

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2015.0767

解雪峰, 蒋国俊, 吴涛, 等. 2016. 基于可拓分析与组合赋权法的乐清湾生态系统健康评价[J]. 环境科学学报, 36(6): 2272-2280

Xie X F, Jiang G J, Wu T, et al. 2016. Evaluation of marine ecosystem health based on extension analysis and combination weighting method in Yueqing Bay, Zhejiang, China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 36(6): 2272-2280

基于可拓分析与组合赋权法的乐清湾生态系统健康评价

解雪峰^{1,2}, 蒋国俊¹, 吴涛^{1,*}, 边华菁¹, 张勇¹

1. 浙江师范大学地理与环境科学学院, 金华 321004

2. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023

收稿日期: 2015-09-17

修回日期: 2015-11-25

录用日期: 2015-11-25

摘要: 借助 GIS 和 RS 技术, 结合数字影像数据、社会经济数据和环境监测数据, 运用 PSR 模型分别从陆源压力、环境状态和生物响应 3 个方面选取 18 项指标构建乐清湾海湾生态系统健康评价综合指标体系, 并利用可拓分析和组合赋权法对乐清湾生态系统健康现状进行综合评价。研究表明: 春季和夏季乐清湾全湾生态系统健康水平分别呈极差和中等状态, 夏季优于春季, 整体生态系统健康状况不容乐观。春季乐清湾生态系统健康水平内湾、中湾和外湾分别为极差、优秀和极差, 并在空间上呈现出中湾最好, 内湾次之, 外湾最差的趋势; 夏季乐清湾生态系统健康水平内湾、中湾和外湾分别为中等、优秀和中等, 健康水平明显优于春季, 并在空间上呈现出中湾优于外湾, 内湾最差的趋势。人口密度、单位面积 COD 排放量、自然岸线保持率、有机污染指数、营养水平指数、底栖生物多样性指数和春季初级生产力是制约乐清湾生态系统健康的主要因素。为了改善乐清湾生态系统健康, 应加强土地利用监督管理, 控制海水养殖强度, 提高生活污水处理率, 建立湿地自然保护区, 同时发展海洋观光旅游等绿色产业。

关键词: 海湾生态系统; 健康评价; 可拓分析; 组合赋权法; 乐清湾

文章编号: 0253-2468(2016)06-2272-09

中图分类号: X821

文献标识码: A

Evaluation of marine ecosystem health based on extension analysis and combination weighting method in Yueqing Bay, Zhejiang, China

XIE Xuefeng^{1,2}, JIANG Guojun¹, WU Tao^{1,*}, BIAN Huajing¹, ZHANG Yong¹

1. College of Geography and Environmental Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004

2. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023

Received 17 September 2015;

received in revised form 25 November 2015;

accepted 25 November 2015

Abstract: Based on RS/GIS technology in combination with remote sensing image data, environmental monitoring data and social economic data, this study applied the PSR model to construct the ecosystem health comprehensive evaluation index system with 18 evaluation indexes selected from land pressure, environment state and biological response. The extension analysis and combination weighting method were used to evaluate the Yueqing Bay ecosystem health. Overall, the ecosystem health status of Yueqing Bay was extremely poor in spring while moderate in summer. In spring, the ecosystem health status in inner bay, middle bay and outer bay was extremely poor, excellent and extremely poor, respectively, with middle bay the best and outer bay the worst. In summer, the ecosystem health status in inner bay, middle bay and outer bay were moderate, excellent and moderate, respectively, with middle bay the best and inner bay the worst. The crucial constraints of ecosystem health in Yueqing Bay were population density, per unit area COD emissions, natural shoreline retention, index of organic pollutants, index of nutritional level, index of benthic biodiversity and spring primary productivity of phytoplankton. In order to continuously improve the ecosystem health, we should strengthen the land use supervision and management, control the intensity of mariculture, improve the treatment rate of living sewage, establish the wetland nature reserves, and develop green industry such as marine tourism.

基金项目: 浙江省科技厅公益性项目 (No.2013C33029); 浙江省教育厅资助项目 (No.Y201226102); 浙江省大学生科技创新活动计划项目 (No.2014R404058, 2013R404053)

Supported by the Science and Technology Agency Foundation of Zhejiang Province (No.2013C33029), the Funded Projects of Education Department of Zhejiang Province (No.Y201226102) and the University Student Innovation Program of Zhejiang Province (No.2014R404058, 2013R404053)

作者简介: 解雪峰 (1991—), 男, E-mail: xiexuefeng2008@126.com; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: Twu@zjnu.cn

Biography: XIE Xuefeng (1991—), male, E-mail: xiexuefeng2008@126.com; * **Corresponding author**, E-mail: Twu@zjnu.cn

Keywords: bay ecosystem; health evaluation; extension analysis; combination weighting method; Yueqing Bay

1 引言(Introduction)

海湾位于河/海/陆/气/人类社会五大介质作用的交集点上,既是气候变化的敏感区,也是生态环境的脆弱区,在调节气候、净化环境、保护生物多样性等方面发挥着极其重要的作用(Albayrak *et al.*, 2006; Halpern *et al.*, 2012; 吴涛等, 2012). 其发展变化直接反映人类社会与自然环境的物质与能量交换,其生态系统健康状况不仅关系到本地区的自然环境和生态安全,也影响到人类社会的和谐发展. 随着沿海地区陆源污染物排放强度的日益增强,海湾生态系统呈现出高“病态化”的特征,生态服务功能逐渐衰退(物质生产功能、污染物净化功能、生物栖息地功能等)(彭涛等, 2009). 因此,海湾的生态系统健康研究成为海洋生态学家和环境科学家们最为关注的区域,也是可持续发展的优先区域(李虎等, 2014). 当前,我国海湾生态系统健康评价仍处于起步阶段,海湾生态系统健康评价的基本框架不统一,指标体系还有待进一步完善. 生态系统健康评价方法主要分为指示物种法(Sonstegard *et al.*, 1983; 王义平等, 2008)和指标体系法(Muniz *et al.*, 2011; 解雪峰等, 2015). 指示物种法虽然针对性强、简单易行,能够直观指示生态系统健康状况,但也存在着指示物种筛选不明确、部分参数选择不合理、未考虑社会经济和人类健康及未考虑同一组织水平内指示物种间的相互作用等诸多缺陷. 指标体系法可以从不同角度和尺度描述生态系统的基本特征,结合物理、化学和生态毒理学等方法,可以较为全面地反映生态系统的结构、功能及受胁迫后的恢复力等状况.

