

基于信息熵的溢油对天然渔业可持续承载力损害的评估

严志宇, 王嘉琦, 孙冰, 付红蕊, 任杰

(大连海事大学 环境科学与工程学院, 辽宁 大连 116026)

摘要: 作者基于信息熵理论, 以溢油事故对海洋天然渔业损害为切入点探讨海洋生态系统可持续承载力损害评估方法。论文从生态系统状态、功能、污染、修复等 4 个方面构建了熵流和熵产生指标体系, 以“塔斯曼海”轮溢油事故为例进行计算和评估, 结果表明: 溢油使海洋生态系统的价值产出能力下降 94.7%、总的承载力下降 194.9%, 溢油治理的效果小于溢油对生态承载力的损害。本评价是现有溢油生态损害评价的补充, 可为长期生态损害评估、生态修复和环境管理决策提供科学依据。

关键词: 溢油损害评估; 信息熵; 天然渔业承载力; “塔斯曼海”轮溢油

中图分类号: X55 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3096(2020)05-0071-05

DOI: 10.11759/hyxx20190912001

海洋生态系统的可持续能力是海洋经济可持续发展的基础, 其影响因素包括社会、经济、资源和环境等, 其中人类对资源的过度开采、对环境的事态型污染为生态系统发展的可持续能力带来的巨大压力和风险。在目前环境污染事件研究中, 人们关注的多为经济损失^[1-3], 对环境可持续承载力的损害尚未引起足够的重视, 然而对其准确评估是海洋保护和治理的关键。由于各因素之间关系复杂及生态系统本身存在着大量不确定性, 研究科学的、合理的评价方法具有重要意义。

1948 年, Shannon^[4]创立信息论, 提出了“信息熵”(Information Entropy)的概念, 用来表征系统的无序和混乱程度、判断系统的演化方向。目前, 国内外许多科学家将信息熵广泛应用于可持续发展分析, 如: 环境管理、能源利用、经济系统质量增长、人口密度演化、生态安全等方面^[5-7]。将信息熵运用到海洋生态系统演化的研究成果却很少^[8-10], 用于其可持续承载力的损害评估尚未见报道。海洋生态系统是一个复杂体系, 在对其功能的非理性依赖和环境的肆意破坏中, 人类与海洋的相互作用不断增大, 形成“人—海”复合生态系统, 各子系统之间内在的协调性和修复能力体现了可持续发展能力的本质特征^[8]。溢油对海洋生态环境的影响是巨大、深刻和持久的, 因此作者以溢油事故为切入点, 以海洋天然渔业损害为实例, 从“人—海”复合生态系统整体视角, 采用耗散结构及信息熵的理论和方法, 将天然渔场生态系统的功能服务、污染事故、压力代谢和

修复治理等过程进行熵流、熵产生特征分析, 建立指标体系, 以综合发展的观点, 探索海洋生态系统可持续承载力损害评估的可行方法, 探讨面临突发性破坏下海洋生态系统可持续发展能力演变特征, 为生态损害评估、生态修复和环境管理决策提供科学依据。

1 评估方法

熵是度量系统有序度的一个状态参量, 其值越高, 表示系统越无序, 污染尤其事故型污染会使海洋生态系统熵值急剧增加。熵变包括熵流和熵产生, 在生态系统中, 前者反映其与外界的协调性, 后者反映其内部的活力^[9], 污染事故发生后, 总的熵增反映其健康状况恶化, 其可持续承载力受到了影响。本文用信息熵进行溢油损害评价中, 首先建立海洋天然渔业评价指标体系, 在状态信息熵基础上计算溢油前后海洋生态系统的熵流和熵产生, 对其有序度进行分析, 判断溢油对其可持续承载力的影响。再利用指标信息熵确定的各个指标的权重, 可得到综合评价数值, 以此可对海洋天然渔业的可持续承载力

收稿日期: 2019-09-12; 修回日期: 2019-12-30

基金项目: 国家社科基金重大项目(17ZDA172); 国家重点研发计划子课题(2016YFC1402301); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(3132019329)

