DOI: 10.5846/stxb201710111814

沙宏杰,张东,施顺杰,刘兴兴.基于耦合模型和遥感技术的江苏中部海岸带生态系统健康评价研究.生态学报,2018,38(19): - . Sha H J, Zhang D, Shi S J, Liu X X.Ecosystem health assessment of coastal zone in central Jiangsu Province based on coupling model and remote sensing technology.Acta Ecologica Sinica,2018,38(19): - .

基于耦合模型和遥感技术的江苏中部海岸带生态系统 健康评价研究

沙宏杰1,张 东1,2,*,施顺杰1,刘兴兴1

1 南京师范大学地理科学学院,南京 2100232 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心,南京 210023

摘要:以生态系统健康理论为基础,从资源环境、景观生态、人类活动3个方面,按活力、组织力和恢复力3个子系统选取了10 个代表性指标,构建了遥感技术支持下的海岸带陆域生态系统健康评价指标体系,并耦合TOPSIS模型和VOR生态系统健康度 量模型对江苏中部海岸新洋港至川东港岸段进行了应用评价。研究结果表明:江苏中部海岸生态系统健康状态处于健康和良 好的区域占27.62%,一般占60.94%,较差和差占11.44%,整体生态健康状况中等偏好。从地物类型和空间分布来看,斗龙港至 四卯酉河岸段以滩涂植被、农田和围海养殖区为主,植被和水体对气候调节有积极作用,整体生态健康状况良好;四卯酉河至王 港岸段由于大丰港建设,港区陆域植被覆盖率低、热岛效应强,建筑将原本连通的自然景观隔断,导致斑块数量增多,斑块面积 减小,加剧了景观破碎化,对原有海岸带生态系统产生一定的破坏,生态健康状况相对较差;此外,新洋港至斗龙港岸段以及川 东港岸段以自然保护区湿地为主,植被覆盖度高,人为干扰程度小,生态健康状况也较好。由于该耦合模型评价方法直接基于 遥感监测数据,且无需赋予指标权重,因此研究结果相对更加客观,更能反映海岸带生态系统的实际健康状况。 关键词:海岸带;生态系统;健康评价;TOPSIS-VOR模型;遥感

Ecosystem health assessment of coastal zone in central Jiangsu Province based on coupling model and remote sensing technology

SHA Hongjie¹, ZHANG Dong^{1,2,*}, SHI Shunjie¹, LIU Xingxing¹

1 Department of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China

2 Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China

Abstract: Based on the theory of ecosystem health, ten representative indicators are selected from three subsystems of resources, environment, landscape ecology, and human activities according to vitality, organizational power, and resilience, to construct an ecosystem health evaluation index system of coastal zones using remote sensing technology. Here, we introduce a coupling model of TOPSIS and VOR ecosystem health metrics to assess the ecological health from Xin Yang Port to Chuan Dong Port along the central coast of Jiangsu Province. The results showed that regions with good health accounted for 27.62% of the area, and the moderate health status accounted for 60.94%, and 11.44% were poor; hence the overall ecological health status was moderately favorable. From the perspective of the type and spatial distribution of land cover, DouLong Port to Si Maoyou River is dominated by beach vegetation, farmland, and coastal aquaculture areas. Vegetation and water have a stabilizing effect on climate regulation and the overall ecological health is good. Due to the construction of DaFeng Port, the vegetation coverage in this area is low and the heat island effect is strong. The buildings

基金项目:国家自然科学基金项目(41771447);江苏高校优势学科建设工程资助项目(164320H116)

收稿日期:2017-10-11; 网络出版日期:2018-00-00

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhangdong@ njnu.edu.cn

38 卷

disrupt the originally connected natural landscape, resulting in the increase of the number of patches and the reduction of the patch area, which aggravates the landscape fragmentation and damage to the ecological system of the original coastal zone, and ecological health is relatively poor. Conversely, the area from Xin Yang port to DuLong Port and ChuanDong Port is dominated by natural reserves with high vegetation coverage, little human interference, and good ecological health. As the coupling model assessment method is based on remote sensing data and does not need to be weighted, the results are more objective and better reflect the actual health status of the coastal ecosystems.

