

DOI: 10.5846/stxb201505241040

李志鹏, 杜震洪, 张丰, 曹敏杰, 刘仁义. 基于 GIS 的浙北近海海域生态系统健康评价. 生态学报, 2016, 36(24): - .

Li Z P, Du Z H, Zhang F, Cao M J, Liu R Y. A GIS-based health assessment of the offshore marine ecosystem in north Zhejiang Province. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(24): - .

基于 GIS 的浙北近海海域生态系统健康评价

李志鹏^{1,2}, 杜震洪^{1,2}, 张丰^{1,2,*}, 曹敏杰^{1,2}, 刘仁义^{1,2}

1 浙江大学 浙江省资源与环境信息系统重点实验室, 杭州 310028

2 浙江大学 地理信息科学研究所, 杭州 310027

摘要: 在浙江省北部地区经济高速发展, 科学高效利用海洋资源的同时, 也不可避免的对浙北近海海域的生态系统造成一定的威胁。为了降低涉海工程对海洋生态环境可能造成的不利影响, 通过分析浙江省北部海域高浊度、复杂水体等特点, 利用层次分析法从水环境、沉积环境和海洋生物多样性构建了浙北近海海域生态系统评价指标体系, 采用熵权法确定了相关因子的权重。在此基础上, 综合 GIS 空间分析方法、数学模型, 对 2009 年至 2012 年浙江省北部海域进行了实证研究。结果表明: (1) 浙江省北部近海海域生态系统整体上处于不健康状态。含量较高的无机氮和磷酸盐及较低海洋初级生产力是影响其环境质量的主要因素。(2) 浙北近海海域生态系统主要薄弱区域与人类活动格局基本一致, 由此推断, 人类活动是影响浙北海域生态系统健康状态的主要因素。总体上, 从 2009 至 2012 年浙北近海海域生态系统健康呈现逐年恶化的趋势。

关键词: 生态系统; GIS; 空间插值; 热点分析

A GIS-based health assessment of the offshore marine ecosystem in north Zhejiang Province

LI Zhipeng^{1,2}, DU Zhenhong^{1,2}, ZHANG Feng^{1,2,*}, CAO Minjie^{1,2}, LIU Renyi^{1,2}

1 Zhejiang Provincial Key Lab of GIS, Zhejiang University, Hangzhou 310028, China

2 Department of Geographic Information Science, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

Abstract: The coastal waters around the northern part of Zhejiang Province are confronted by serious environmental threats caused by the rapid development of the economy and highly efficient use of marine resources. In order to reduce and mitigate the possible negative effects of larger sea-related projects on the marine ecological environment, we built an evaluation index system to assess the offshore ecological environmental quality by analyzing the complexity and high turbidity of the water around the northern part of Zhejiang Province, as well as implementing an AHP (Analytic Hierarchy Process)-method based on three aspects: water environment, depositional environment, and marine biodiversity. We used the entropy weight method to determine the weight of the relevant factors, and used the comprehensive index weighting method to calculate the marine ecological environment comprehensive index (S). When $S \geq 75$, it implies that marine ecosystem is healthy; when $60 \leq S < 75$, it suggests that marine ecosystem is sub-healthy; And when $S < 60$, it indicates that the marine ecosystem is unhealthy. On the basis of this, we integrated GIS spatial analysis methods with a mathematical model to practically study, on a macro scale, the coastal water around the northern shores of Zhejiang Province from 2009 to 2012. The results were as follows: (1) the ecological environmental quality of the coastal water around the northern shores of Zhejiang Province are in an unhealthy state, especially in Hangzhou Bay, Xiangshan Harbor, Sanmen Bay, and Ningbo-Zhou Shan sea area. The

基金项目: 国家自然科学基金(41471313, 41101356, 41101371, 41171321); 国家科技基础性工作专项(2012FY112300); 海洋公益性行业科研专项经费资助(2015418003, 201305012); 浙江省攻关项目(2014C33G20, 2013C33051)

收稿日期: 2015-05-24; **网络出版日期:** 2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangfeng.zju@gmail.com

high inorganic nitrogen and phosphate contents and weak ocean primary productivity are the main factors affecting the quality of this environment. These factors cause high organic pollutant index values, high levels of eutrophication, and serious marine pollution in this area. (2) The hotspot analysis results showed that the pollutants are mainly concentrated in the Ningbo-Zhou Shan coastal waters, Hangzhou Bay, Sanmen Bay, and some other river estuaries. These regions have poor biological survival and low biodiversity due to economic development, construction of large sea-related projects, overfishing, and serious water pollution. In addition, the complexity and high turbidity of the water around the northern shores of Zhejiang Province cause weak ocean primary productivity, which affects the health of the entire ecosystem. (3) The analysis indicated that the unhealthy areas are mainly distributed in the vicinities of the coast, estuaries, and harbors, and the distribution of these areas with low ecological environment quality is similar to the human activities pattern, which suggests that human activities are the main factors affecting the health status of this marine ecosystem. In general, ecological environment quality in the coastal waters around northern Zhejiang Province progressively worsened between 2009 and 2012. This empirical study shows that the index system constructed for eco-environmental quality assessment and the method adopted reflects the actual state of a particular ecosystem and the internal relationships of the ecological system. Furthermore, our study results can provide a scientific basis for improving ecological environmental quality in the northern coastal waters of Zhejiang Province.