[Foundation: Major Projects of the National Social Science Fund of China, No.17ZDA172; National Key Research and Development Program, No. 2016YFC1402301; Fundamental Research Funds for the Central Universities, No. 3132019329]

作者简介: 严志宇(1970-), 女, 浙江温州人, 博士, 副教授, 主要从事污水治理和海洋环境保护研究, E-mail: 120236122@qq.com; 孙冰, 通信作者, E-mail: sunb88@dlmu.edu.cn

进行分析和评价。

1.1 计算方法

根据信息熵分析可持续发展的方法原理, 针对溢油事故特点, 作者对文献[8, 9]中信息熵分析可持续发展的方法略做调整, 如: 年份信息熵用状态信息熵替代, 数据的标准化方法按正向指标计算, 在综合评价中加方向指数 α_f 。

具体的方法如下:

信息熵的计算公式为:

$$S = -\sum_{i=1}^n P_i \ln(P_i), \quad (1)$$

式中, S 为不确定性系统的信息熵, P_i 表示不确定性系统状态随机变量 X 的概率, n 为变量数。

如果, 目标层有 k 个次准则层, 每层 l 个指标, 共 n 个指标, 评价系统的 m 个状态。系统演变某个状态总熵变为:

$$\Delta S = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n \frac{q_{ij}}{q_j} \ln \frac{q_{ij}}{q_j}, \quad \text{假定 } q_{ij}=0 \text{ 时, } \frac{q_{ij}}{q_j} \ln \frac{q_{ij}}{q_j} = 0, \quad (2)$$

式中, ΔS 为状态信息熵; i 为具体指标; n 为总指标数; q_{ij} 为标准化的指标值; q_j 为第 j 个状态的标准化指标值的总和。

评价指标的权重用指标信息熵计算:

$$E_i = -\frac{1}{\ln m} \sum_{j=1}^m \frac{q_{ij}}{q_i} \ln \frac{q_{ij}}{q_i}, \quad \text{假定 } q_{ij}=0 \text{ 时, } \frac{q_{ij}}{q_i} \ln \frac{q_{ij}}{q_i} = 0, \quad (3)$$

式中, E_i 为第 i 项指标的信息熵; m 为状态数, 一般按年确定评价状态, m 则为评价的年份数; q_i 为第 i 项指标所有状态的标准化数值之和;

i 的熵权则为:

$$Q_i = \frac{1 - E_i}{n - \sum_{i=1}^n E_i}. \quad (4)$$

当评价指标体系一般分为目标层、准则层、次准则层和要素层, 则综合评价为:

$$G = \frac{1}{k} \sum_{f=1}^k \alpha_f \cdot G_f, \quad G_f = \sum_{i=1}^l Q_i q_{ij}, \quad (5)$$

式中, G 为综合评价结果; G_f 为次准则层 f 综合评价结果; α_f 为次准则层 f 的方向指数, 正向为 1, 负向为 -1; k 为次准则层数; l 为次准则层中的指标数, $n=l \times k$ 。

数据标准化方法为: $q_{ij}=x_{ij}/\max(x)$, (6)

式中, x_{ij} 为 i 指标各状态的原始数据; $\max(x)$ 为 x 可能

的最大值, 不一定为原始数据中的最大值。标准化后, 数值在 0~1。

1.2 指标体系

针对溢油事故前后生态变化特点, 作者对海洋生态系统的熵变将从状态、功能、损害、修复 4 个方面(即 $k=4$)构建以下指标体系: 支持型输出熵 $\Delta_c S_1$, 反映海洋生态系统的功能和提供服务价值的支持能力; 污染型输入熵 $\Delta_c S_2$, 反映溢油的污染强度和削弱的海洋可持续发展的能力; 压力型代谢熵 $\Delta_c S_3$, 反映海洋生态系统的健康和应对外界压力的承载能力; 修复型还原熵 $\Delta_r S_1$, 反映溢油污染治理和生态修复, 是可持续发展的恢复。支持型输出熵指标和修复型还原熵指标定义为正向指标, $\alpha=1$; 污染型输入熵和压力代谢型定义为负向指标, $\alpha=-1$ 。针对天然渔业可持续承载力的评价, 确定的每个次准对应至少 3 个要素(即 $l>3$), 建立的指标体系如表 1 所示。