Key Words: coastal zone; ecosystem; health assessment; TOPSIS-VOR model; remote sensing

海岸带是海洋系统与陆地系统相连接的过渡地带。该区域资源类型丰富、环境条件优越,是海岸动力与 沿岸陆地相互作用、具有海陆过渡特点的独立环境体系,与人类的生存与发展关系密切^[1]。近年来,海岸带 地区的生态健康问题一直是国内外学者研究和关注的热点,随着遥感技术的广泛应用,为海岸带生态系统健 康的监测和评价提供了更有效的数据保障。目前国内外研究的主流方法是利用 PSR 模型构建评价指标体 系^[2-3],再通过层次分析法确定各指标权重^[4-5],最后得出生态系统健康综合评价值。该方法在墨西哥海岸带 地区^[6]、澳大利亚地区^[7]以及国内的青岛市海岸带^[8]、江苏海岸带^[9]等地区都得到了较好的应用。

然而利用 PSR 模型或层次分析法模型对海岸带生态系统健康进行评价仍处于尝试阶段,有待进一步完善。该方法在实际应用过程中遇到的最主要问题是指标权重的确定,指标权重反映了指标在整个评价体系中的影响程度大小,主要确定方法是专家根据实际经验进行打分,受主观因素影响较大。为了寻求一种更加科学合理、客观、方便易行的技术方法来评价海岸带地区的生态系统健康,本文尝试以生态系统健康指数作为评价的基础,借助遥感手段,构建可以直接从遥感影像中获取的指标体系,再耦合 TOPSIS 分析法和 VOR 生态系统健康度量模型,客观评价海岸带陆域的生态健康状况,以期为海岸带的生态环境保护和修复提供技术支撑和参考依据。

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区概况

选择江苏中部沿海的新洋港至川东港岸段为研究区, 参考我国 1985 年开展的全国海岸带和滩涂资源综合调查 对海岸带的规定,确定海岸线向陆延伸 10 km 作为生态系 统健康评价的海岸带陆域范围^[10],具体空间位置见图 1。 研究区地处江苏省东部的黄海之滨,位于 32°56′—33°36′ N,120°25′—120°56′E 之间,沿海北部为盐城国家级珍禽 自然保护区,南部为麋鹿国家级自然保护区,保护区内自 然生态环境良好。中部滩涂开发出大片的高涂围海养殖 区,并且拥有江苏省重点建设的沿海三大深水海港之 ——大丰港,区内年平均气温 15.0℃。

1.2 数据采集与预处理

收集了 2016 年 3 月 21 日覆盖整个研究区的 Landsat-8 OLI_TIRS 卫星遥感影像和 GDEMV2 的 30 m 分辨率数字 高程数据,用于研究区的海岸带地物类型遥感提取及生态 健康评价指标计算,以上数据均从地理空间数据云 (http://www.gscloud.cn/)下载获得。对遥感影像数据进



Fig.1 Location of the study area

行了波段合成、几何校正、图像增强等预处理^[11],几何校正误差小于 0.2 个像元。

2 研究方法

2.1 评价指标体系构建

本文主要研究基于遥感影像的生态健康评价方法,其中生态系统健康主要反映在活力、组织力和恢复力 3 个方面。活力指生态系统的能量输入和营养循环容量,是衡量系统新陈代谢和初级生产力的主要指标,取 决于绿色植物的生物量和光合作用。光合作用对气温产生一定影响,而气温变化又会反作用于植被生长,因 此选取归一化差值植被指数 NDVI 和地表温度值^[12-13]表征系统活力。组织力用于描述生态系统的复杂性,主 要体现在自然景观的多样性和人类活动影响这两方面上。一般来说系统越复杂,生态就越健康。因此选用归 一化差值建筑指数 NDBI^[14]、景观多样性、景观破碎度、平均斑块面积、人类干扰指数和围海养殖区密度来表 征。恢复力指系统受外来干扰的抵抗力和恢复速率,是系统弹性的相对程度,主要受景观要素和地形因素的 影响较大,所以选则坡度和生态弹性度表征系统恢复力。因此可见,这 3 个子系统、10 类指标共同构成的生 态系统健康评价指标体系,可以从资源环境、景观生态、人类活动 3 个角度实现海岸带陆域的生态系统健康 评价。

