

河口海岸生态系统生态阈值及环境管理应用进展

王黎¹, 王彪², 肖文军³

(1. 上海东海海洋工程勘察设计研究院有限公司, 上海 200137;

2. 上海市环境科学研究院, 上海 200233;

3. 自然资源部 东海预报减灾中心, 上海 200081)

摘要: 河口海岸生态阈值是促使生态系统从相对稳定的动态平衡状态发生骤然转变的环境变量的值, 对于研究河口海岸生态系统演变以及开展区域生态修复具有重要意义。本文梳理了部分盐沼、海草床、珊瑚礁、海带床等典型生态机制转换事件的阈值结果以及国内外生态阈值在河口海岸生态系统的应用管理情况, 结合当前国内从环境保护转变到生态保护的环境管理需求, 提出了生态阈值在环境管理中的思考和建议。阈值因子的选择既可以反映河口海岸的自然特征, 又可以反映人类活动的某个方面; 在气候变暖的大背景下, 生态阈值的目标应该关注系统的完整性; 须加强空间尺度、气候变化对生态阈值的影响, 海陆自然条件与社会经济条件的耦合与机理过程研究。

关键词: 河口海岸; 生态系统; 生态阈值; 管理应用

中图分类号: P748

文献标志码: A

文章编号: 1002-3682(2024)02-0154-09

doi: 10.12362/j.issn.1002-3682.20231020001

引用格式: 王黎, 王彪, 肖文军, 2024. 河口海岸生态系统生态阈值及环境管理应用进展[J]. 海岸工程, 43(2): 154-162. WANG L, WANG B, XIAO W J, 2024. Ecological thresholds in the estuarine and coastal ecosystem and progress in their application and management in the ecological environment[J]. Coastal Engineering, 43(2): 154-162.

生态阈值能够标记生态系统稳定性的边界, 是生态系统相对于某种干扰水平发生非线性或实质性变化的临界点。生物多样性的丧失是生态系统韧性(Resilience)遭到破坏的主要表现。生态阈值贯穿于生物多样性变化的过程中, 调查赋予生态系统韧性的因素并开发早期预警指标(Scheffer et al, 2001; Hughes et al, 2013)能够高效地预警环境问题与生态灾害(McLeod et al, 2010; Halpern et al, 2013)。Kelly 等(2014)倡导将阈值管理应用在以生态为导向的管理模式(Ecosystem-Based Management Framework, EBMF)中, 以维护生态系统稳定、减少生态环境的损失、提高生态环境保护与管理效率。

生态保护与修复研究是生态文明建设和可持续发展的热点话题, 其目标是恢复特定的生态功能和服务。生态阈值能够回答资源恢复的轨迹和速度, 对于恢复决策以及监测计划的制定非常必要, 厘清生态阈值也是评估生态系统风险的关键与核心。

因此, 本文梳理了国内外河口—海岸方向典型海洋生态系统生态阈值研究的成果与应用, 以期有序推进国内生态阈值研究以及海洋生态修复工程的管理建设提供建议。

1 典型生态因子与阈值研究

生物过程、环境过程以及生境变化是生态机制转换的主要驱动力。确定生态阈值是量化生物多样性和生态系统服务功能的必要途径。但系统的复杂性也决定了确定生态阈值不仅要从机理上掌

收稿日期: 2023-10-20

资助项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3101705)

作者简介: 王黎(1986—), 女, 硕士, 从事海洋环境保护及数值模拟方面工作. E-mail: learwang@live.com

(李燕 编辑)