表 1 海洋天然渔业可持续承载力变化评价指标体系
Tab. 1 Evaluation index system for sustainable change of the sustainable bearing capacity of marine natural fisheries

| 目标层 | 准则层 | 次准则层 | 要素层 |
|--------------------|-----|------------|---|
| 天然渔业 可持续 承载力 | 熵流 | 支持型输出熵指标 A | 情况 1 捕捞量 $A1^a$ 情况 2 捕捞量 $A2$ 情况 3 捕捞量 $A3$ |
| | | 污染型输入熵指标 B | 溢油规模等级 $B1$ 溢油毒性等级 $B2$ 环境要素 1^b 中含油量 $B3$ |
| | | 压力型代谢熵指标 C | 资源 1 损失量 $C1$ 资源 2 损失量 $C2$ 资源 3 损失量 $C3$ |
| | 熵产生 | 修复型还原熵指标 D | 油的自净能力 $dD1$ 人工清除率 $eD2$ 人工修复程度 $eD3$ |

注: a. 不同船型、捕捞方式等; b. 水体、沉积物、生物等含量, “.....” 指上述可扩展的环境要素; c. 主要的获利资源, 如经济型鱼种、鱼类、(有经济价值的)无脊椎动物类等, “.....” 指上述可扩展的资源类型, 此处仅列 3 类; d. 油在环境持久性, 主要是油的风化速率决定的: 早期风化以蒸发为主, 速度较快, 长期风化主要是微生物降解, 会持续数十年; e. 如果数据充分, 修复还原型指标可以细化到不同区域的清除率, 如水体、滩涂等, 及不同类型的修复程度, “.....” 即指上述关系修复程度的可扩展内容

2 应用示例

2002年11月23日在天津大沽口东部海域马耳他籍邮轮“塔斯曼海”轮发生原油泄漏,200多吨轻质原油进入水体,污染面积按260 km²,天然渔业资源损失为79.05万元,捕捞业损失为280万元。该事故

调查和赔偿结果已被公开^[11],作者以此为示例,探讨天然渔业承载力损害评估方法的特点和可行性。

由于数据有限,评价指标根据数据特征对表1略有调整,且只评价溢油前后两个状态,即 $m=2$,另外,溢油后状态所处的具体时间根据获得数据会有不同。本示例中建立的指标体系及数据标准化的结果见表2。

表2 “塔斯曼海”溢油前后指标值及权值计算结果

Tab. 2 Calculation results of indicator values and weights before and after oil spills in the Tasman Sea

| 要素 | 可获得原始信息 ^[11] | | 标准化数据 q_{ij} | | 指标 I 信息熵 E_i | 熵权 Q_i | |
|-------------|---------------------------|-----------------|--|-------|---------------------|----------|---------------------------------------|
| | 溢油前 ^a | 溢油后 | 溢油前 | 溢油后 | | | |
| 支持型 输出熵流 | 短期捕捞量 ^b A1 | 有20几条 120马力船 | 全部撤出(1m内) | 1.000 | 0.000 | 0.000 0 | 0.135 5 |
| | 休渔期后中期捕捞量 ^b A2 | 正常 | 恢复(之后第3个月) | 1.000 | 1.000 | 1.000 0 | 0.000 0 |
| | 长期捕捞量 ^b A3 | 正常 | 损失按直接损失的 3倍计算 ^[12] (3m后的1a内) | 1.000 | 0.333 | 0.808 2 | 0.026 0 |
| 污染型 输入熵流 | 溢油量 B1 | 0 | 205.924t | 0.000 | 0.900 ^c | 0.000 0 | 0.135 5 |
| | 毒性 B2 | 0 | 0.5 ^c | 0.000 | 0.500 | 0.000 0 | 0.135 5 |
| | 水体含油量 B3 | 0.053 1 mg/L | 0.114mg/L (3d后测值) | 0.466 | 1.000 | 0.902 0 | 0.013 28 |
| 压力型 代谢熵变 | 优质鱼损失率 C1 | 0 | 39.83%(1a后测值) | 0.000 | 0.398 | 0.000 0 | 0.135 5 修正 ^f 为 0.193 6 |
| | 中质鱼损失率 C2 | 0 | 18.1%(1a后测值) | 0.000 | 0.181 | 0.000 0 | 0.135 5 修正 ^f 为 0.067 8 |
| | 无脊椎动物(有经济价值)损失率 C3 | 0 | 8.01%(1a后测值) | 0.000 | 0.080 | 0.000 0 | 0.135 5 修正 ^f 为: 0.145 2 |
| 修复型 还原熵变 | 油的自净能力 | | 持久性为 0.4 ^c | 1.000 | 0.600 | 0.954 3 | 0.006 2 |
| | 实际环境油污 减量 ^d | | 1a后沉积物平均油类含 量比事故前高 0.68 倍 | 1.000 | 0.595 ^d | 0.952 9 | 0.006 4 |
| | 人工修复 | | 无 ^e | 1.000 | 0.000 | 0.000 0 | 0.135 5 |