为能够揭示更加丰富的评价信息,解决多因子评价中不相容的复杂问题,蔡文教授在 20 世纪 80 年代提出了可拓分析,主要通过计算单个指标与各标准等级的关联系数得到综合评价结果(张锐等, 2013). 海湾生态系统健康的各项评估指标的结果具有不相容性,因此,利用可拓分析评价海湾生态系统健康是可行的. 当前,可拓分析多用于环境质量、水资源承载力和土地生态安全等评价研究中,尚未应用于海湾生态系统健康评价的研究. 近年来,随着乐清湾沿岸经济的快速发展、滩涂资源的过度开发,陆上和海上人为活动产生的大量污染物进入海洋环境,造成近岸海域水质恶化、生态退化、生产力

下降,极大地破坏了海洋生态环境,甚至影响到沿岸地区社会经济的进一步健康发展,引起了众多生态学家和海洋学家的关注. 基于此,本文结合乐清湾的环境污染现状和生态系统状况,从陆源压力、环境状态和生物响应 3 个方面构建生态系统健康评价指标体系,采用可拓分析方法分析其生态系统健康状况并探究限制海洋生态系统健康的主要因子,以为海洋生态文明建设提供技术支持.

2 材料与方法(Material and methods)

2.1 研究区域

乐清湾(120°57'55"~121°17'09"E, 27°59'09"~28°24'16"N)位于浙江省南部瓯江入海口北侧,东、北、西三面由低山丘陵环抱,向南开敞,形态狭长,呈葫芦状,为浙江省最大的半封闭式海湾. 乐清湾南北长约 42 km,东西平均宽约 10 km,口门宽约 21 km,中部窄处约 4.5 km,海域面积约为 463.6 km²,平均水深 10 m 左右,潮滩面积约 220.8 km²,海湾大陆岸线长约 184.7 km(中国海湾志编纂委员会, 1993). 乐清湾半封闭式的地形使其自净能力较差,生态环境脆弱. 乐清湾沿岸县市经济发达,均位于全国百强县前列,其中,三次产业结构比重为 9:53:36. 临港工业稳步发展,海洋渔业产值较为稳定,海洋旅游业逐渐兴起.

2.2 数据来源与处理

研究数据包括数字影像数据、社会经济数据和海洋综合调查数据,其中,数字影像数据由地球系统科学共享平台——长三角数据共享平台提供,社会经济数据由乐清市、温州市和玉环县各相关单位提供;海洋综合调查数据来源于浙江大学 2006 年 8 月和 2007 年 4 月对乐清湾的综合调查,主要调查海洋水质、沉积物、生物残毒和海洋生物等项目,其中,海洋沉积物和生物残毒的调查时间为 2007 年 4 月. 样品采集和分析均按照《海洋监测规范》(GB17378—2007)(国家质量监督检验检疫总局等, 2007a)和《海洋调查规范》(GB/T12763—2007)(国家质量监督检验检疫总局等, 2007b)中规定的方法进行,调查范围和站点设置如图 1 所示.

2.3 研究方法

2.3.1 评价指标体系的构建 本文参考我国近岸《海洋生态健康评价指南》(HY/1087—2005)(国家海洋局, 2005)、美国近岸海域状况评价体系(The

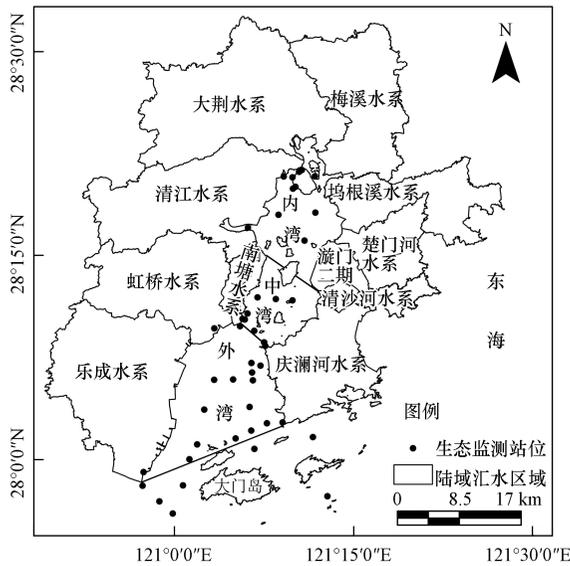


图1 乐清湾生态监测站

Fig.1 Sampling stations for ecological environment investigation in Yueqing Bay

United States Environmental Protection Agency, 2001)、欧盟近岸海域生态质量状况评价体系 (The European Parliament and the Council of the European Union, 2010) 及李纯厚等 (2013) 的研究成果, 结合

乐清湾环境质量现状, 将乐清湾划分为内湾、中湾和外湾, 利用联合国经济合作开发署 (OECD) 提出的压力-状态-响应 (PSR) 框架模型, 从陆源压力、环境状态和系统响应 3 个方面选择 18 项指标构建乐清湾生态系统健康评价指标体系 (表 1)。

部分评价指标计算方法如下: 人为干扰度 H 反映陆域研究区受人为干扰活动的影响程度 (解雪峰等, 2014), 有机污染指数 A 反映水体受有机污染物污染的程度 (李纯厚等, 2013), 营养水平指数 E 采用营养指数法对水体营养水平进行评价 (李纯厚等, 2013), 重金属综合污染指数 P 反映重金属污染程度, 采用综合指数法进行评价 (国家环境保护总局, 1993), 生物多样性指数 DI 反映生态系统的稳定性和复杂性, 采用 Shannon-Weaver 多样性指数进行评价 (国家质量监督检验检疫总局等, 2007), 初级生产力 G 根据叶绿素 a 浓度估算 (Cadee *et al.*, 1974), 具体计算公式如下:

$$H = \frac{H_C + H_R}{T} \times 100\% \quad (1)$$

$$A = \frac{C_{\text{COD}}}{C'_{\text{COD}}} + \frac{C_{\text{IN}}}{C'_{\text{IN}}} + \frac{C_{\text{IP}}}{C'_{\text{IP}}} - \frac{C_{\text{DO}}}{C'_{\text{DO}}} \quad (2)$$

表1 乐清湾生态系统健康评价指标体系及指标权重

Table 1 Evaluation index system and weight of marine ecosystem health in Yueqing Bay