握物种的分布规律, 还需要考虑过度的人类活动以及气候变化对生态系统机制转换的加速作用。部分学者已针对河口海岸的生态机制转换事件做出深入研究并得出对应的阈值结果。物种对水面面积(Ge et al, 2015, 2016)、水位(Taft et al, 2002; 薛莲等, 2018)、盐度(Ge et al, 2015; Zheng et al, 2016; Xue et al, 2018)及其他生境要素(Schneider et al, 2006; 侯栋, 2011; Pecorino et al, 2014; Cavanaugh et al, 2014; Wernberg et al, 2016)的要求意味着当前生物多样性的热点区域发生位移。适合的种群数量(Casini et al, 2009; Casini et al, 2010)不仅能够抵抗外界环境的突变, 还能稳定其他生物种群。大强度的捕捞和高数量的单一物种通过影响其他物种的恢复和原始营养级联的重建(Lindgren et al, 2010), 进而改变中、上层食物网(Alheit et al, 2005; Möllmann et al, 2009; Casini et al, 2010)的结构; 过量的营养盐可以直接或间接改变河口区浮游植物群落结构(Paerl et al, 2003)及区域内的原本优势种的生存空间(Lapointe, 1997; McClanahan et al, 2005; 廖芝衡, 2021)。生态机制转换与阈值研究多通过野外观测、遥感及实验(Harrison et al, 2001; Taft et al, 2002; 邵魁双, 2003; Schneider et al, 2006; 赵肖等, 2013; Cavanaugh et al, 2014; Pecorino et al, 2014; Wernberg et al, 2016; 薛莲等, 2018)获取数据, 并通过回归模型、方差分析等统计分析方法(Mace et al, 1994; Paerl et al, 2003; Casini et al, 2009; Casini et al, 2010; Lindgren et al, 2010; McClanahan et al, 2011; Karr et al, 2015; 廖芝衡, 2021), 找出符合生态系统非线性变化拐点。表 1 选取了典型生态系统机制转换事件, 并从生物过程、营养盐环境以及生境要素特征进行阈值因子的分类及总结。

表 1 典型生态系统机制转换的驱动因子与生态阈值

Table 1 Driver factors and ecological thresholds for the transformation of typical ecosystem mechanisms

阈值因子	阈值	指标描述	栖息地类型	文献	
捕捞死亡率	$F_{0.1}$ 、 F_{max} 、 $F_{20\%}$	根据捕捞死亡率确定捕捞量, 界定过度捕捞的限值以及确定捕捞配额	开阔海域	Mace et al, 1994	
生物过程	种群数量	约 18×10^{10} 个	种群数量(鲱鱼)能够改变环境适应性	海湾、近海、峡湾	Casini et al, 2009 Casini et al, 2010
	种群数量	约 18×10^{10} 个	营养级稳定(鲱鱼)	开阔海域	Lindgren et al, 2010
渔获量/现存生物量	30%~50%	南海珊瑚礁的鱼类密度变化导致珊瑚礁区发生了由壳状珊瑚藻占主导转变为草皮海藻占优势。其他海域有类似结论	珊瑚礁	廖芝衡, 2021 McClanahan et al, 2011 Karr et al, 2015	
N 通量	30% 的通量	N 通量的变化能够改变浮游群落结构、食物链层级以及营养盐循环动力	河口、近岸	Paerl et al, 2003	
过量营养盐	营养盐质量浓度	$1.58 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ($\text{NO}_3\text{-N}$)、 $0.047 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、 $0.033 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)	营养盐浓度能够决定底栖动物完整性	河口、近岸	赵肖等, 2013
	DIN 浓度	大于 $20.81 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$	表现为底栖海藻群落物种数极低	海草床	邵魁双, 2003
	铵盐浓度	$1 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$	珊瑚的繁殖能力、卵尺寸以及受精率会受到营养盐的影响	珊瑚礁	Harrison et al, 2001
生境要素特征	水位	15~20 cm 50 cm、72 cm	水鸟栖息地水位要求 芦苇、海三棱藨草的水位阈值	盐沼	Taft et al, 2002 薛莲等, 2018
	气温	-4 °C	红树林区域景观规模地增加的气温胁迫阈值为-4 °C	红树林	Cavanaugh et al, 2014
	水温	16~26 °C 15~25 °C	海带 <i>E.radiata</i> 和海胆 <i>C. rodgersii</i> 的最适合水温分别为 16~26 °C 和 15~25 °C	海带床	Pecorino et al, 2014 Wernberg et al, 2016
	pH	0.2	钙化速率将会降低	珊瑚礁	Schneider et al, 2006