注: a. 历史同期; b. 捕捞情况根据出船率计算。短、中、长期分别指溢油发生后1个月内、3个月后、第4个月到1年的9个月,与历史同期(即溢油前)进行对比。长期损失为直接损失的3倍^[12],直接损失计为1个月内的100%损失,加上根据插入法确定的溢油后第2、3个月的50%损失,长期损失则为6个月捕捞量,因此溢油后长期的捕捞指数计算为0.33; c. 依据文献[13],确定的溢油等级及轻质原油的毒性等级、持久性; d. 根据数据来源,这里清除程度用实际沉积物含量减少程度表示。实际减量:溢油前,减量为100%,溢油后的减量为: $0.595=1/(1+0.68)$; e. 这里的人工修复指渔业资源的生态补偿,比如投放鱼苗,而非环境修复; f. 根据市场价格比,即优质鱼:中质鱼:无脊椎动物=20:7:15,对其权值进行修正。修正方法为:3个权值之和乘以各自价格比,各自价格比为其价格除以总价

根据熵变计算公式,溢油前后天然渔业熵变计算的结果见表3,次准则层指标的综合评价结果及总评价见表4。

从表3可看出,溢油后支持型输出熵流减少45.1%,显然是和溢油造成的污染型输入熵流增加331.7%有关,同时压力型代谢熵明显增加。修复还原型熵降低44.8%,反映的是溢油治理效果,和溢油造成的危害相比,是远远不够的。熵流增加49.3%,反映溢油造

成海洋生态系统与外界的协调性稳定性降低。熵产生的大幅增加,达86.4%,反映溢油后,生态系统的内部活力严重削弱,即结构和功能衰退,自我调控能力下降。总熵变增加70.1%,反映出天然渔业的可持续承载力的健康稳定性遭到破坏的程度很严重。