目标层	准则层	指标层	m	n		q		
				春季	夏季	春季	夏季	
A 乐清湾生态系统健康评价指标体系	B ₁ 陆源压力	C ₁ 人口密度 (人·km ⁻²) ^D	0.0207	0.0457	0.0561	0.0332	0.0384	
		C ₂ 人均 GDP (元·人 ⁻¹) ^A	0.0202	0.0504	0.0617	0.0353	0.0410	
		C ₃ 人为干扰度 ^D	0.0279	0.0738	0.0904	0.0508	0.0592	
		C ₄ 单位面积 COD 排放量 ^D	0.0368	0.0610	0.0748	0.0489	0.0558	
		C ₅ 自然岸线保持率 ^A	0.0474	0.1068	0.1310	0.0771	0.0892	
		C ₆ 滩涂围垦强度 ^D	0.0703	0.1011	0.1240	0.0857	0.0971	
	B ₂ 环境状态	B ₂₁ 水环境	C ₇ 有机污染指数 ^D	0.1342	0.0446	0.0087	0.0894	0.0715
			C ₈ 营养水平指数 ^D	0.0958	0.0443	0.0152	0.0700	0.0555
			C ₉ 海水重金属指数 ^D	0.0300	0.0006	0.0545	0.0153	0.0423
			C ₁₀ 海水石油类含量 (mg·L ⁻¹) ^D	0.0187	0.0518	0.0636	0.0353	0.0411
		B ₂₂ 沉积环境	C ₁₁ 沉积物重金属指数 ^D	0.0512	0.0487	0.0597	0.0499	0.0554
			C ₁₂ 沉积物石油类含量 (×10 ⁻⁶) ^D	0.0366	0.0509	0.0624	0.0437	0.0495
	B ₂₃ 生物残毒	C ₁₃ 生物体重金属指数 ^D	0.0333	0.0013	0.0000	0.0173	0.0167	
		C ₁₄ 生物体石油类含量 (mg·kg ⁻¹) ^D	0.0259	0.0471	0.0577	0.0365	0.0418	
	B ₃ 生物响应	C ₁₅ 浮游植物多样性指数 ^A	0.0685	0.0001	0.1020	0.0343	0.0853	
		C ₁₆ 浮游动物多样性指数 ^A	0.0627	0.0572	0.0151	0.0599	0.0389	
		C ₁₇ 底栖生物多样性指数 ^A	0.0917	0.0746	0.0032	0.0832	0.0474	
		C ₁₈ 初级生产力 (mg·m ⁻² ·d ⁻¹) ^A	0.1280	0.1400	0.0199	0.1340	0.0740	

注: A 代表升型指标, 即指标值越大, 健康水平越高; D 代表降型指标, 即指标值越大, 健康水平越低; m 为层次分析法权重, n 为熵权法权重, q 为二者的复合权重; 初级生产力单位以 C 计。

$$E = \frac{C_{\text{COD}} \times C_{\text{IN}} \times C_{\text{IP}}}{1500} \quad (3)$$

$$P = \frac{1}{n} \sum_1^n \frac{C_i}{C} \quad (4)$$

$$\text{DI} = - \sum_{i=1}^s \left(\frac{n_i}{N} \right) \log_2 \left(\frac{n_i}{N} \right) \quad (5)$$

$$G = \frac{C_a \times D \times Q}{2} \quad (6)$$

式中, H_C 为耕地面积 (km^2), H_R 为建设用地面积 (km^2), T 为陆域总面积 (km^2), C_{COD} 、 C_{IN} 、 C_{IP} 、 C_{DO} 分别为化学耗氧量、无机氮、活性磷酸盐、溶解氧的实际测量值 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); C'_{COD} 、 C'_{IN} 、 C'_{IP} 、 C'_{DO} 分别为各因子对应的一类海水水质标准值 (GB3097—1997), C_i 为第 i 种重金属的实际测量值 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), C 为第 i 种重金属的评价标准值 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), n_i 为第 i 种的个体数量 ($\text{个} \cdot \text{m}^{-3}$), N 为总生物数量 ($\text{个} \cdot \text{m}^{-3}$), s 为总物种数, G 为初级生产力 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 以 C 计), C_a 为叶绿素 a 浓度 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$), D 为光照时间 (h), Q 为同化效率 ($\text{mg C} \cdot \text{mg}^{-1} \text{Chl} \cdot \text{h}^{-1}$).

2.3.2 可拓分析 海湾生态系统健康可拓分析模型构建主要分为以下几个步骤 (Feng *et al.*, 2014).

1) 构造模糊物元

在可拓分析中, 海湾生态系统健康 N 及其特征向量 C (评价指标) 和特征量值 x (评价指标现状值) 共同构成海湾生态系统健康物元 $R = (N, C, x)$. 若海湾生态系统健康 N 需要用 n 个特征向量 C_1, C_2, \dots, C_n 及其相应的量值 x_1, x_2, \dots, x_n 来描述, 则称 R 为 n 维模糊物元, 对应的物元矩阵为:

$$R = \begin{pmatrix} N & C_1 & x_1 \\ & C_2 & x_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{pmatrix} \quad (7)$$

2) 确定经典域及节域

海湾生态系统健康的经典域物元矩阵可表示为:

$$R_{oj} = (N_{oj}, C_i, x_{oij}) = \begin{pmatrix} N_{oj} & C_1 & x_{o1j} \\ & C_2 & x_{o2j} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & x_{ojj} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N_{oj} & C_1 & (a_{o1j}, b_{o1j}) \\ & C_2 & (a_{o2j}, b_{o2j}) \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & (a_{ojj}, b_{ojj}) \end{pmatrix} \quad (8)$$

式中, R_{oj} 为经典域物元; N_{oj} 为海湾生态健康的第 j 个等级 ($j=1, 2, \dots, m$); C_i 为海湾生态健康的第 i 个评价指标; x_{oij} 为 N_{oj} 关于 C_i 的量值范围, 即各等级关于对应特征的经典域为 (a_{oij}, b_{oij}) .

海湾生态系统健康的节域物元矩阵可表示为:

$$R_p = (N_p, C_i, x_{pi}) = \begin{pmatrix} N_p & C_1 & x_{p1} \\ & C_2 & x_{p2} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & x_{pn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P & C_1 & (a_{p1}, b_{p1}) \\ & C_2 & (a_{p2}, b_{p2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & (a_{pn}, b_{pn}) \end{pmatrix} \quad (9)$$

式中, R_p 为节域物元; N_p 为海湾生态健康全体等级; x_{pi} 为 R_p 关于 C_i 的量值范围—节域 (a_{pi}, b_{pi}) ; 这里要求 $x_{oij} \in x_{pi}$.