2 生态阈值在环境管理保护的应用

研究人员在机制转换及阈值因子的选取上成果较多, 但将成果及生态阈值应用到预防生态环境问题或是生态修复上仍面临许多挑战。生态机制转换现象存在区域性以及不确定性, 同一生态系统的生态阈值有所不同。如珊瑚礁与海藻床优势种地位对调的现象。通过渔获量/现存生物量因子可以看出, 在南海, 渔获量/现存生物量高于 50% 时(廖芝衡, 2021), 优势种地位发生互换, 而在加勒比地区, 该因子只需要 12%(McClanahan et al, 2011; Karr et al, 2015)。人为活动也会增加系统面临超过生态阈值的风险。目前只有少量的阈值标准和制度应用于管理实践。欧美国家明确提出以海洋生态环境以及种群健康确定相应的阈值(Hinsby et al, 2012), 管理计划遵循表 2 的路径, 即以生态系统现状问题为导向, 综合考虑生境变化和人类活动对生态系统或种群的影响及反作用, 选取合适指标, 建立风险评估体系, 并制定水质目标或捕捞计划, 建立跟踪评估体系。

表 2 设定管理标准时的生态阈值设定示例

Table 2 Example of ecological threshold setting when setting management standards

阈值制定路径	渔业管理示例	营养盐管理示例
历史目标: 将生态系统恢复到已知状态	鱼类种群数为健康值时, 捕捞死亡率不高于第 N 年的估计值	河口生态健康时 TMDL 的量值
现状目标: 减小已知危害	通过减少或降低捕捞死亡率来降低对标志物种的负面影响	减小 TMDL 的量值以消除缺氧现象
未来目标: 根据环境风险将生态系统功能恢复到符合目前管理政策的状态	将捕捞死亡率定为种群稳定时的最严格水平	设定 TMDL 维持鱼群所需和水质要求的最大值(包含生态系统产生)

注: TMDL(Total Maximum Daily Load)为总最大日负荷; 本表修改自 Fulford 等(2020)。

2.1 渔业管理

为防止渔业资源的衰败, 捕捞策略的制定往往依据捕捞死亡率或是捕捞量。我国也通过“双控政策”、休渔期、限制网目尺寸以及限额捕捞来控制渔获量。实践证明, 上述管理策略能够缓解渔业资源的衰退, 但没有改变底拖网、流网等捕捞方式对资源的破坏。欧美国家将“单一物种的渔获量”放入生态系统管理框架(National Marine Fisheries Service, 2014; Government of Western Australia, 2016; European Council, 2019)中, 综合考虑海洋生物群落之间的生物交互作用。分析长时间序列的环境及生物数据, 区分物种的短期变化及长期趋势, 得到相应的环境可持续预警指标、阈值及捕捞策略并制定管理计划, 避免生态系统机制发生更迭。西澳洲(State of Western Australia, Australia)利用褐虎虾和国王虾渔获量来评估产卵种群丰度, 将平均渔获量(表 3)作为阈值来评定捕捞策略是否有效, 并规定鲨鱼湾内使用拖网捕鱼面积不能超过 40%。

2.2 营养盐控制

美国的“国家河口计划”(National Estuary Program)是为了改善河口环境退化的问题。国家环境保护局(Environmental Protection Agency, EPA)借“国家河口计划”的实施, 基于对不同界面氮磷循环过程以及水体生态效应的定性和定量研究, 区分了阈值行为(Tipping point behaviour)或韧性反馈(Resilient response)行为, 并界定了前瞻性管理和追溯性管理之间的阈值。部分典型河口与海湾的富营养化和低氧问题较为严重, 辖区管理局利用长时间环境数据构建“流量-氮浓度”关系变化阈值模型, 综合

考虑地理和水体类型的差异, 计算确定 Chesapeake 湾、Neuse 河口、Tampa 湾等典型河口海湾的氮的减排量, 并制定相应的管控计划。以 Chesapeake 湾为例(Chesapeake Bay Program, 2012), EPA 制定的氮的年排放总量约为 8.5 万 t, 磷的年排放总量 5 700 t。2010 年至 2015 年间点源排入海湾的氮总量对比 1985 年下降了 57%, 磷总量下降了 75%。表 4 列举了马萨诸塞州河口计划总氮的生态阈值。

