型[J]. 环境监控与预警, 2018, 10(3): 14-17.
- Xia X L, Shang Y Y, Song D. Prediction model of air quality index in Guiyang City based on BP neural network[J]. Environmental Monitoring and Forewarning, 2018, 10(3): 14-17(in Chinese).
- [26] 李娜, 范海梅, 许鹏, 等. BP神经网络模型在象山港水环境承载力研究中的应用[J]. 上海海洋大学学报, 2019, 28(1): 125-133.
- Li N, Fan H M, Xu P, *et al.* Application of BP neural network model in water environmental carrying capacity research of Xiangshan Bay[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2019, 28(1): 125-133(in Chinese).
- [27] 楼文高. BP神经网络模型在水环境质量综合评价应用中的一些问题[J]. 水产学报, 2002, 26(1): 90-96.
- Lou W G. Some aspects on application of BP neural

- network to comprehensive assessment of water environmental quality[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2002, 26(1): 90-96(in Chinese).
- [28] 徐勇, 赵俊, 过峰, 等. 基于BP人工神经网络的大沽河湿地海水水质综合评价[J]. *渔业科学进展*, 2015, 36(5): 31-37.
Xu Y, Zhao J, Guo F, *et al.* Integrated quality assessment of Dagu river wetland sea water based on back propagation (BP) artificial neural network[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2015, 36(5): 31-37(in Chinese).
- [29] 李雪, 刘长发, 朱学慧, 等. 基于BP神经网络的海水水质综合评价[J]. *海洋通报*, 2010, 29(2): 225-230.
Li X, Liu C F, Zhu X H, *et al.* Integrated assessment of sea water quality based on BP artificial neural network[J]. *Marine Science Bulletin*, 2010, 29(2): 225-230(in Chinese).
- [30] 国家海洋局东海分局. 2014年东海区海洋环境公报[EB/OL].[2015-04-13]. http://ecs.mnr.gov.cn/xxgk_166/xxgkml/hyti/dhqhjhjgb/201504/U020190108650650167415.pdf.
East China Sea Branch of the State Oceanic Administration. 2014 East China Sea marine environment bulletin[EB/OL].[2015-04-13]. http://ecs.mnr.gov.cn/xxgk_166/xxgkml/hyti/dhqhjhjgb/201504/U020190108650650167415.pdf.
- [31] 李飞, 徐敏. 海州湾保护区海洋环境质量综合评价[J]. *长江流域资源与环境*, 2014, 23(5): 659-667.
Li F, Xu M. An integrated assessment of coastal environmental quality in Haizhou bay protected area[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, 23(5): 659-667(in Chinese).
- [32] 黄宏, 李大鹏, 张岩, 等. 海州湾海洋牧场人工鱼礁投放对营养盐的影响[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(8): 2854-2861.
Huang H, Li D P, Zhang Y, *et al.* Effects of artificial reefs deployment on nutrients in the marine farming zone of Haizhou Bay[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(8): 2854-2861(in Chinese).
- [33] 周家飞, 刘德富, 杨正健, 等. 春季香溪河库湾COD_{Mn}时空分布及其影响因子初探[J]. *长江流域资源与环境*, 2014, 23(3): 358-365.
Zhou J F, Liu D F, Yang Z J, *et al.* Temporal and spatial distribution of COD_{Mn} and its influencing factors in Xiangxihe reservoir bay in spring[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, 23(3): 358-365(in Chinese).
- [34] 李飞, 徐敏, 丁言者, 等. 海州湾水质污染空间分布及来源[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(7): 1888-1894.
Li F, Xu M, Ding Y Z, *et al.* Spatial distribution and sources of water pollution in Haizhou Bay[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(7): 1888-1894(in Chinese).
- [35] 符小明, 唐建业, 吴卫强, 等. 海州湾生态修复效果评价[J]. *大连海洋大学学报*, 2017, 32(1): 93-98.
Fu X M, Tang J Y, Wu W Q, *et al.* Evaluation of ecological restoration performance in Haizhou Bay, Lianyungang[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2017, 32(1): 93-98(in Chinese).
- [36] 陈静, 蒋万祥, 王洪凯. 微山湖典型水域营养盐分布及富营养化评价[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(3): 421-424.
Chen J, Jiang W X, Wang H K. Evaluation on nutrients distribution and eutrophication in representative water areas of Weishan Lake[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(3): 421-424(in Chinese).
- [37] 于大涛, 高范, 姜恒志. 辽东湾西北部近岸海域水质现状调查及污染特征分析[J]. *海洋环境科学*, 2016, 35(4): 540-544, 550.
Yu D T, Gao F, Jiang H Z. The current situation and pollution feather analysis of water quality on coastal waters of the northwest Liaodong bay[J]. *Marine Environmental Science*, 2016, 35(4): 540-544, 550(in Chinese).
- [38] 黄亚楠, 吴孟孟. 富营养化指数法在中国近岸海域的应用[J]. *海洋环境科学*, 2016, 35(2): 316-320.
Huang Y N, Wu M M. Application of eutrophication index in the coastal waters of China[J]. *Marine Environmental Science*, 2016, 35(2): 316-320(in Chinese).
- [39] 李亚丽, 徐敏, 李鹏飞, 等. 连云港近岸海域富营养化水平的季节性变化及其影响因素[J]. *南京师大学报(自然科学版)*, 2014, 37(3): 116-123.
Li Y L, Xu M, Li P F, *et al.* Seasonal variations of eutrophication and the influential factors in the adjacent water of Lianyungang[J]. *Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition)*, 2014, 37(3): 116-123(in Chinese).

Water environment carrying capacity of Haizhou Bay marine ranching

YU Jinchun¹, LI Na¹, ZHANG Shuo², ZHAO Xu¹,
LAN Yan¹, LIU Yilin¹, HUANG Hong^{1*}

(1. College of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Marine ranching is an important measure to achieve marine environmental protection and efficient production of fishery resources. Based on the water environment data of Haizhou Bay marine ranching demonstration area in spring (May), summer (August) and autumn (October) of 2014, selecting permanganate index (COD_{Mn}), dissolved inorganic nitrogen (DIN), dissolved inorganic phosphorus (DIP), biochemical oxygen demand (BOD) as evaluation indexes, neural network models were developed using BP (back propagation) to evaluate the water environmental carrying capacity of the area. The results showed that the average water environmental carrying capacity index of Haizhou Bay marine ranching in 2014 was higher than 0.6, indicating an ideal level of the carrying status. Water environmental carrying capacity varied seasonally as follows: summer > spring > autumn. The water environmental carrying capacity of marine ranching area was obviously better than that of the control area. The high concentrations of COD_{Mn} and DIN were the main cause for the slight overload of some stations, which might be related to land-based pollution. In addition, shipping also had a certain negative impact on the water environment. BP neural network model has the advantages of convenient construction, objective and reasonable evaluation results, which could be applied to the study of water environmental carrying capacity in marine pastures and other sea areas.

Key words: marine ranching; water environmental carrying capacity; BP neural network; Haizhou Bay

Corresponding author: HUANG Hong. E-mail: hhuang@shou.edu.cn

Funding projects: National Key Research and Development Program of China (2018YFD0900704); Shanghai Agriculture Applied Technology Development Program, China (T20180416); State Oceanic Administration Marine Public Welfare Industry Research Project, China (201505008)