Key Words: eco-environmental quality; GIS; spatial interpolation; hotspot analysis

浙江省北部海域地处东海中部,位于长江口区域,海洋环境动力复杂。其陆域涵盖宁波、舟山、绍兴、杭州、嘉兴等浙江经济最发达地区,是全省经济发展的核心区。浙北海域航运发达,是我国最为繁忙的客运及货运区域。另外,浙北地区还拥有很多影响较大的涉海工程,包括:秦山核电站、舟山岛 25 万吨级油码头、100 万立方米原油储罐和 20 万立方米成品油的石油储运基地、舟山群岛大桥、杭州湾跨海大桥等。这些造成了浙江省北部海域具有高浊度水体、复杂多变的环境、频繁的人为活动等特点。在高效利用浙江省北部海洋资源的同时,也势必会对该区域的海洋生态环境造成一定的风险性破坏,为了降低和减少对海洋生态环境的不利影响,有必要针对浙北地区的海域特点进行科学的海洋生态系统健康评价。

海洋生态系统健康的研究是目前海洋生态与环境领域研究的热点之一,当前,国内外学者在海洋生态系统健康评价指标体系构建、评价方法和实际应用等方面取得了丰富的研究成果。在指标体系构建方面,周彬等构建了一套舟山群岛旅游生态健康评价指标体系^[1];李纯厚等提出了海湾生态系统健康综合指数法^[2];罗先香等构建了集约用海对海洋生态环境影响的评价指标体系^[3];Williams 等在空间尺度的基础上构建了 Chesapeake 湾生态系统健康评价体系^[4];Epstein P R 建立了芬迪湾健康评价体系^[5]。在评价方法方面,许雪青等利用可变模糊评价方法对渤海湾的海洋环境进行综合评价^[6]。在实际应用方面,吴钟解等根据《近岸海洋生态健康评价指南》对海南岛东海岸海草床生态系统健康进行评价^[7];杨建强等从生境质量和生态响应两方面对莱州湾的生态系统进行了评价^[8];Sherman K、Peter G、Eugeniusz A 分别对缅甸湾、芬地湾、南波罗的海进行了海洋生态系统健康评价^[9-11]。随着地理信息技术的成熟与发展,地理信息系统技术被广泛的应用在生态系统健康评价中^[12-15]。

虽然海洋生态系统健康评价已经取得了大量的研究成果,但是到目前为止仍然没有统一的评价模型,而针对特定研究区域的特色评价模型是非常必要的。本文借鉴国内外研究成果,综合指标体系法,GIS 空间分析方法、数学模型,以宏观的尺度,针对浙北海域高浊度水体、复杂多变的环境、频繁的人为活动等特点从水环境、沉积环境和海洋生物多样性方面选取相关指标,构建了浙江省北部近海海域生态系统评价指标体系,对浙江省北部近海海域生态系统健康进行评价,试图分析其海洋生态系统的健康状态水平,以期为治理和改善浙江省北部近海海域生态系统服务。

1 材料与方法

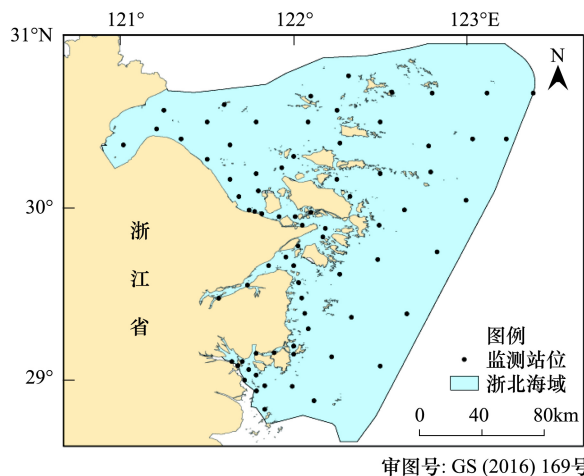
1.1 数据来源

本文所采用的数据为沿岸地市相关海洋监测站 2009—2012 年,每年春季和夏季航次在浙北海域进行的海上综合调查数据,调查项目包括水质数据、沉积环境和生物数据等。样品的采集和分析根据《海洋监测规范》(GB17378)和《海洋调查规范》(GB12763)中规定的方法进行。调查站位设置如图 1 所示。

1.2 空间插值方法

在研究浙江省北部近岸海域生态系统健康过程中,只能根据监测站位的调查数据,要通过这些调查数据来评估这个区域的整体环境状况,就要运用空间插值的方法来对未监测的研究区域的空间分布情况进行估计。由于空间插值是整个生态系统评价中最为关键的步骤,因此必须选择正确的插值方法和严格的空间插值优化,才能保证评价结果的真实客观。

由于各插值方法都有自己的优缺点,因此必须结合实际,确定研究区最佳的空间插值方法。为了选取符合浙江省北部近岸海域的数据特点和区域特性的空间插值方法,采用交叉验证的方法对不同的插值方法得到的效果进行验证。本文分别使用反距离加权法(Inverse Distance Weighted 简称 IDW)、克里格插值法(Ordinary Kriging 简称 OK)、全局多项式(Global Polynomial Interpolation 简称 GPI)和径向基函数(Radial Basis Function 简称 RBF)在选取最优参数条件下利用 2012 年的 71 个调查站位的磷酸盐数据插值得到的拟合值与相应 10 个验证点的实测值进行比较,并计算其平均误差和误差均方根。其结果如表 1 所示:



审图号: GS (2016) 169号

图 1 浙江省北部近海海域监测站位分布图

Fig.1 Distribution of stations in coastal waters on the northern part of Zhejiang Province

表 1 不同插值方法的交叉验证结果比较

Table 1 Resultant comparison of the Cross-validation from different interpolation methods

插值方法 Interpolation Method	误差类型 Type Of Error	
	误差均值 Mean	平方根误差 Root-Mean-Square
IDW	0.045000	0.01413
GPI	0.011800	0.01322
OK	0.001182	0.01270
RBF	0.001858	0.01273

IDW:反距离加权法 Inverse Distance Weighted; OK: 克里格插值法 Ordinary Kriging; GPI: 全局多项式 Global Polynomial Interpolation; RBF: 径向基函数 Radial Basis Function

从交叉验证的结果分析,克里格(OK)方法的结果优于 IDW、GPI 和 RBF,因此本文选取克里格(OK)插值方法作为本次评价中的主要方法。

1.3 热点分析

热点分析通过对数据集中的每一个要素来计算高值或低值要素在空间上发生的聚类位置,能够很直观的了解何处发生了聚类及其聚集的密度程度,它采用英国数学家 Getis 和 Ord 提出的 Getis-Ord Gi 指数来分析^[16]。