3) 确定待评物元

把待评对象 N_k 的物元表示为 R_k :

$$R_k = (N_k, C_i, x_{ki}) = \begin{pmatrix} N_k & C_1 & x_{k1} \\ & C_2 & x_{k2} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & x_{kn} \end{pmatrix} \quad (10)$$

式中, N_k 为待评事物 ($k=1, 2, \dots, n$); x_{ki} 为 N_k 关于 C_i 的量值, 即各个特征的实际值.

4) 确定关联函数及关联度

海湾生态系统健康评价指标关联函数 $K_{(C_i)_j}$ 的定义为:

$$K_{(C_i)_j} = \begin{cases} \frac{-\rho_{ij}(v_i, x_{oij})}{|x_{oij}|}, & v_i \in v_o \\ \frac{\rho_{pi}(v_i, x_{pi})}{\rho_{pi}(v_i, x_{pi}) - \rho_{ij}(v_i, x_{oij})}, & v_i \notin v_o \end{cases} \quad (11)$$

式中, $K_{(C_i)_j}$ 为第 i 项指标相应于第 j 个海湾生态健康等级的关联度, 其中:

$$\begin{cases} \rho_{ij}(v_i, x_{oij}) = \left| v_i - \frac{1}{2}(a_{oij} + b_{oij}) \right| - \frac{1}{2}(b_{oij} - a_{oij}) \\ \rho_{pi}(v_i, x_{pi}) = \left| v_i - \frac{1}{2}(a_{pi} + b_{pi}) \right| - \frac{1}{2}(b_{pi} - a_{pi}) \end{cases} \quad (12)$$

式中, $\rho_{ij}(v_i, x_{oij})$ 为点 v_i 与对应特征向量有限区间 $x_{oij} = (a_{oij}, b_{oij})$ 的距离; $\rho_{pi}(v_i, x_{pi})$ 为点 v_i 与对应特征向量节域 $x_{pi} = (a_{pi}, b_{pi})$ 的距离; $|x_{oij}| = |b_{oij} - a_{oij}|$; v_i, x_{oij}, x_{pi} 分别为待评海湾生态系统健康物元的量

值、经典域物元的量值范围和节域物元的量值范围。

5) 确定评价指标权重

评价指标的权重决定各评价指标对海湾生态系统健康的贡献状况,直接影响到评价精度。组合赋权法较好地克服了主观赋权法和客观赋权法的缺点,即兼顾到决策者对评价指标的偏好,又减少了赋权的主观性,使其既能反映指标的主观信息,又能反映客观信息(Sun *et al.*, 2012; Liu *et al.*, 2014)。本文参考指标的重要性,采用线性加权法将层次分析法和熵权法的复合权重作为指标综合权重,线性加权法计算公式如下:

$$W = \sum_{k=1}^n \alpha_k \omega \quad (13)$$

式中, α_k 为第 k 种赋权方法的加权参数, ω 为组合权重向量。本文取加权参数 $\alpha = 0.50$, 则乐清湾生态系统健康评价指标权重计算结果见表 1。

6) 计算综合关联度并确定评价等级

待评对象 N_k 的关于等级 j 的综合关联度 $K_j(N_k)$ 为:

$$K_j(N_k) = \sum_{i=1}^n \omega_i k_j(x_i) \quad (14)$$

式中, $K_j(N_k)$ 为待评对象 N_k 关于等级 j 的综合关联度; $k_j(x_i)$ 为待评对象 N_k 关于等级 j 的单指标关联度 ($j=1, 2, \dots, m$); ω_i 为各评价指标的权重。若 $K_{j_i} = \max [k_j(x_i)]$ ($j=1, 2, \dots, n$), 则待评对象第 i 项指标属

于海湾生态健康的 j 等级; 若 $K_{j_k} = \max [K_j(N_k)]$ ($j=1, 2, \dots, n$), 则待评对象 N_k 属于海湾生态健康的 j 等级。

K_{j_k} 值越大表明海湾生态系统健康在对应的等级中越稳定。若 K_{j_k} 值较小, 则海湾生态系统健康有向仅次于该等级 k 值的等级转化的趋势, 两等级的值越接近, 则转化的可能性越大; 若 K_{j_k} 值在所有等级中均为负值, 表明海湾生态系统健康在设定标准等级之外, 并向最大 K_{j_k} 值对应等级转化(Pan *et al.*, 2015)。

2.3.3 海湾生态系统健康经典域和节域的确定

根据海湾生态系统健康的可拓性, 将其划分为优秀、良好、中等、差和极差 5 个等级, 分别用 I~V 级来表示。乐清湾生态系统健康经典域的确定主要参考浙江省《生态省建设规划纲要》(浙江省人民政府, 2003)、我国《近岸海洋生态健康评价指南》(HY/T087—2005)、《海水水质标准》(GB3097—1997)(国家环境保护总局, 1997)、《海洋生物质量标准》(GB18421—2001)(国家质量监督检验检疫总局, 2001)和《海洋沉积物质量标准》(GB18668—2002)(国家质量监督检验检疫总局, 2002)及相关文献报道(况琪军等, 2005)和专家咨询。乐清湾生态系统健康评价经典域复合物元矩阵和节域矩阵的取值范围如表 2 所示。

表 2 乐清湾生态系统健康评价指标经典域、节域的取值范围

Table 2 Valuing range on the classic field and section domain of evaluation index