表 3 西澳洲(澳大利亚)鲨鱼湾鱼类保护生态阈值

Table 3 Ecological thresholds for fish conservation in the Shark Bay of State of Western Australia (Australia)

捕捞策略	EBMF 内容	渔获控制策略	评估手段	阈值
基于严格的时间、区域、进入时间以及船舶限制	褐虎虾 国王虾	在保障环境不变下, 维持每个物种的充足产卵量	第 4 级: 在关键产卵地点和时间段, 利用对褐虎虾和国王虾渔获量的渔业独立调查, 评估产卵种群水平	目标: 每个物种产卵区的平均渔获量大于等于 $25 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 阈值: 任一物种的平均捕获率小于等于 25 和大于 $10 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 限制: 任一物种的平均渔获量为 $10 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$
	栖息地	确保捕捞作业的影响不会对生态系统进程造成影响或产生不可逆转的损害。具体而言, 生境影响保持在可接受的水平	1. 年度管理安排到位 2. 每年拖网面积 3. 所有保留物种的年捕获量 4. 定期风险评估	目标: 拖网捕捞面积保持在鲨鱼湾“可拖网捕捞区域”的 40% 以下 阈值: 拖网面积大于 40%

注: 空白处表示无数据; 本表修改自 Fletcher 等(2016)。

表 4 美国马萨诸塞州河口计划生态阈值

Table 4 Ecological thresholds in the Massachusetts Estuary Program, USA

总氮现状 (以 N 计)/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	阈值(以 N 计)/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	环境问题	地点	文献
0.72	0.56~0.58	底栖生物生境退化	美国, 马萨诸塞州, 哈默克池	Massachusetts Estuaries Project, 2014
0.36~0.42	0.352 (考虑背景值 0.29)	—	美国, 马萨诸塞州, 奥克布拉夫斯	Massachusetts Estuaries Project, 2010
—	0.548 (以 $\text{DO}=6.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 为目标)	低氧	美国, 马萨诸塞州, 奥伊斯特池	Massachusetts Estuaries Project, 2006
—	0.40 ($\text{DIN}+\text{PON}$)	—	美国, 马萨诸塞州, 斯特奇海港、泰勒池、硫磺泉、贝森湾和泥溪	Massachusetts Estuaries Project, 2003

注: DO 为溶解氧; DIN 为可溶性无机氮; PON 为颗粒态有机氮; — 处表示无数据。

2.3 生态流量

我国以生态流量作为实施阈值管理的基础, 保证关键生态过程的水文要求, 并出台《长江保护法》《黄河保护法》等法律法规确保其地位。

生态流量的管理内涵复杂, 河口的气候条件、水文条件、生境条件不同, 侧重生态影响因子不同, 甚至汛期和非汛期的生态流量也不同, 对于某一特定时空范围下的环境系统而言, 生态流量还具有上下限的变动区间, 导致生态流量存在较大差别, 无法统一衡量。以黄河口为例, 维持生态功能的最低要求(表 5)的生态流量的最小值为 $154 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$; 在考虑鱼类洄游通道的连续性后, 此时生态流量的最小值为 $240 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$; 而进一步考虑鱼类产卵场所需低盐面积的持续时间后, 生态流量的最小值为 $890 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 。而上述结果还未考虑生态流量与营养盐运输的关系。同样, 长江口的生态流量基于盐度、氯度以及底栖生境时的值分别为 $10\,000 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $17\,500 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $18\,400 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 。

表 5 我国典型河口生态流量
Table 5 Ecological flow in the typical estuaries in China

河口	流量/(m ³ ·s ⁻¹)	针对对象	文献
长江口	10 000	盐度	王高旭等, 2010
长江口	17 500	氯度	顾圣华, 2004
长江口	18 400	底栖生物产卵场生境	Sun et al, 2009
黄河口(利津断面)	120~290	淡水鱼类和洄游鱼类生境需求	刘晓燕等, 2009, 2020
黄河口(利津断面)	大于等于 890	近岸低盐鱼类产卵场	于守兵等, 2020
辽河口	70.4~591.3	鱼类繁殖期需求	冯雪明, 2020