从表4的综合评价结果可看出,污染型输入熵指标得分增加3174%,造成的支持型输出熵指标综合得分降低94.7%。结合修复还原熵指标,总的评价

结果仍然下降 194.9%，说明溢油污染造成的天然渔业承载力的破坏，并未因修复治理得到缓解。可见，

对生态承载力损害进行评估是进行彻底的治理的保障，这也是本论文的意义所在。

表 3 溢油前后天然渔业熵变

Tab. 3 Entropy change of the natural fishery before and after the oil spill

| 评价指标 | 符号与公式 | 溢油前 | 溢油后 | 溢油前后差值 | 溢油前后变化率(%) |
|---------|---|----------|----------|----------|------------|
| 支持型输出熵流 | $\Delta_e S_1$ | 0.348 5 | 0.191 2 | -0.157 3 | -45.1 |
| 污染型输入熵流 | $\Delta_e S_2$ | 0.076 28 | 0.329 3 | 0.253 0 | +331.7 |
| 压力型代谢熵变 | $\Delta_i S_2$ | 0 | 0.145 0 | 0.145 0 | - |
| 修复还原型熵变 | $\Delta_i S_1$ | 0.348 5 | 0.192 5 | -0.156 | -44.8 |
| 熵流 | $-\Delta_e S_1 + \Delta_e S_2$ | -0.272 2 | -0.138 1 | 0.134 1 | +49.3 |
| 熵产生 | $-\Delta_i S_1 + \Delta_i S_2$ | -0.348 5 | -0.047 5 | 0.301 0 | +86.4 |
| 总熵变 | $(-\Delta_e S_1 + \Delta_e S_2) + (-\Delta_i S_1 + \Delta_i S_2)$ | -0.620 7 | -0.185 6 | 0.435 1 | +70.1 |

表 4 溢油前后次准则层指标的综合评价和总评价结果

Tab. 4 Comprehensive evaluation and general evaluation results of sub-criteria index indicators before and after the oil spill

| 评价指标 | 综合评价 G_f | | 溢油前后差值 | 溢油前后变化率(%) |
|---|------------|----------|----------|------------|
| | 溢油前 | 溢油后 | | |
| 支持型输出熵指标 A | 0.161 5 | 0.008 6 | -0.152 9 | -94.7 |
| 污染型输入熵指标 B | 0.006 2 | 0.203 0 | 0.196 8 | +3 174 |
| 压力型代谢熵指标 C | 0.000 0 | 0.101 0 | 0.101 0 | - |
| 修复型还原熵指标 D | 0.148 1 | 0.007 53 | -0.140 6 | -94.9 |
| 总评价 $G = \frac{1}{k} \sum_{f=1}^k \alpha_f \cdot G_f$ | 0.303 4 | -0.287 9 | -0.591 3 | -194.9 |

作者示例是在有限数据上进行的，评价的是溢油发生一年内的情况，而且表 2 根据数据的来源对表 1 进行了调整，评价结果可用于参考。真正完整的溢油天然渔业可持续承载力的损失评估工作需要完整的数据，可根据表 1 的指标体系的需求加强相关的监测工作，尤其是长期监测，这可使得溢油生态损害评估能从更长远的角度来进行。在更全面和长期的溢油生态损害评估的指导下，溢油的治理不仅仅能对短期海洋生态经济效益进行有效恢复，更能对海洋生态健康和发展做出长远保护。

3 结论

作者建立了用信息熵评估溢油对天然渔业可持续承载力损害的指标体系，并以“塔斯曼海”轮溢油事故为例，进行计算和评估。根据综合评价的结果可看出：溢油使海洋生态系统的价值产出能力下降 94.7%、总的承载力下降 194.9%；溢油治理和环境修复未能恢复天然渔业可持续承载力。本研究表明需要加强溢油对海洋生态损害的深刻认识，才能更彻底、有效地进行环境治理和生态修复。在这方面，本

评价可成为对现有溢油损害评价的有利补充。

参考文献:

- [1] 熊德琪, 廖国祥, 姜玲玲, 等. 溢油污染对海洋生物资源损害的数值评估模式[J]. 大连海事大学学报, 2017, 33(3): 69-72, 77.
Xiong Deqi, Liao Guoxiang, Jiang Lingling, et al. Numerical evaluation model of oil pollution damage to marine living resources[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2017, 33(3): 69-72, 77.
- [2] 张继伟, 袁征, 王金坑. 基于生境等价分析法的溢油生态损害评估[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(5): 162-166.
Zhang Jiwei, Yuan Zheng, Wang Jinkeng. Assessment of ecological damage of oil spills based on habitat equivalence analysis[J]. Population, Resources and Environment, 2015, 25(5): 162-166.
- [3] 于春艳, 梁斌, 韩庚辰, 等. 海洋溢油生态损害评估程序及方法探讨[J]. 海洋开发与管理, 2015, (1): 92-96.
Yu Chunyan, Liang Bin, Han Gengchen, et al. Discussion on the procedures and methods for ecological damage assessment of marine oil spills[J]. Ocean Development and Management, 2015, (1): 92-96.