评价指标	经典域取值区间					节域取值区间	参考标准
	I	II	III	IV	V		
C_1	[0, 200)	[200, 400)	[400, 600)	[600, 1000)	[1000, 1500)	[0, 1500)	浙江生态省建设规划纲要
C_2	[8, 10)	[6, 8)	[4, 6)	[2, 4)	[0, 2)	[0, 10)	浙江生态省建设规划纲要
C_3	[0, 0.2)	[0.2, 0.4)	[0.4, 0.6)	[0.6, 0.8)	[0.8, 1.0)	[0, 1.0)	浙江生态省建设规划纲要
C_4	[0, 0.25)	[0.25, 0.5)	[0.5, 1.0)	[1.0, 1.5)	[1.5, 2.5)	[0, 2.5)	浙江生态省建设规划纲要
C_5	[80%, 100%)	[60%, 80%)	[40%, 60%)	[20%, 40%)	[0, 20%)	[0, 100%)	近岸海洋生态健康评价指南
C_6	[0, 0.2)	[0.2, 0.4)	[0.4, 0.6)	[0.6, 0.8)	[0.8, 1.0)	[0, 1.0)	近岸海洋生态健康评价指南
C_7	[0, 2)	[2, 4)	[4, 6)	[6, 8)	[8, 10)	[0, 10)	海水水质标准
C_8	[0, 0.5)	[0.5, 1.0)	[1.0, 2.0)	[2.0, 3.0)	[3, 30)	[0, 30)	海水水质标准
C_9	[0, 0.5)	[0.5, 1.0)	[1.0, 2.0)	[2.0, 4.0)	[4.0, 6.0)	[0, 6.0)	海水水质标准
C_{10}	[0, 0.03)	[0.03, 0.05)	[0.05, 0.3)	[0.3, 0.5)	[0.5, 1.0)	[0, 1.0)	海水水质标准
C_{11}	[0, 0.5)	[0.5, 1.0)	[1.0, 2.0)	[2.0, 4.0)	[4.0, 6.0)	[0, 6.0)	海洋沉积物质量标准
C_{12}	[0, 200)	[200, 400)	[400, 800)	[800, 1200)	[1200, 1600)	[0, 1600)	海洋沉积物质量标准
C_{13}	[0, 0.5)	[0.5, 1.0)	[1.0, 2.0)	[2.0, 4.0)	[4.0, 6.0)	[0, 6.0)	海洋沉积物质量标准
C_{14}	[0, 15)	[15, 30)	[30, 50)	[50, 80)	[80, 100)	[0, 100)	海洋沉积物质量标准
C_{15}	[3.5, 4.5)	[2.5, 3.5)	[1.5, 2.5)	[0.5, 1.5)	[0, 0.5)	[0, 4.5)	海洋生物质量标准
C_{16}	[3.5, 4.5)	[2.5, 3.5)	[1.5, 2.5)	[0.5, 1.5)	[0, 0.5)	[0, 4.5)	海洋生物质量标准
C_{17}	[3.5, 4.5)	[2.5, 3.5)	[1.5, 2.5)	[0.5, 1.5)	[0, 0.5)	[0, 4.5)	海洋生物质量标准
C_{18}	[500, 700)	[400, 500)	[300, 400)	[200, 300)	[0, 200)	[0, 700)	海洋生物质量标准

3 结果与分析(Results and analysis)

3.1 乐清湾生态系统健康物元分析综合评价

根据乐清湾生态系统健康评价指标量值,将待评物元数据代入到物元模型中,得到乐清湾生态系统健康评价指标关联度.以内湾春季 C_1 指标(人口

密度)计算结果为例,将 C_1 指标量值 $v_1=744$ 代入关联度函数公式,则对应的等级关联度分别为:
 $K_{(C1)1} = -0.422$ 、 $K_{(C1)2} = -0.316$ 、 $K_{(C1)3} = -0.162$ 、 $K_{(C1)4} = 0.096$ 、 $K_{(C1)5} = -0.256$,可判定内湾的 C_1 指标属于 IV 级,即差状态.同理可求得其他指标的关联度和等级,具体见表 3.

表 3 乐清湾生态系统健康评价指标关联度

Table 3 Relevancy of ecosystem health in Yueqing Bay

关联度 (春季)	各等级关联度(内湾)					等级				关联度 (夏季)	等级			
	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级	内湾	中湾	外湾	全湾		内湾	中湾	外湾	全湾
$K_{(C1)j}$	-0.422	-0.316	-0.162	0.096	-0.256	IV	IV	V	IV	$K_{(C1)j}$	IV	IV	V	IV
$K_{(C2)j}$	-0.337	-0.007	0.007	-0.322	-0.491	III	II	II	II	$K_{(C2)j}$	III	II	II	II
$K_{(C3)j}$	-0.250	0.100	-0.250	-0.500	-0.625	II	III	III	II	$K_{(C3)j}$	II	III	III	II
$K_{(C4)j}$	-0.569	-0.515	-0.353	-0.030	0.012	V	I	V	IV	$K_{(C4)j}$	V	I	V	IV
$K_{(C5)j}$	-0.556	-0.408	-0.113	0.045	-0.304	IV	IV	V	IV	$K_{(C5)j}$	IV	IV	V	IV
$K_{(C6)j}$	-0.315	0.030	-0.075	-0.383	-0.538	II	II	IV	III	$K_{(C6)j}$	II	II	IV	III
$K_{(C7)j}$	-0.698	-0.597	-0.395	0.042	-0.148	IV	IV	IV	IV	$K_{(C7)j}$	III	II	II	II
$K_{(C8)j}$	-0.490	-0.479	-0.456	-0.431	0.310	V	V	V	V	$K_{(C8)j}$	V	V	III	V
$K_{(C9)j}$	0.012	-0.860	-0.930	-0.965	-0.983	I	I	I	I	$K_{(C9)j}$	I	I	I	I
$K_{(C10)j}$	0.000	0.000	-0.400	-0.900	-0.940	II	I	I	I	$K_{(C10)j}$	I	II	I	I
$K_{(C11)j}$	0.040	-0.480	-0.740	-0.870	-0.935	I	I	I	I	$K_{(C11)j}$	I	I	I	I
$K_{(C12)j}$	0.023	-0.817	-0.909	-0.954	-0.970	I	I	I	I	$K_{(C12)j}$	I	I	I	I
$K_{(C13)j}$	-0.107	0.011	-0.432	-0.716	-0.858	II	II	III	II	$K_{(C13)j}$	II	II	III	II
$K_{(C14)j}$	0.030	-0.800	-0.900	-0.940	-0.963	I	I	I	I	$K_{(C14)j}$	I	I	I	I
$K_{(C15)j}$	-0.252	0.109	-0.245	-0.497	-0.623	II	II	II	II	$K_{(C15)j}$	IV	III	IV	III
$K_{(C16)j}$	-0.311	0.040	-0.090	-0.393	-0.545	II	II	II	II	$K_{(C16)j}$	II	II	II	II
$K_{(C17)j}$	-0.523	-0.332	0.038	-0.092	-0.412	III	II	IV	III	$K_{(C17)j}$	III	III	III	III
$K_{(C18)j}$	-0.944	-0.930	-0.907	-0.860	0.040	V	V	V	V	$K_{(C18)j}$	I	III	V	III