如何通过水利调度重现上述研究的生态流量尤为重要, 生态流量的时机、历时和峰值的合理确定也需要加强“生态-水文”响应过程研究, 量化“生态-水文”响应关系是生态阈值模拟的重要方向, 也是完成流量调度的重要保证。

3 结 语

河口海岸生态阈值的目标是同时保持河流生态、湿地生态以及近海生态的健康, 须较为全面地考虑生态系统对驱动因子在时间、空间方面的响应规律。阈值因子的选择是判断河口海岸生态系统健康与否的重要标志, 因子的选择既可以反映河口海岸的自然特征, 又可以反映人类活动的某个方面。

我国也已搭建“流域-近海”和“陆域-海域”管理框架, 针对某一类或是某几类物种的简单阈值并不能满足 3 种不同生态系统物种保护的需。明确生态保护的目标, 协同分析 3 种生态系统的生态要素、水文要素等多要素的共同影响, 选定可调控的阈值因子, 生态阈值才有明确的意义; 若不加选择地应用于生态环境保护或管理实践, 对河口海岸生态系统的修复会有反作用。

美国“国家河口计划”及我国“生态流量”的实施, 是以建立在特定时空尺度的长期定点的“生态系统-因子”模型为基础, 并通过长时间的跟踪观测及修正。在气候变化的条件下, 生境条件、环境条件的稳定性被打破, 上述条件的未知趋势及对生态系统影响的未知性, 可能导致现有的管理成果失效, 重新审视生境条件、环境条件与河口海岸生态系统之间的响应关系, 分析“特定生态事件-特定空间尺度的生态系统”的历史数据, 深刻理解生态机制转换过程, 完善现有模型, 提高管理效率及质量。

河口海岸生态系统除受到环境因素的制约外, 还受到人类活动的长期作用和影响, 如堤坝、流域的土地利用变化、取水等。重视海陆自然条件与社会经济条件的耦合作用与机理过程的研究, 厘清不同类型人类活动对河口海岸生态系统的影响机理及减缓措施, 确定“社会-自然”的协同机制与关键阈值, 是提升河口海岸环境质量的有效保证。

参考文献 (References):

- 冯雪明, 2020. 辽宁省河流生态流量计算方法与分析[J]. 水利发展研究, 20(6): 52-57. FENG X M, 2020. Calculation method and analysis of river ecological flow in Liaoning Province[J]. Water Resources Development Research, 20(6): 52-57.
- 顾圣华, 2004. 长江口环境用水量计算方法探讨[J]. 水文, 24(6): 35-37. GU S H, 2004. Study on the computational