- [4] Shannon C E. A mathematical theory of communication[J]. Bell System Technical Journal, 1948, 27(4): 379-423.
- [5] Wang X, Su J Q, Shan S, et al. Urban ecological regulation based on information entropy at the town scale: S case study on Tongzhou district, Beijing City[J]. Procedia Environmental Sciences, 2012, 13: 1155-1164.
- [6] Zhao S, Chai L H. A new assessment approach for urban ecosystem health basing on maximum information entropy method[J]. Stoch Environ Res Risk Assess, 2015, 29: 1601-1613.
- [7] Zhang Y, Yang Z F, Li W. Analyses of urban ecosystem based on information entropy[J]. Ecological Modelling, 2006, 197: 1-12.
- [8] 王玉梅, 王啸, 张舒, 等. 基于信息熵的区域人海复合生态系统可持续发展分析[J]. 水土保持研究, 2018, 25(3): 332-338.
Wang Yumei, Wang Xiao, Zhang Shu, et al. Analysis of sustainable development of regional human-sea composite ecosystem based on information entropy[J]. Soil and Water Conservation Research, 2018, 25(3): 332-338.
- [9] 狄乾斌, 韩雨汐. 熵视角下的中国海洋生态系统可持续发展能力分析[J]. 地理科学, 2014, 34(6): 664-671.
Di Qianbin, Han Yuxi. Analysis of the sustainable development capacity of China's marine ecosystem from the perspective of entropy[J]. Geographical Science, 2014, 34(6): 664-671.
- [10] 苏子龙, 袁国华, 郝庆, 等. 基于熵权法的海洋生态环境承载力评价——以广西近岸海域为例[J]. 中国国土资源经济, 2018, 31(2): 13-18.
Su Zilong, Yuan Guohua, Hao Qing, et al. Evaluation of marine ecological environment carrying capacity based on entropy weight method——Taking coastal waters in Guangxi as an example[J]. China Land and Resources Economics, 2018, 31(2): 13-18.
- [11] 刘家沂. 海洋生态损害的国家索赔法律机制与国际溢油案例研究[M]. 北京: 海洋出版社, 2010.
Liu Jiayi. National claims legal mechanism for marine ecological damage and international oil spill case study[M]. Beijing: Ocean Press, 2010.
- [12] 农业部. 水域污染事故渔业损失计算方法规定[S]. 农渔发 [1996] 14 号, 1996-10-08.
Ministry of Agriculture. Calculation method for fishery losses in water pollution accidents[S]. Agricultural Fisheries Development [1996] No. 14, 1996-10-08.
- [13] 任福安, 殷佩海, 耿晓辉. 海上溢油事故等级的综合评定[J]. 交通环保, 2000, 21(6): 16-19.
Ren Fuan, Yin Peihai, Geng Xiaohui. Comprehensive evaluation of marine oil spill level[J]. Journal of Traffic Environmental Protection, 2000, 21(6): 16-19.

Assessment of oil spill damage to the sustainable carrying capacity of natural fisheries based on information entropy

YAN Zhi-yu, WANG Jia-qi, SUN Bing, FU Hong-rui, REN Jie

(Environmental Science and Engineering Institute, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Received: Sep. 12, 2019

Key words: oil damage assessment; information entropy; carrying capacity of natural fishery; Tasman sea oil spill

Abstract: In this paper, based on the theory of information entropy, a damage assessment method of the sustainable bearing capacity of marine ecosystems has been discussed focusing on the impact of oil spills on marine natural fisheries. The indexes system of entropy flow and entropy generation has been constructed based on four aspects: the state, function, pollution, and repair of the ecosystem. By considering the “Tasman Sea” oil spill accident as an example, the calculation and evaluation results show that the oil spill reduced the production capacity of the marine ecosystem and the total carrying capacity by 94.7% and 194.9%, respectively. This evaluation is supplementary to the existing ecological damage assessment of oil spills and provides a scientific basis for long-term ecological damage assessment and the decision making focused on ecological restoration and environmental management.

(本文编辑: 谭雪静)