将各评价指标的关联度值与对应权重相乘求和,得到生态系统健康综合关联度,并判定等级.以春季内湾为例, $K_1 = -0.4278$ 、 $K_2 = -0.3946$ 、 $K_3 = -0.3949$ 、 $K_4 = -0.4327$ 、 $K_5 = -0.3882$,判定春季内湾

的生态系统健康等级属于 V 级,即极差水平.同理可求得其他各单元的综合关联度和健康等级.从表 4 可知,乐清湾全湾生态系统健康水平春季劣于夏季,其中,春季为极差状态,夏季为中等状态.从空间

表 4 乐清湾生态系统健康评价结果

Table 4 Results of ecosystem health evaluation in Yueqing Bay

季节	区域	综合关联度					等级
		I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级	
春季	内湾	-0.4278	-0.3946	-0.3949	-0.4327	-0.3882	向 V 级转化
	中湾	-0.3749	-0.3950	-0.4942	-0.5310	-0.4601	向 I 级转化
	外湾	-0.5041	-0.5023	-0.4938	-0.4544	-0.3329	向 V 级转化
	全湾	-0.4326	-0.4155	-0.3981	-0.4235	-0.3918	向 V 级转化
夏季	内湾	-0.3472	-0.3349	-0.2853	-0.4122	-0.5340	向 III 级转化
	中湾	-0.2634	-0.2838	-0.3743	-0.4584	-0.5734	向 I 级转化
	外湾	-0.4238	-0.4276	-0.4055	-0.4311	-0.4539	向 III 级转化
	全湾	-0.3215	-0.3141	-0.2908	-0.3555	-0.5052	向 III 级转化

分布情况来看,春季乐清湾生态系统健康水平中湾向优秀水平转化,内湾和外湾分别向极差水平转化,其中,外湾向极差水平转化的阻力较内湾要小;这主要是因为中湾的单位面积 COD 排放量小、围垦强度较低;而外湾的人口密度、单位面积 COD 排放量、滩涂围垦强度均较大,底栖生物多样性较低.夏季生态系统健康水平中湾同样向优秀水平转化,且转化阻力比春季小;内湾和外湾分别向中等水平转化,其中,外湾向中等水平转化的阻力较内湾要小;这主要是因为夏季内湾的有机污染指数和营养水平指数较高,而外湾与湾外水体交换频繁导致有机污染指数和营养水平指数相对较低.

3.2 乐清湾生态系统健康限制性因素分析

根据乐清湾生态系统健康评价结果,结合乐清湾生态系统演变特征,将等级为差和极差的评价指标作为影响乐清湾生态系统健康的限制性因子.

1) 陆源压力较大,人口密度、单位面积 COD 排放量和自然岸线保持率成为其主要限制性因素(图 2).根据统计计算,乐清湾地区人口密集,平均人口密度达到了 $910 \text{ 人} \cdot \text{km}^{-2}$,外湾乡镇甚至超过 $1200 \text{ 人} \cdot \text{km}^{-2}$,远超浙江省平均水平,较高的人口压力使得人们对各种资源的需求量增大,人地矛盾更加突出,进而导致城市建筑面积增加、海洋捕捞和养殖活动增多及滩涂围垦加剧.乐清湾沿岸人口密集,工业企业众多,海洋养殖面积广.根据统计,乐清湾各种来源的 COD 排放总量达到了 $2706.08 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$,污染物的大量排放严重污染海洋环境.乐清湾滩涂围垦活动剧烈,近 10 年来,平均每年围垦面积 3.14 km^2 ,并呈上升趋势;自然岸线从 1981 年的 155 km 减少到 2007 年的 58 km ,自然岸线保持率仅为 25.6%,自然岸线的剧烈退化导致滨海生境遭受严重破坏,生物多样性降低.

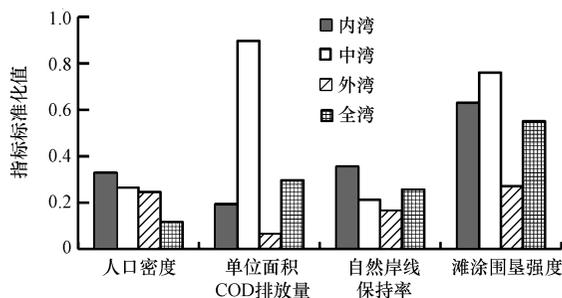


图 2 乐清湾生态系统健康陆源压力指标

Fig.2 Limit index of land-sourced pressure of ecosystem health in Yueqing Bay

2) 水环境质量较差,其中,有机污染指数和营养水平指数较高,水体富营养化严重,已经成为限制乐清湾环境状态的主要因素.根据乐清湾 27 个水质站点的监测结果计算显示,春季有机污染指数范围为 $6.81 \sim 7.58$,平均为 7.04 ;夏季范围为 $2.32 \sim 5.48$,平均为 3.34 .有机污染指数水平季节变化差异较大,夏季(良好)明显优于春季(差).春季营养水平指数范围为 $5.92 \sim 21.26$,平均为 10.79 ;夏季范围为 $0.42 \sim 11.12$,平均为 3.84 ,二者虽均处于极差水平,但夏季的营养水平状况明显优于春季.这可能是由于夏季研究区雨量充沛,沿岸河流入海径流量较大,稀释了水中的 N、P 等营养物质浓度.整体来说,除 COD 外,IN、IP 和 DO 均超出一类海水水质标准(表 5),这是由于大规模的海水养殖使得残余饵料和鱼类排泄物中的 N、P 等物质大量排入海中,造成海水有机污染和富营养化.

表 5 乐清湾水质调查结果统计

海区	季节	COD	IN	IP	DO
内湾	春季	1.13	1.113	0.045	9.31
	夏季	1.40	0.578	0.052	9.47
中湾	春季	1.17	1.019	0.039	8.85
	夏季	1.23	0.325	0.035	9.30
外湾	春季	1.06	1.036	0.040	8.96
	夏季	0.68	0.309	0.027	8.20
全湾	春季	1.11	1.050	0.041	9.02
	夏季	1.02	0.381	0.036	8.85
I类水质标准		2	0.2	0.015	6

3) 生物响应水平一般,底栖生物多样性指数较低,春季初级生产力极低.监测结果显示,乐清湾春季底栖生物多样性指数变化范围在 $0 \sim 2.73$ 之间,平均为 1.82 ;夏季变化范围在 $0 \sim 2.81$ 之间,平均为 1.71 .底栖生物多样性指数变化不大,均处于一般水平(表 6).已有研究表明,围垦活动和海水养殖可能占有海湾部分重要生境,对原有生境造成一定程度的干扰(傅明珠等,2013);此外,海水养殖也会对生物多样性产生一定的负面影响,例如,贝类养殖会影响浮游植物的数量丰度和群落结构进而影响底栖生物多样性(吴隆杰等,2008).乐清湾春季初级生产力(以 C 计)范围为 $9.8 \sim 46.2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,平均为 $20.1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,远低于全年平均的 $177.02 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,极大地限制了春季的生态系统健康水平(图 3).