热点分析反映了空间数据在某一范围内的高值和低值的集聚效应,能够比较正确的揭示空间数据的独立性^[17]。本文利用热点分析来研究浙江省北部近海海域内相关因子的高值与低值是否出现集聚效应。利用热

点分析能够很直观的表现出相关影响因子的冷点与热点,从而分析影响浙江省北部近海海域生态系统的主要影响因子。

1.4 浙江省北部近海海域生态环境指标体系构建

1.4.1 评价指标体系

海洋生态系统评价指标是用来描述生态系统现状及发展趋势的参数,是生态系统健康评价的关键。因此,所选取的指标应该综合考虑整体性原则、可操作性原则和层次原则。

结合浙江北部近海海域历史污染情况分析,以浙北海域 2009 年到 2012 年 8 个航次数据为依据,从海洋水环境、沉积环境和海洋生物多样性 3 个方面进行评价指标的筛选。

(1)水环境:包括有机污染指数、富营养化水平及赤潮三个方面。有机污染能够反应水体有机污染物的程度^[18]。有机污染指数由化学需氧量、氨氮、溶解氧三个指标构成。受长江等陆源营养物质,及台湾暖流等影响,浙江省近岸海域形成了特有的富营养环境。自上世纪 80 年代以来浙江省近岸海域赤潮灾害频发,已成为全国赤潮发生最严重的地区之一^[19]。

(2)沉积环境:主要包括有机碳、硫化物及潜在生态危害指数三个指标。有机碳是海洋生态系统中物质和能量流动的重要内容^[20]。潜在生态危害指数是对各种污染水平进行综合分析,它是瑞典学者 Hakanson 提出的^[21],它综合考虑了重金属的毒性、区域敏感性及背景值是一种有效的评价重金属污染及生态危害的方法。

(3)海洋生物多样性:包括浮游植物密度、浮游动物生物量、底栖动物生物量、潮间带生物多样性指数及海洋初级生产力五方面。浮游植物是海洋生态系统的主要贡献者,在海洋生态系统中占有重要的作用。浮游动物是海洋生态系统中的次级生产力,其数量直接或间接的影响着海洋生态系统。舟山渔场作为我国的四大渔场之一,浮游动物的生物量和分布情况对浙江省渔业资源有着重要的影响,进而影响到生态系统。底栖生物是海洋食物链的重要环节之一,它们对海洋底栖生物系统的能力流动和物质循环起着重要的作用。海洋初级生产力水平会限制生态系统中的次级生产力和渔业资源的补充和维系。因为叶绿素 a 的含量和初级生产力的高低有着直接的关系^[22],因此在本研究中用叶绿素的平均值作为海洋初级生产力。

综合上述分析,针对浙江省北部近海海域具有高浊度、复杂水体的特点,利用层次分析法原理,构建了浙江省北部近岸海域生态系统评价指标体系,如表 2 所示。

表 2 浙江省北部海域生态系统评价指标体系

Table 2 Index system for eco-environmental quality assessment in coastal waters on the northern part of Zhejiang province

目标层 Target Layer	准则层 Criterion Layer	指标层 Index Layer
浙江省北部近海海域生态系统健康评价 Eco-environmental quality assessment in coastal waters on the northern part of Zhejiang Province	水质环境 ((B) ₁)	有机污染指数 ((C) ₁)
		富营养化水平 ((C) ₂)
		赤潮 ((C) ₃)
	沉积环境 ((B) ₂)	有机碳 ((C) ₄)
		硫化物 ((C) ₅)
		潜在生态危害指数 ((C) ₆)
	海洋生物多样性 ((B) ₃)	浮游植物密度 ((C) ₇)
		浮游动物生物量 ((C) ₈)
		底栖动物生物量 ((C) ₉)
		潮间带生物多样性指数 ((C) ₁₀)
		海洋初级生产力 ((C) ₁₁)

有机污染指数(C_1):能够反应水体有机污染物的程度:

$$Y = \frac{\text{COD}_i}{\text{COD}_b} + \frac{\text{NH}_{3i}}{\text{NH}_{3b}} - \frac{\text{DO}_i}{\text{DO}_b} \quad (1)$$

Y 表示有机污染指数, COD_i 、 NH_3_i 、 DO_i 分别为化学需氧量、氨氮、溶解氧的实际测量值。 COD_b 、 NH_{3b} 、 DO_b 分别为水体上述各项指标的一类海水水质标准值。

富营养化水平(C_2):富营养化状态依据富营养化指数(E)计算结果确定。该指数计算公式为^[10]:

$$E = \frac{COD \times IN \times IP}{4500} \times 10^6 \quad (2)$$

E 表示富营养化水平, COD 表示化学需氧量, IN 为无机氮, IP 表示活性磷酸盐。

潜在生态危害指数(C_6):其计算公式如下^[21]:

$$W_f^i = \frac{W^i}{W_f} E_r^i = T_r^i \times W_f^i \quad (3)$$

其中, W_f^i 表示重金属 i 的污染系数, W^i 表示重金属 i 的实测浓度, W_f 表示重金属 i 的背景值, E_r^i 表示重金属 i 的潜在生态危害指数, T_r^i 表示重金属 i 的毒性响应系数。重金属的背景参照值和毒性系数^[21]见表 3。

表 3 重金属的背景参照值和毒性系数

Table 3 The background of heavy metals and toxicity coefficient

元素 Element	汞 Hg	锌 Zn	铜 Cu	铬 Cr	铅 Pb	砷 As	镉 Cd
T_r^i	40	1	5	2	5	10	30
$W_f^i/(10^{-6})$	0.2	150	35	80	150	20	0.5