- method for environmental water use in the Yangtze River Estuary[J]. *Journal of China Hydrology*, 24(6): 35-37.
- 侯栋, 2011. 黄河三角洲天然湿地生态系统演替及生态阈值研究[D]. 泰安: 山东农业大学. HOU D, 2011. Study on succession and ecological thresholds of natural ecosystem in Yellow River Delta[D]. Taian: Shandong Agricultural University.
- 廖芝衡, 2021. 南海珊瑚群落和底栖海藻的空间分布特征及其生态影响[D]. 南宁: 广西大学. LIAO Z H, 2021. Spatial distribution of coral community and benthic algae and their ecological impacts across the South China Sea[D]. Nanjing: Guangxi University.
- 刘晓燕, 连煜, 可素娟, 2009. 黄河河口生态需水分析[J]. *水利学报*, 40(8): 956-961, 968. LIU X Y, LIAN Y, KE S J, 2009. Analysis on water demand for ecosystem protection in Yellow River Delta[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 40(8): 956-961, 968.
- 刘晓燕, 王瑞玲, 张原锋, 等, 2020. 黄河河川径流利用的阈值[J]. *水利学报*, 51(6): 631-641. LIU X Y, WANG R L, ZHANG Y F, et al, 2020. Threshold of the runoff utilization of the Yellow River[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 51(6): 631-641.
- 邵魁双, 2003. 海藻无性系的构建[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所). SHAO K S, 2003. The foundation of the clone of marine alga[D]. Qingdao: Institute of oceanology, Chinese Academy of Sciences.
- 王高旭, 李褪来, 陈敏建, 2010. 长江口生态流量研究[J]. *水利水运工程学报*, (3): 53-58. WANG G X, LI D L, CHEN M J, 2010. Analysis and calculation of ecological flow in Yangtze River Estuary[J]. *Hydro-Science and Engineering*, (3): 53-58.
- 薛莲, 李秀珍, 闫中正, 等, 2018. 盐度和淹水对长江口潮滩盐沼植物碳储量的影响[J]. *生态学报*, 38(9): 2995-3003. XUE L, LI X Z, YAN Z Z, et al, 2018. Effects of salinity and inundation on carbon storage of halophytes in the tidal salt marsh of the Yangtze River Estuary[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 38(9): 2995-3003.
- 于守兵, 凡姚申, 余欣, 等, 2020. 黄河河口生态需水研究进展与展望[J]. *水利学报*, 51(9): 1101-1110. YU S B, FAN Y S, YU X, et al, 2020. Advance and prospects of ecological water demands in the Yellow River Estuary[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 51(9): 1101-1110.
- 赵肖, 刘明清, 廖岩, 等, 2013. 基于水生生物评价的珠江口营养盐水质标准阈值分析[C]//中国环境科学学会. 中国环境科学学会学术年会论文集(第四卷). 北京: 中国环境科学出版社: 3151-3158. ZHAO X, LIU M Q, LIAO Y, et al, 2013. Nutrient water quality standard threshold analysis of the Pearl River Estuary based on the evaluation of aquatic organisms[C]//Chinese Society for Environmental Science. Proceedings of the annual conference of the Chinese Society for Environmental Sciences (Vol. 4). Beijing: China Environmental Science Press: 3151-3158.
- ALHEIT J, MÖLLMANN C, DUTZ J, et al, 2005. Synchronous ecological regime shifts in the central Baltic and the North Sea in the late 1980s[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 62: 1205-1215.
- CASINI M, HJELM J, MOLINERO J, et al, 2009. Trophic cascades promote threshold-like shifts in pelagic marine ecosystems[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 106: 197-202.
- CASINI M, BARTOLINO V, MOLINERO J C, et al, 2010. Linking fisheries, trophic interactions and climate: threshold dynamics drive herring *Clupea harengus* growth in the central Baltic Sea[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 413: 241-252.
- CAVANAUGH K C, KELLNER J, FORDE A, et al, 2014. Poleward expansion of mangroves is a threshold response to decreased frequency of extreme cold events[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(2): 723-727.
- Chesapeake Bay Program, 2012. Habitats[EB/OL]. (2011-02-22) [2023-12-30]. <http://www.chesapeakebay.net/discover/bayecosystem>.
- European Council, 2019. Council regulation (EC) 2019/124 of 30 January 2019 fixing for 2019 the fishing opportunities