表 6 乐清湾底栖生物多样性指数

Table 6 Index of benthic biodiversity in Yueqing Bay

海区	多样性指数(春季)		多样性指数(夏季)	
	范围	平均值	范围	平均值
内湾	1.52~1.90	1.67	0.59~2.81	1.81
中湾	2.57~2.73	2.65	0.92~2.52	1.69
外湾	0~2.25	1.42	0~2.58	1.66
全湾	0~2.73	1.82	0~2.81	1.71

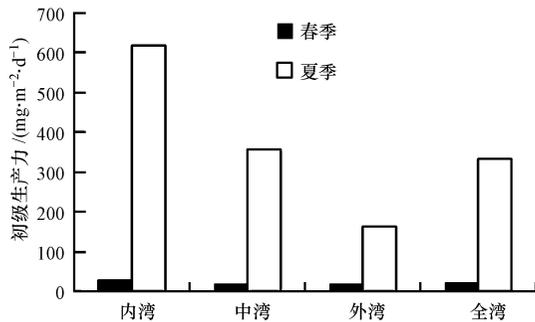


图 3 乐清湾初级生产力

Fig.3 Value of the primary production in Yueqing Bay

4 讨论 (discussion)

传统的生态系统评价研究中通常根据评价综合值人为划分为若干等级,主观性较强,且无法识别单指标、总体指标与评价等级之间的隶属程度,会遗漏指标之间的一些评价信息,评价结果不会显示超出等级外的中间状态.可拓分析法的关联函数属于 $(-\infty, +\infty)$,能极大拓展研究范围,揭示更多的分异信息;并通过指标的关联函数计算得到单项指标状态,再通过模型集成得到多指标的综合水平,显示综合评价结果的中间转化状态,提高了等级判定的客观性和精度(左太安等,2014).通过评价,乐清湾生态系统健康水平较低,其综合关联度的值都处于 $-1 \sim 0$ 之间,说明乐清湾生态系统健康水平非常不稳定,不论春季还是夏季,乐清湾生态系统健康都可认定为某一标准又不完全符合该标准,但都具备向该标准转化的条件.以春季内湾为例,其综合关联度值 $-0.3882 < 0$,说明春季内湾生态系统健康水平不完全符合 V 级的标准但具备向 V 级转化的条件,这也符合单项指标评价的实际情况.根据 2007 年《中国海洋环境状况公报》(国家海洋局,2007)和 2007 年《浙江省海洋环境公报》(浙江省海洋渔业局,2007)评估显示,乐清湾生态系统处于亚健康状态,与本文的评价结果相近,从侧面上印证了本文

的评价结果是可信的.

乐清湾地形地貌复杂,土地利用类型多样,工业点源污染、农业面源污染和海水养殖污染强度不一,导致各海区生态系统健康水平有所差异且限制因子各不相同.将乐清湾分为内湾、中湾和外湾进行分别评价有利于揭示不同海区的限制因子,合理规划海洋功能,修复海洋生态环境,优化分配海洋环境容量.如内湾的主要限制因子为人口密度、单位面积 COD 排放量、自然岸线保持率、有机污染指数、营养水平指数和春季初级生产力,而外湾除此之外还包括滩涂围垦强度和底栖生物多样性指数.

由于影响海湾生态系统健康的因子众多,因此,将评价指标表现差或最差的定为限制因子虽然是可能的,但也具有很大的不确定性,因此,本文只能根据乐清湾生态系统的多元性和复杂性特征,结合乐清湾的主要生态压力(人口压力大、污染排放强、滩涂资源开发过度等)和生态环境质量现状(海水水质差、富营养化严重、初级生产力较低等)选取各项指标,基本能够反映乐清湾当前的生态系统健康状况.宋伦等(2013)对锦州湾生态系统的研究表明,围填海活动和陆源排污导致锦州湾生态系统健康处于非健康状态;Zheng 等(2013)研究表明,自然产品较少、碳储存不足、海洋环境质量较差是影响天津近岸海域生态系统健康的负面因子;Chen 等(2013)对浙江近岸海域的研究同样表明,人类活动尤其是陆源污染物排放导致生物多样性降低、生态服务功能和价值减少,这与本文的研究结果相似.

乐清湾养殖污染源和生活污染源分别占到污染物入海总量的 80.1%和 8.8%,因此,控制乐清湾海水养殖和沿海地区的生活污水处理是改善乐清湾生态环境的重要措施;此外,还应避免滩涂资源的过度开发,保护自然岸线,防止湿地退化(黄秀清等,2011).乐清湾外湾迁移扩散能力较强,环境容量较大,因此,工业和海水养殖等可适当增长;中湾和内湾区域旅游资源丰富,应以发展旅游等绿色产业为主,控制海水养殖面积,通过优化养殖结构,提高养殖效率,逐步减小养殖面积,同时适度发展社会效益较好、污染小的工业产业,以满足区域 GDP 增长和人口就业的需要,促进社会和谐发展.

5 结论 (conclusions)

1) 乐清湾全湾生态系统健康水平春季为极差状态,夏季为中等状态,春季劣于夏季,整体生态系

统健康状况不容乐观.从空间分布情况来看,春季乐清湾生态系统健康水平呈现:中湾>内湾>外湾,夏季呈现:中湾>外湾>内湾,造成乐清湾春、夏生态系统健康水平差异的原因主要是夏季内湾的有机污染指数和营养水平指数较高,而外湾与湾外水体交换频繁导致有机污染指数和营养水平指数相对较低.

2)乐清湾生态系统人口压力较大,单位面积COD排放量高,自然岸线退化严重;水环境质量较差,有机污染指数和营养水平指数较高,水体富营养化严重;生物响应中底栖生物多样性指数、春季初级生产力是限制乐清湾生态系统健康水平的主要因素.