潮间带生物多样性指数:它反映了生态系统的稳定性及复杂性,本文采用 *Shannon-Weaver* 多样性指数^[23]:

$$H = - \sum_{i=1}^S N_i \log_2 N_i \quad (4)$$

其中 N_i 为群落中第 i 种个体的比例, S 为物种种类数。

1.4.2 权重确定

(1) 数据标准化处理

在进行生态系统评价过程中,首先要对各评价因子进行评分,构成浙江省北部近岸海域生态系统评价的基本指标都具有自己的量纲和数量级。且各指标彼此量纲不同,因此无法直接进行比较和计算。为了保证能得到正确的分析结果,在利用指标体系进行定量计算之前,首先应该对原始数据进行初始化处理^[24]。具体的计算方法如下:

(1) 正向因子量化

$$y_i = \begin{cases} 0 & Y_i < Y_{\min} \\ \frac{Y_i - Y_{\min}}{Y_{\max} - Y_{\min}} & Y_{\min} \leq Y_i \leq Y_{\max} \\ 1 & Y_i > Y_{\max} \end{cases} \quad (5)$$

(2) 负向因子量化

$$y_i = \begin{cases} 0 & Y_i > Y_{\max} \\ \frac{Y_{\max} - Y_i}{Y_{\max} - Y_{\min}} & Y_{\min} \leq Y_i \leq Y_{\max} \\ 1 & Y_i < Y_{\min} \end{cases} \quad (6)$$

y_i 为 i 种因子的量化指数; Y_i 为 i 因子的量测值; $Y_{\min}$ 为 i 因子要求的下限; $Y_{\max}$ 为 i 因子要求的上限。

根据上述量化方法对各指标进行标准处理,得到量化指标系数,量化指标系数再乘以 100 为指标的标准值,研究因子级别分值按 100 分制标准赋分,最高级别分值为 100 分,其余各级别则按其实际指标值对浙江

省北部近岸海域生态环境影响的衰减程度赋予不同的分值。为了保证评价的正确性,本文对评价标准的确定采取以下二个原则:(1)有国家、行业或地方标准的,从生态健康的角度选择最高标准。(2)没有国家、行业或地方标准的,则查阅相关文献或者相关历史数据中选择最优值为评价标准。基于上述原则和量化的方式确定了各指标的标准和分值(如表4)。

表4 浙江省北部近海海域生态系统评价因子标准

Table 4 Factor standards for eco-environmental quality assessment in coastal waters on the northern part of Zhejiang province

评价因子 Indicator	因子分值 Indicator Score					参考标准 Reference Standard
有机污染指数 Organic Pollutant Index	≤ 0	$>0-\leq 2$	$>2-\leq 3$	$>3-\leq 4$	>4	文献[4] 合本研究
富营养化水平 Eutrophic Level Index	≤ 1	$>1-\leq 3$	$>3-\leq 5$	$>3-\leq 9$	>9	[25-27]
赤潮(次数/性质) Red Tide (Number / Nature)	0—2(无害)	2—4(无害)	4—6(无害)	6—8(无害)	>8 (有害)	[19,28]
有机碳 Organic Carbon	$\leq 2\%$	$>2\%-\leq 3\%$	$>3\%-\leq 4\%$	$>4\%-\leq 5\%$	$>5\%$	文献[29] 结合本研究
硫化物/($\mu\text{g/L}$) Sulfide	≤ 200	$>200-\leq 300$	$>300-\leq 500$	$>500-\leq 600$	>600	文献[29] 结合本研究
潜在生态风险指数 Potential Ecological Risk Index	≤ 30	$>30-\leq 60$	$>60-\leq 120$	$>120-\leq 240$	>240	[19]
浮游植物密度/($\times 10^5$ 个/ m^3) Density Of Phytoplankton	$>10-\leq 30$	$>7-\leq 10$ 或 $>30-\leq 5$	$>4-\leq 7$ 或 $>35-\leq 38$	$>3-\leq 4$ 或 $>38-\leq 40$	≤ 3 或 >40	文献[30] 结合本研究
浮游动物生物量/(mg/m^3) Zooplankton Biomass	$>150-\leq 250$	$>140-\leq 150$ 或 $>250-\leq 270$	$>120-\leq 140$ 或 $>270-\leq 290$	$>100-\leq 120$ 或 $>290-\leq 300$	≤ 100 或 >300	文献[30] 结合本研究
底栖动物生物量/(g/m^2) Benthic Biomass	$>7.5-\leq 12.5$	$>6.5-\leq 7.5$ 或 $>12.5-\leq 13.5$	$>5.5-\leq 6.5$ 或 $>13.5-\leq 14.5$	$>5-\leq 5.5$ 或 $>14.5-\leq 15$	≤ 5 或 >15	文献[30] 结合本研究
潮间带生物多样性指数 Intertidal Biodiversity Index	>3	$>2-\leq 3$	$>1.5-\leq 2$	$>1-\leq 1.5$	≤ 1	文献[31] 结合本研究
海洋初级生产力 Marine Primary Productivity	>10	$>6-\leq 10$	$>4-\leq 6$	$>2-\leq 4$	≤ 2	文献[28] 结合本研究
分值 Score	100	80	60	40	20	

(2) 确定权重

当前,权重确立的方法有很多,考虑浙江省高浊度、复杂水体及人为活动频繁的特点,本文拟采用客观赋权法—熵值法。其基本步骤参考文献[32]。

根据熵值法,利用 MATLAB 计算得到各因子的权重,结果如表5所示。

表5 浙江省北部近海海域生态系统评价因子权重

Table 5 Weighting factory of eco-environmental quality assessment in coastal waters on the northern part of Zhejiang province

因子 Indicator	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}	C_{11}
权重 Weight	0.154	0.32	0.026	0.028	0.032	0.04	0.109	0.101	0.098	0.072	0.02

1.4.3 评价模型

根据上述确定的评价指标体系结合各因子的标准化评分结果及对应的权重值,本文拟采用综合指数加权法计算海洋生态环境的综合指数,构建浙江省北部近海海域生态系统评价模型:

$$S = \sum_{i=1}^n (S_i \times W_i) \quad (7)$$

式中, S 为浙江省北部海域生态系统总得分,即为综合质量指数; W_i 为各因子的权重系数; S_i 表示各因子的标准化评分; n 为因子个数。

利用等计算聚类模型对综合质量指数进行聚类分析,结合《近岸海洋生态健康评价指南》(HY/T 087—2005)并根据实际情况确定浙江省北部近海海域生态系统健康状态划分标准,依次为“健康区”(>75)、“亚健康区”(>60—≤75)和“不健康区”(≤60)3 个级别。