- for certain fish stocks and groups of fish stocks, applicable in Union waters and, for Union fishing vessels, in certain non-Union waters[EB/OL]. (2019-01-30) [2023-12-30]. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R0124>.
- FLECHER W, WISE B, JOLL L, et al, 2016. Refinements to harvest strategies to enable effective implementation of Ecosystem Based Fisheries Management for the multi-sector, multi-species fisheries of Western Australia[J]. *Fisheries Research*, (183): 594-608.
- FULFORD R, RUSSELL M, HAGY III J, et al, 2020. Managing estuaries for ecosystem function[J]. *Global Ecology and Conservation*, 21: e00892.
- GE Z M, CAO H B, CUI L F, et al, 2015. Future vegetation patterns and primary production in the coastal wetlands of East China under sea level rise, sediment reduction and saltwater intrusion[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 120(10): 1923-1940.
- GE Z M, WANG H, CAO H B, et al, 2016. Responses of eastern Chinese coastal salt marshes to sea-level rise combined with vegetative and sedimentary processes[J]. *Scientific Reports*, 6,28466: 1-10.
- Government of Western Australia, 2016. Aquatic resources management act[EB/OL]. (2023-07-20) [2023-12-30]. <https://www.fish.wa.gov.au/Fishing-and-Aquaculture/Aquatic-resources-management-act/Pages/default.aspx>.
- HALPERN B S, FUJITA R, 2013. Assumptions, challenges, and future directions in cumulative impact analysis[J]. *Ecosphere*, 4(10): 1-11.
- HARRISON P, WARD S, 2001. Elevated levels of nitrogen and phosphorus reduce fertilisation success of gametes from scleractinian reef corals[J]. *Marine Biology*, 139(6): 1057-1068.
- HINSBY K, MARKAGER S, KRONVANG B, et al, 2012. Threshold values and management options for nutrients in a catchment of a temperate estuary with poor ecological status[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(8): 2663-2683.
- HUGHES T, LINARES C, DAKOS V, et al, 2013. Living dangerously on borrowed time during slow, unrecognized regime shifts[J]. *Trends Ecology & Evolution*, 28(3): 149-155.
- KARR K A, FUJITA R, HALPERN B S, et al, 2015. Thresholds in Caribbean coral reefs: implications for ecosystem-based fishery management[J]. *Journal of Applied Ecology*, 52(2): 402-412.
- KELLY R, ERICKSON A, MEASE L, 2014. How not to fall off a cliff, or using tipping points to improve environmental management[J]. *Ecology Law Quarterly*, 41(4): 843-886.
- LAPOINTE B, 1997. Nutrient thresholds for bottom-up control of macroalgal blooms on coral reefs in Jamaica and south-east Florida[J]. *Limnology and Oceanography*, 42(52): 1119-1131.
- LINDEGREN M, DIEKMANN R, MÖLLMANN C, 2010. Regime shifts, resilience and recovery of a cod stock[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 402: 239-253.
- MACE P, 1994. Relationships between common biological reference points used as thresholds and targets of fisheries management strategies[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 51(1): 110-122.
- Massachusetts Estuaries Project, 2003. Linked watershed-embayment model to determine critical Nitrogen loading thresholds for the Stage Harbor, Sulphur Springs, Taylors Pond, Bassing Harbor, and Muddy Creek, Chatham, Massachusetts[R/OL]. (2003-06) [2023-12-30]. <https://www.chatham-ma.gov/DocumentCenter/View/595/Draft-Report-June-2003-Comment-Responses-PDF>.
- Massachusetts Estuaries Project, 2006. Linked watershed-embayment model to determine critical Nitrogen loading thresholds for the Oyster Pond System, Falmouth, Massachusetts[R/OL]. (2006-01) [2023-12-30]. https://opet.org/wp-content/uploads/OysterPond_FINAL_Report-2.pdf.
- Massachusetts Estuaries Project, 2010. Linked watershed-embayment model to determine critical Nitrogen loading thresh-