参考文献 (References):

- Albayrak S, Balkis H, Zenetos A, *et al.* 2006. Ecological quality status of coastal benthic ecosystems in the Sea of Marmara [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 52(7): 790-799
- Cadee G C, Hegeman J. 1974. Primary production of the benthic microflora living on tidal flats in the dutch wadden sea [J]. *Netherlands Journal of Sea Research*, 8(2/3): 260-291
- Chen Z H, Pan D L, Bai Y. 2010. Study of coastal water zone ecosystem health in Zhejiang Province based on remote sensing data and GIS [J]. *Acta Oceanol Sin*, 29(5): 27-34
- Feng L H, Zhang J Z. 2014. Runoff forecast of drainage basin based on matter element analysis [J]. *Water Resources*, 41(6): 634-638
- 傅明珠, 蒲新明, 王宗灵, 等. 2013. 桑沟湾养殖生态系统健康综合评价 [J]. *生态学报*, 33(1): 238-248
- 国家海洋局. 2005. 近岸海洋生态健康评价指南 (HY/T087-2005) [M]. 北京: 中国标准出版社
- 国家海洋局. 2007. 中国海洋环境状况公报 [R]. 天津: 国家海洋信息中心. 1-10
- 国家环境保护总局. 1993. 环境影响评价技术导则—地面水环境 (HJ/T2.3-93) [M]. 北京: 中国标准出版社
- 国家环境保护总局. 1997. 海水水质标准 (GB3097-1997) [S]. 北京: 中国标准出版社
- 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 2007. 海洋监测规范 (GB17378-2007) [S]. 北京: 中国标准出版社
- 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 2007. 海洋调查规范 (GB/T12763-2007) [S]. 北京: 中国标准出版社
- 国家质量监督检验检疫总局. 2001. 海洋生物质量 (GB18421-2001) [S]. 北京: 中国标准出版社
- 国家质量监督检验检疫总局. 2002. 海洋沉积物质量 (GB18668-2002) [S]. 北京: 中国标准出版社
- Halpern B S, Longo C, Hardy D, *et al.* 2012. An index to assess the health and benefits of the global ocean [J]. *Nature*, 488: 615-620
- 黄秀清, 王金辉. 2011. 乐清湾海洋环境容量及污染物总量控制研究 [M]. 北京: 海洋出版社
- 况琪军, 马沛明, 胡征宇, 等. 2005. 湖泊富营养化的藻类生物学评价与治理研究进展 [J]. *安全与环境学报*, 5(2): 87-91
- 李纯厚, 林琳, 徐姗楠, 等. 2013. 海湾生态系统健康评价方法构建及在大亚湾的应用 [J]. *生态学报*, 33(6): 1798-1810
- 李虎, 宋秀贤, 俞志明, 等. 2014. 山东半岛近岸海域生态系统健康综合评价 [J]. *海洋科学*, 38(10): 40-45
- Liu H C, You J X, You X Y, *et al.* 2015. A novel approach for failure mode and effects analysis using combination weighting and fuzzy VIKOR method [J]. *Applied Soft Computing*, 28: 579-588
- Muniz P, Venturini N, Hutton M, *et al.* 2011. Ecosystem health of Montevideo coastal zone: A multi approach using some different benthic indicators to improve a ten-year-ago assessment [J]. *Journal of Sea Research*, 65(1): 38-50
- Pan G B, Xu Y P, Yu Z H, *et al.* 2015. Analysis of river health variation under the background of urbanization based on entropy weight and matter-element model: A case study in Huzhou City in the Yangtze River Delta, China [J]. *Environmental Research*, 139: 31-35
- 彭涛, 陈晓宏. 2009. 海河流域典型河口生态系统健康评价 [J]. *武汉大学学报(工学版)*, 42(5): 631-634
- Sonstegard R A, Leatherland J F. 1983. Great lakes cohosalmon as an indicator organism for ecosystem health [J]. *Marine Environmental Research*, 14: 1-4
- Sun J. 2012. Application of combination weighting method for environmental comparison and selection of line schemes in linear engineering [J]. *Environmental Science & Technology*, 35(7): 202-205
- The European Parliament and the Council of the European Union. 2010. On Criteria and Methodological Standards on Good Environmental Status of Marine Waters [OL]. <http://eur-lex.europa.eu/JOHtml.do?uri=OJ:L:2010:232;SOM;EN;HTML>
- The United States Environmental Protection Agency (EPA). National Coastal Condition Report IV [OL]. <http://water.epa.gov/type/oceb/assessmonitor/nccr/index.cfm>
- 王义平, 吴鸿, 徐华潮. 2008. 浙江重点生态地区蝶类生物多样性及其森林生态系统健康评价 [J]. *生态学报*, 28(11): 5259-5269
- 吴隆杰, 杨林. 2008. 海水养殖对生物多样性的影响研究进展 [J]. *海洋环境科学*, 27(4): 397-400
- 吴涛, 赵冬至, 蒋国俊, 等. 2012. 流域河口湿地生态健康与湿地发育关系研究 [J]. *生态环境学报*, 21(6): 1057-1062
- 解雪峰, 蒋国俊, 肖翠, 等. 2015. 基于模糊物元模型的西苕溪流域生态系统健康评价 [J]. *环境科学学报*, 35(4): 1250-1258
- 解雪峰, 吴涛, 肖翠, 等. 2014. 基于 PSR 模型的东阳江流域生态安全评价 [J]. *资源科学*, 36(8): 1702-1711
- 张锐, 郑华伟, 刘友兆. 2013. 基于 PSR 模型的耕地生态安全物元分析评价 [J]. *生态学报*, 33(16): 5090-5100
- 浙江省海洋渔业局. 2008. 浙江海洋环境公报 [R]. 杭州: 浙江省海洋渔业局. 1-14
- 浙江省人民政府. 2003. 浙江生态省建设规划纲要 [OL]. <http://www.jepb.gov.cn/News/38/8ada660e06b787f245667943dc948dafab997e25.html>
- Zheng T, You X Y. 2013. Assessment of marine ecosystem health of Tianjin offshore, China [J]. *International Journal of Oceanography and Hydrobiology*, 42(4): 442-450
- 中国海湾志编纂委员会. 1993. 中国海湾志·第六分册 [M]. 北京: 海洋出版社
- 左太安, 刁承泰, 施开放, 等. 2014. 基于物元分析的表层岩溶带“二元”水生态承载力评价 [J]. *环境科学学报*, 34(5): 1316-1323