3 结果分析

2.1 空间插值结果与分析

本文使用克里格插值方法,对浙江省北部近海海域生态系统评价的各项因子进行插值参数优化后,结果如图 2 所示。从图中可以看到各指标的空间分布情况:

(1)有机污染指数:总体上来说,浙北近海海域有机污染指数偏高,高值主要出现在宁波与舟山近海海域及三门湾、象山港等区域。

(2)富营养化水平:海水中的无机氮和活性磷酸盐的严重超标导致了浙江省北部海域呈富营养化状态的面积占总面积的 90% 以上。重度富营养化海域主要集中在杭州湾、象山港和三门湾。

(3)有机碳:浙北海域有机碳的含量介于 0.28%—0.65% 之间,全部符合第一类海洋沉积物质量标准。其分布趋势为以舟山岛、象山港和三门湾为高值中心向周边海域递减。

(4)硫化物:浙北海域硫化物全部符合第一类海洋沉积物质量标准,高值主要分布在海域东部和南部区域。

(5)潜在生态风险指数:大部分海域中重金属的含量是符合 2 类海水水质标准的,总体上来说浙北海域潜在生态风险指数较低,指数最高的主要集中在舟山及宁波海域附近。

(6)浮游植物密度:低值出现在杭州湾附近海域,高值集中在宁波南部海域,总体上呈现由北向南,从西向东递增的趋势。

(7)浮游动物生物量:浮游动物生物量的分布总体上与浮游植物密度的情况一致。

(8)底栖动物生物量:底栖动物分布呈现由杭州湾向外海域及向南海域递增的趋势。

(9)潮间带生物多样性指数:生物多样性低值集中在杭州湾及宁波南部外海海域,高值集中在舟山及三门湾海域,总体趋势为与舟山渔场为中心向周边递减。

(10)海洋初级生产力:本文以叶绿素代表海洋初级生产力,其分布呈现由南向北递减的趋势。高值出现在宁波南部海区,低值出现在杭州湾和舟山岛附近。

2.2 热点分析

通过热点分析可以很直观的了解主要污染物的空间分布情况,本研究选取了 8 个主要的水质监测参数进行热点分析, $Z(G_i^*)$ 的值大于 2 表示显著的高值聚集,1.0—2.0 表示较显著的聚集;−2.0—−1.0 表示空间聚集不显著,小于−2.0 表示较显著的低值聚集,其结果如图 3 所示:图中红色点代表热点、蓝色的点代表冷点。图中右下角是采样聚类方法生成的 Voronoi 图,图中深色表示值较高的,浅色则属于低值。具体分析结果如下:

(1)化学需氧量:其高值点(热点区域)主要分布在杭州湾、和三门湾远海海域,低值点(冷点区域)集中于三门湾内及象山港海域。

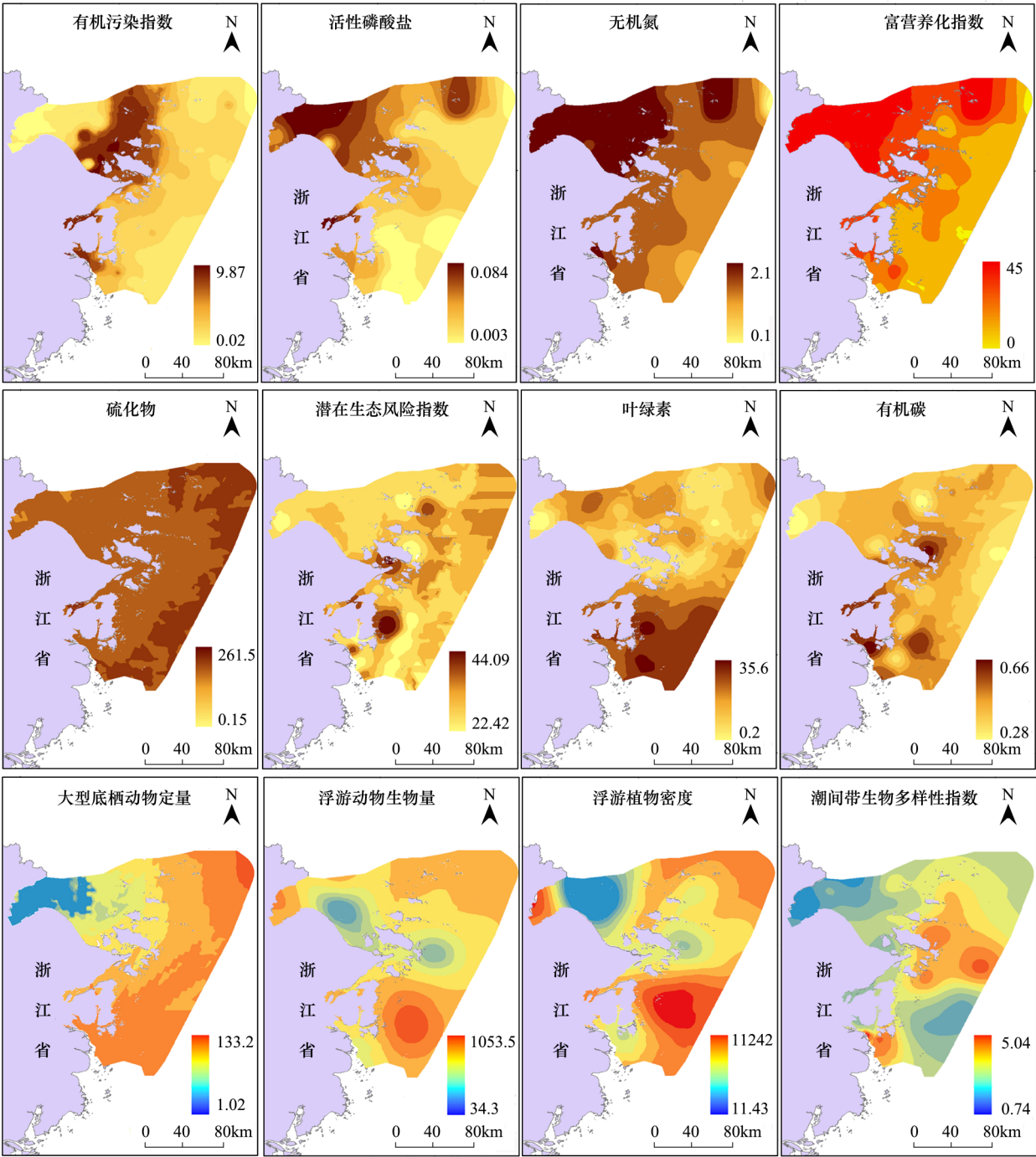
(2)活性磷酸盐:高值点分布于杭州湾、象山港及宁波附近海域,低值点聚集区分布在宁波南部海区及舟山群岛西部区域。