- old for the Lagoon Pond system, Towns of Oak Bluffs and Tisbury, MA[R/OL]. (2010-06) [2023-12-30]. <https://www.tisburyma.gov/sites/g/files/vyhlf1321/f/uploads/mep-lagoon-isle.pdf>.
- Massachusetts Estuaries Project, 2014. Linked watershed-embayment model to determine critical Nitrogen loading threshold for the Hummock Pond Estuarine System, Town of Nantucket, MA[R/OL]. (2014-01-31) [2023-12-30]. <https://www.nantucket-ma.gov/DocumentCenter/View/6984/Hummock-Pond-Estuary-Plan-PDF?bidId=>.
- MCCLANAHAN T R, STENECK R S, PIETRI D, et al, 2005. Interaction between inorganic nutrients and organic matter in controlling coral reef communities in Glovers Reef Belize[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 50(5): 566-575.
- MCCLANAHAN T R, GRAHAM N, MACNEIL M, et al, 2011. Critical thresholds and tangible targets for ecosystem-based management of coral reef fishes[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(41): 17230-17233.
- MCLEOD K, LESLIE H, ABURTO M, et al, 2010. Ecosystem-based management for the oceans[J]. *Restoration Ecology*, 18(5): 780-781.
- MÖLLMANN C, DIEKMANN R, MÜLLER-KARLUIS B, et al, 2009. Reorganization of a large marine ecosystem due to atmospheric and anthropogenic pressure: a discontinuous regime shift in the Central Baltic Sea[J]. *Global Change Biology*, 15(6): 1377-1393.
- National Marine Fisheries Service, 2014. Magnuson-stevens fishery conservation, management act[EB/OL]. (2007-01) [2023-12-30]. <https://www.gsmfc.org/pubs/GSMFC/MSA07.pdf>.
- PAERL H, VALDES L, PINCKNEY J, et al, 2003. Phytoplankton photopigments as indicators of estuarine and coastal eutrophication[J]. *BioScience*, 53(10): 953-964.
- PECORINO D, BARKER M, DWORJANYN S, et al, 2014. Impacts of near future sea surface pH and temperature conditions on fertilisation and embryonic development in *Centrostephanus rodgersii* from northern New Zealand and northern New South Wales, Australia[J]. *Marine Biology*, 161: 101-110.
- SCHEFFER M, STRAILE D, VAN NES E, et al, 2001. Climatic warming causes regime shifts in lake food webs[J]. *Limnology and Oceanography*, 46(7): 1780-1783.
- SCHNEIDER K, EREZ J, 2006. The effect of carbonate chemistry on calcification and photosynthesis in the hermatypic coral *Acropora eurystoma*[J]. *Limnology and Oceanography*, 51(3): 1284-1293.
- SUN T, YANG Z F, SHEN Z Y, et al, 2009. Environmental flows for the Yangtze Estuary based on salinity objectives[J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 14(5): 2507-2518.
- TAFT W, COLWELL M, ISOLA C, et al, 2002. Waterbird responses to experimental drawdown: implications for the multispecies management of wetland mosaics[J]. *Journal of Applied Ecology*, 39(15): 987-1001.
- WERNBERG T, DE BETTIGNIES T, JOY B, et al, 2016. Physiological responses of habitat-forming sea-weeds to increasing temperatures[J]. *Limnology and Oceanography*, 61(6): 2180-2190.
- XUE L, LI X Z, YAN Z Z, et al, 2018. Native and non-native halophytes resiliency against sea-level rise and saltwater intrusion[J]. *Hydrobiologia*, 806(1): 47-65.
- ZHENG Z, ZHOU Y, TIAN B, et al, 2016. The spatial relationship between salt marsh vegetation patterns, soil elevation and tidal channels using remote sensing at Chongming Dongtan Nature Reserve, China[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 35(4): 26-34.

Ecological Thresholds in the Estuarine and Coastal Ecosystem and Progress in Their Application and Management in the Ecological Environment

WANG Li¹, WANG Biao², XIAO Wenjun³

(1. *Shanghai East Sea Marine Engineering Survey and Design Institute Co. Ltd.*, Shanghai 200137, China;

2. *Shanghai Academy of Environmental Sciences*, Shanghai 200233, China;

3. *East China Sea Forecast Center, MNR*, Shanghai 200081, China)

Abstract: Ecological thresholds in the estuarine and coastal ecosystem are the values of environmental variables that promote the abrupt transition of the ecosystem from a relatively stable dynamic equilibrium state and are of great significance for studying the evolution of estuarine and coastal ecosystem and carrying out regional ecological restoration. In this paper, the thresholds of some typical ecological mechanism transformation events such as salt marshes, sea-grass beds, coral reefs, kelp beds, and so on are reviewed and the application and management of ecological thresholds in the estuarine and coastal ecosystem at home and abroad are introduced. Combined with the current needs of environmental management in China, some thoughts and suggestions on the role of ecological threshold in the environmental management are put forward and the choice of threshold factors can reflect both the natural features of the estuarine and coast and some aspects of the human activities. In the context of climate warming, the aim of the ecological thresholds should focus on the integrity of the system. It is necessary to strengthen the studies both on the impact of spatial scale and climate changes on the ecological thresholds and on the coupling and mechanism process of natural sea and land conditions and socio-economic conditions.

Keywords: estuarine and coast; ecosystem; ecological threshold; management and application

Received: October 20, 2023