(3)溶解氧:其高值点主要分布于杭州湾、三门湾附近海域,低值点聚集区在宁波中部、舟山西部及象山港区域。

(4)酸碱度:其高值分布类似于溶解氧分布。

(5)无机氮:其高值点主要分布于杭州湾、舟山群岛,低值点聚集区于宁波外部海域。

(6)叶绿素:高值点聚集区于宁波南部海域,低值点分布于舟山群岛海域。



审图号: GS (2016) 169号

图 2 各指标空间插值结果

Fig.2 Interpolation result of eco-environmental quality assessment indicators

- (7)有机碳:高值点分布于杭州湾、三门湾海域,低值点分布较广集中在宁波中东部、舟山群岛海域。
- (8)重金属:高值点分布于舟山、杭州湾海域,低值点分布在宁波东南部海域。

2.4 浙江省北部近海生态系统健康综合指数

基于上述评价方法,得到了浙江省北部近海海域 2009 年至 2012 生态系统评价结果如图 4 所示。根据该区生态系统综合得分,结合区域的实际情况,将浙江省北部近海海域生态系统分为 3 个等级,各等级统计结果如表 6 所示。

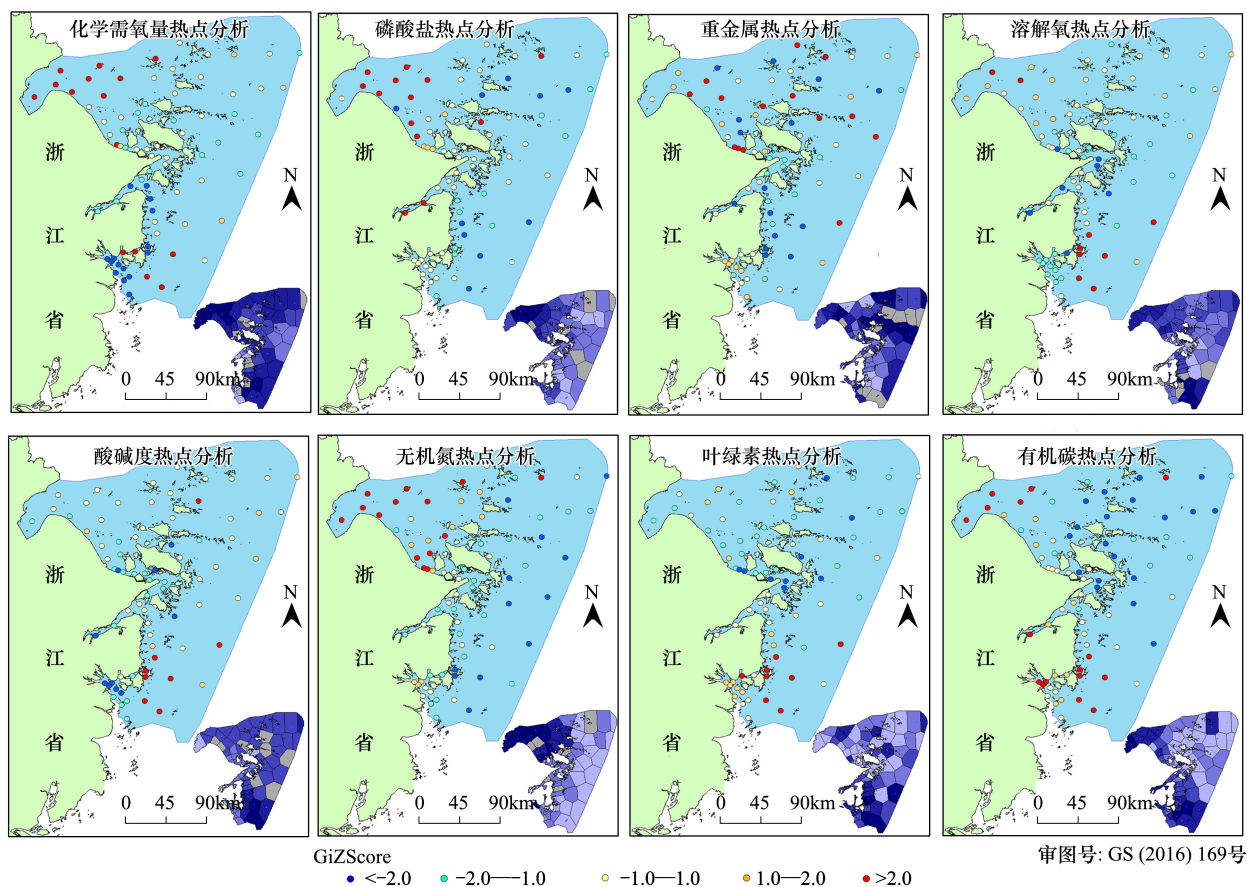


图 3 主要监测要素热点分析结果

Fig.3 Hotspot analysis result of main eco-environmental quality assessment indicators

表 6 浙江省北部近海海域生态系统评价统计结果

Table 6 Statistical results of eco-environmental quality assessment in coastal waters on the northern part of Zhejiang province

等级 Class	指数 Index	比例 Ratio			
		2009	2010	2011	2012
健康区 Healthy Region	>75	16.6%	14.22%	15.22%	1.93%
亚健康区 Sub Healthy Region	>60—≤75	33.32%	30.71%	32.92%	34.81%
不健康区 Unhealthy Region	≤60	50.08%	55.07%	51.86%	63.26%

(1) 健康区

从结果分析来看,浙北近海海域健康区的比重较低且基本上呈现逐年降低的趋势,从 2009 年占全部海域的 16.6%到 2012 年则仅占 1.93%,且主要分布在较为远处的海域。这些区域人为活动较少,基本无污染,且从热点分析的结果来看该区域叶绿素含量较高因而海洋初级生产力较高,且该区域化学需氧量、无机氮和溶解氧的含量较低,处于冷点区域。

(2) 亚健康区

从四年的结果来看,亚健康区的海域占总面积的 30%以上,主要集中在宁波南部海域及杭州湾外部海域,该区域自然条件优于杭州湾区域,人为活动的影响也较少,且热点分析的结果来看,化学需氧量、磷酸盐、无机氮及重金属的空间聚集不显著。

(3) 不健康区

从 2009 年至 2012 年,不健康区的面积均占总海区的 50%以上,主要分布在杭州湾、象山港、三门湾及宁

波—舟山附近海域。从热点分析的结果来看主要是因为这些地方化学需氧量、磷酸盐、无机氮的含量较高,而叶绿素的含量较低。此外这些区域经济发达,涉海工程较多,且处于舟山渔场附近,过度的捕捞以及海水污染较为严重导致海洋初级生产力较为低下、生物生存环境较为恶劣,生物多样性较低,进而影响了该区域整个生态系统的健康情况。

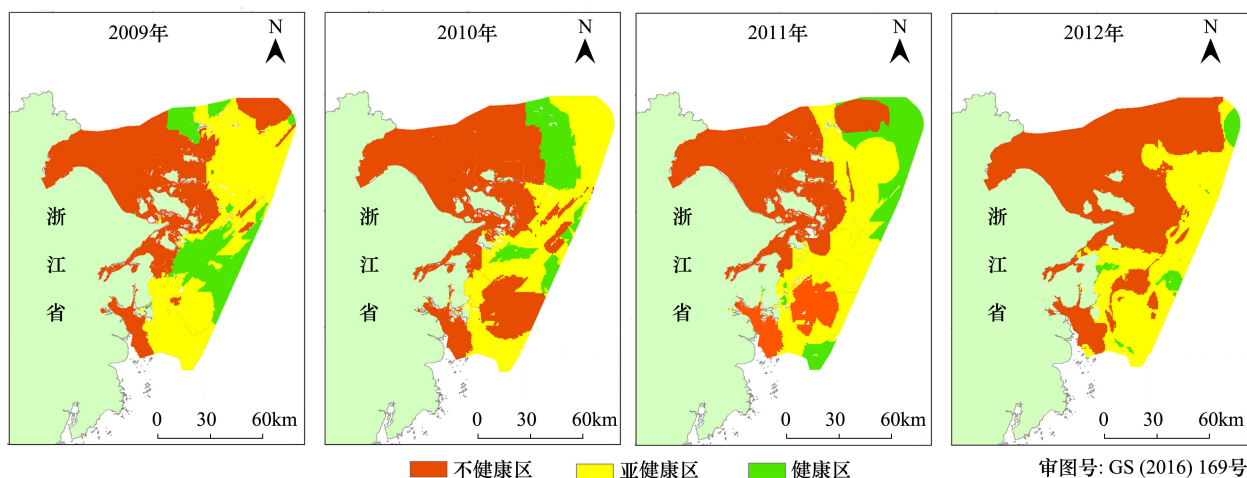


图4 浙江省北部近海海域生态系统评价结果空间分布图

Fig.4 Distribution results of eco-environmental quality assessment in coastal waters on the northern part of Zhejiang province

5 结论

本文针对浙江省近海海域高浊度、复杂水体、人为活动频繁等特点,利用层次分析法从水环境、沉积环境和海洋生物多样性三个方面共 11 项指标出发构建了浙江省北部近海海域生态系统评价指标体系,并利用 GIS 的方法对其进行了生态系统评价。结果表明所构建的评价指标体系及所利用的方法,可以很好的反映该特定生态系统的实际状态,及生态系统内部之间联系。同时本文的研究结果也能够为改善浙江省北部近海海域生态环境提供科学的依据。

实证研究表明:(1)浙江省北部海域生态系统整体上处于不健康状态,尤其是杭州湾、象山港、三门湾及宁波—舟山海域。主要的问题是海水中无机氮和磷酸盐的含量严重超标且污染物呈现出高集聚状态,这些因素导致了浙江省北部近海海域海水有机污染指数较高、呈现高度富营养化状态及严重的海水污染。(2)从热点分析的结果来看,污染物主要集中在杭州湾、三门湾等河口地区及宁波—舟山近海海域,这些区域由于经济发达,大型涉海工程的建设、过度的捕捞以及海水污染较为严重导致生物生存环境较为恶劣,生物多样性较低,加上浙江北部近海海域高浊度、复杂水体的环境造成了海洋初级生产力较为低下,进而影响了整个生态系统的健康情况。(3)从分析的结果来看不健康区域主要分布在沿海、河口及港湾附近,这与人类活动频繁的区域分布较为一致,由此可推断,人类活动是影响浙北海域生态系统健康状态的主要因素。

在浙北近海海域的生态系统健康评价中本研究设计的适合于 GIS 的指标体系,覆盖较为全面,可以较好的反映该特定生态系统的实际状态,及生态系统内部之间联系。GIS 手段体现了众多的优势,同时也暴露出了存在的不足。由于本文主要探讨的是浙江省北部近海海域生态环境质量评价,以 GIS 为手段进行数据处理,因而选取的指标受到一些限制,主要以自然环境指标为主,但是影响生态环境质量的因素众多,在今后的研究中还需要从不同时期的人类空间活动强度,指标年际变化等多方面进行研究和探讨以期获得更好的结果,同时利用 GIS 作为技术手段对海洋生态系统健康评价是未来的发展趋势之一,因此在未来的研究中需要重点关注如何设计合理、全面的适用于 GIS 的评价指标体系。

参考文献 (References):

- [1] 周彬, 钟林生, 陈田, 赵宽. 舟山群岛旅游生态健康动态评价. 地理研究, 2015, 34(2): 306-318.
- [2] 李纯厚, 林琳, 徐楠楠, 戴明, 黄洪辉, 杜飞雁, 刘永, 齐占会. 海湾生态系统健康评价方法构建及在大亚湾的应用. 生态学报, 2013, 33(6): 1798-1810.
- [3] 罗先香, 朱永贵, 张龙军, 杨建强. 集约用海对海洋生态环境影响的评价方法. 生态学报, 2014, 34(1): 182-189.
- [4] Williams M, Longstaff B, Buchanan C, Llansó R, Dennison W. Development and evaluation of a spatially-explicit index of Chesapeake Bay health. Marine Pollution Bulletin, 2009, 59(1/3): 14-25.
- [5] Epstein P R, Rapport D J. Changing coastal marine environments and human health. Ecosystem Health, 2006, 2(3): 166-176.
- [6] 许雪青, 刘忠波, 张晋, 吴暖. 基于可变模糊评价法的渤海海洋生态环境综合评价. 海洋湖沼通报, 2014, (3): 51-57.
- [7] 吴钟解, 陈石泉, 王道儒, 蔡泽富, 张光星, 涂志刚, 李元超. 海南岛东海岸海草床生态系统健康评价. 海洋科学, 2014, 38(8): 67-74.
- [8] 杨建强, 朱永贵, 宋文鹏, 张娟, 张龙军, 罗先香. 基于生境质量和生态响应的莱州湾生态环境质量评价. 生态学报, 2014, 34(1): 105-114.
- [9] Sherman K, Duda A M. An ecosystem approach to global assessment and management of coastal waters. Marine Ecology Progress Series, 1999, 190: 271-287.
- [10] Wells P G. Assessing health of the Bay of Fundy—concepts and framework. Marine Pollution Bulletin, 2003, 46(9): 1059-1077.
- [11] Andruliewicz E, Kruk-Dowgiallo L, Osowiecki A. An expert judgement approach to designating ecosystem typology and assessing the health of the Gulf of Gdansk. Coastline Reports, 2004, 2: 53-61.
- [12] 徐晓甫. 基于 GIS 的渤海湾生态系统研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- [13] Wang X J. The application research on discrete hopfield neural network in water quality evaluation. Applied Mechanics and Materials, 2013, 278-280: 1338-1341.
- [14] Hou J W, Mi W B, Li L T. Spatial quality evaluation for drinking water based on GIS and ant colony clustering algorithm. Journal of Central South University, 2014, 21(3): 1051-1057.
- [15] 赵玲, 赵冬至, 张丰收. 基于 GIS 的海域环境质量评价模型研究. 遥感技术与应用, 1998, 13(3): 62-65.
- [16] Hewings G J D, Nazara S, Dridi C. Channels of synthesis forty years on: integrated analysis of spatial economic systems. Journal of Geographical Systems, 2004, 6(1): 7-25.
- [17] 陈述彭, 鲁学军, 周成虎. 地理信息系统导论. 北京: 科学出版社, 1999.
- [18] Wong H, Hu B Q. Application of improved extension evaluation method to water quality evaluation. Journal of Hydrology, 2014, 509: 539-548.
- [19] 张海生. 浙江省海洋环境资源基本现状. 北京: 海洋出版社, 2013.
- [20] 蔡玉婷. 福建主要港湾悬浮有机碳和悬浮有机氮的动态变化. 农业环境科学学报, 2010, 29(增刊): 167-173.
- [21] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [22] Buck S, Denton G, Dodds W K, Fisher J, Flemer D, Hart D, Parker a, Porter S, Rector S, Steinman, Stoner J, Tillman D, Wang S, Watson V, Welch E. Nutrient Criteria Technical Guidance Manual: Rivers and Streams. Washington, DC: USEPA, 2000.
- [23] Xu F L, Tao S, Dawson R W, Li P G, Cao J. Lake ecosystem health assessment: indicators and methods. Water Research, 2001, 35(13): 3157-3167.
- [24] 阎波杰, 潘瑜春, 赵春江, 郭欣, 殷红梅. 县域畜禽养殖场空间布局规划适宜性评价. 地理研究, 2010, 29(7): 1214-1222.
- [25] 浙江省海洋与渔业局. 2013 年浙江省海洋环境质量公报(征求意见稿). 杭州, 2014.
- [26] 孔繁翔. 环境生物学. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [27] 蔡立哲, 马丽, 高阳, 郑天凌, 林鹏. 海洋底栖动物多样性指数污染程度评价标准的分析. 厦门大学学报: 自然科学版, 2002, 41(5): 641-646.
- [28] 陈小燕. 河口、海湾生态系统健康评价方法及其应用研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- [29] 国家海洋局. HY/T 087-2005 近岸海洋生态健康评价指南. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [30] 国家质量监督检验检疫总局. GB 18668-2002 海洋沉积物质量标准. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [31] 蒲新明, 傅明珠, 王宗灵, 张新军. 海水养殖生态系统健康综合评价: 方法与模式. 生态学报, 2012, 32(19): 6210-6222.
- [32] Wang Y K, Sheng D, Wang D, Ma H Q, Wu J C, Xu F. Variable fuzzy set theory to assess water quality of the Meiliang Bay in Taihu Lake basin. Water Resources Management, 2014, 28(3): 867-880.