由于各指标对生态系统健康的影响较为复杂,某些 指标因子的增量会使生态系统变得更加稳定和健康,这 类指标归结为积极指标;某些指标因子的增量会使生态 系统变得脆弱和不稳定,则这类指标定为消极指标。以 此分类,海岸带陆域生态系统健康评价指标体系及指标 -类型见表1所示。

- 2.2 评价指标计算方法
 - 1)海岸带地物遥感分类

由于所选取的景观多样性、景观破碎度、平均斑块 面积和生态弹性度指标要在遥感影像分类的基础上进 行计算,因此先对所获取的遥感影像进行地物类型遥感 解译。依据《全国湿地资源调查和监测技术规程》和野 外实地考察情况,将研究区地物类型分为河流、光滩、建 设用地、林地、农田、围海养殖区、滩涂植被7种类 型^[15]。采用面向对象的分类方法,根据多尺度分割试 验,将图像分割参数设为50,合并参数设为90,对遥感

表 1 海岸带陆域生态系统健康评价指标体系 Table 1 Evaluation index system of ecosystem health in coastal

	•	•	
评价模型 Evaluation model	评价子系统 Evaluation subsystem	评价指标 Evaluation index	指标类型 Index types
生态系统健康评价	活力	NDVI(1)	积极
Ecosystem health		地表温度值	消极
assessment	组织力	NDBI(2)	消极
		景观多样性	积极
		景观破碎度	消极
		平均斑块面积	积极
		人类干扰指数	消极
		围海养殖区密度	消极
	恢复力	坡度	消极
		生态弹性度	积极

NDVI:归一化植被指数,Normalized difference vegetation index; NDBI:归一化建筑指数,Normalized difference barren index

影像进行了图像分割;在此基础上采用 SVM 支持向量机监督分类,得到各类型地物的空间分布。分类后利用 人工目视解译纠正局部的错分区域,得到最终的分类结果见图 2。可以看到,研究区内的地物类型以围海养 殖区、滩涂植被和农田为主,基本呈分带、连片分布。

2) 地表温度计算

目前常用的地表温度遥感反演算法主要有辐射传输方程法、单窗算法、劈窗算法和多通道多角度算法 等^[12]。本文采用辐射传输方程法对地表温度进行反演,具体计算分为以下四步:

①植被覆盖度计算

植被覆盖度 F_{x} 的计算公式如下:

$$F_v = \frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_s}{\text{NDVI}_v - \text{NDVI}_s} \tag{1}$$

式中,NDVI为归一化差值植被指数,NDVI。和 NDVI。分别为植被完全覆盖和裸地的 NDVI。根据覃志豪等

人^[16]的研究,取 NDVI_{*v*} = 0.70 和 NDVI_{*s*} = 0.05,且有, 当某个像元的 NDVI 大于 0.70 时, F_v 取值为 1;当 NDVI 小于 0.05, F_v 取值为 0。

②地表比辐射率计算

在进行地表比辐射率计算时,可大致将遥感影像分为水体、自然地物和人工地物 3 种类型^[17]。采取以下方法计算研究区的地表比辐射率:水体像元的比辐射率 直接赋值为 0.995,自然地物和人工地物分别以植被像 元和建设用地像元为代表,其比辐射率 ε_s 和 ε_b 分别根 据下式(2)、(3)进行估算:

 $\varepsilon_s = 0.9625 + 0.0614 F_v - 0.0461 F_v^2$ (2)

$$\varepsilon_b = 0.9589 + 0.086 F_v - 0.0671 F_v^2$$
 (3)

③相同温度下黑体的辐射亮度值计算

根据辐射传输方程,卫星传感器接收到的热红外辐射亮度值的表达式可写为:

 $L = [\varepsilon \Delta B(T_s) + (1 - \varepsilon) L \downarrow] \Delta \tau + L \uparrow$ (4) 式中, ε 为地表比辐射率, T_s 为地表真实温度, $B(T_s)$ 为普朗克定律推导得到的黑体在 T_s 的热辐射强 度, τ 为大气在热红外波段的透射率, $L \uparrow \pi L \downarrow$ 分别是 大气上行和下行的热辐射强度。根据 NASA 提供的计 算工具, τ , $L \uparrow \pi L \downarrow$ 可根据影像的成像时间和中心经 纬度计算得到。则温度为 T 的黑体在热红外波段的辐 射亮度 $B(T_s)$ 为:

 $B(T_s) = [L - L^{\uparrow} - \tau \Delta (1 - \varepsilon) L^{\downarrow}] / \tau \Delta \varepsilon \quad (5)$

④地表温度反演

在获取温度为T_s的黑体在热红外波段的辐射亮度后,根据普朗克公式的反函数,求得地表真实温度T_s:

$$T_s = K_2 / ln \left(\frac{K_1}{B(T_s)} + 1 \right) \tag{6}$$

Fig.2 Classification results of the study area

式中, $K_1 \, \langle K_2 \rangle$ 为 Landsat 8影像热红外波段的定标常数, 在遥感影像的头文件中获取。

3) 生态弹性度计算

生态弹性度指生态环境在内外扰动或压力不超过其弹性限度时,具有自我调节与恢复能力的特性,计算 公式如下:

$$E = \sum_{i=1}^{n} (P_i R_i)$$
 (7)

式中,n为景观类型的数量,P_i表示第*i*种景观类型在该景观格局中所占的比例,R_i表示第*i*种景观类型的生态弹性度分值。参考有关学者的研究^[17-18],再结合研究区实际情况,对不同景观类型的生态弹性度进行赋值,具体分值见表2所示:

4) 其它指标计算

其余指标计算方法见表 3。各指标计算的空间结果如图 3 所示。可以看到,NDVI 值最大的位于农田区, 其次是滩涂植被区;建设用地主要集中在大丰港岸段,只有零星植被分布,NDVI 值接近于 0;围海养殖区和河 流主要由水体组成,这部分区域 NDVI 值最小。从地表温度分布来看,农作物、植被进行光合作用,水体比热



容大,都对气温调节有积极作用,因此农田和围海养殖区温度较低;而建设用地植被覆盖度较低,热岛效应明显,因此整个研究区中大丰港区所在地温度最高。

	Table 2 Ecologic	al elasticity score table
景观类型	生态弹性度分值	生态价值
Landscape types	Values of ecological elasticity	Ecological value
河流 River	8	水资源的多少以及质量的优劣直接决定整个生态系统环境的状况
林地 Forestry	8	林地对于涵养水源,净化环境,水土保持以及调节气候具有重要意义
围海养殖区 Aquaculture area	5	围海养殖要以优良的水体环境作为基础,养殖过程中可能导致周围临 近水体中污染物含量超标
农田 Farmland	5	农田对局地的水土保持、养分循环、水调节等有意义,但是其也会产生 一些消极影响
未利用地 Unoccupied land	6	未利用地如果开发利用得当,对生态系统价值有促进作用,但利用不 好则会导致土地退化
滩涂植被 Marsh vegetation	7	植被对滩涂湿地的环境具有非常重要的作用,对生态健康也起到一定 的积极作用
建设用地 Construction land	3	建设用地改变了原有生态系统的属性,使生态系统服务价值降低

表 2 生态弹性度分值表

表 3 评价指标计算方法

	Table 3	Evaluation index calculation	ation method
指标名称 Index name	数据来源 Data sources	计算方法 Calculation methods	参数说明 Parameter declaration
NDVI	遥感影像	$\frac{\text{NIR}-R}{\text{NIR}+R}$	NIR 为近红外波段灰度值或反射率, R 为红光波段灰度值 或反射率
NDBI	遥感影像	SWIR-NIR SWIR+NIR	SWIR 为中红外波段灰度值或反射率,NIR 为近红外波段灰度值或反射率
景观多样性 Landscape diversity	遥感分类数据	$-\sum_{i=1}^{n}P_{i}(\log_{2}^{P_{i}})$	P _i 为景观类型 i 所占面积比例, n 为景观类型的数量
景观破碎度 Landscape fragmentation	遥感分类数据	$\frac{N_i}{A_i}$	N_i 为景观类型 i 的斑块数, A_i 为景观类型 i 的总面积
平均斑块面积 Mean patch area	遥感分类数据	$\frac{A}{N}$ 10 ⁶	A 为斑块总面积,N 为斑块总数
人类干扰指数 Human interference index	遥感分类数据	$\frac{A_1 + A_2 + A_3}{A}$	A 为区域总面积, A ₁ 为围海养殖区面积, A ₂ 为农田面积, A ₃ 为建设用地面积
围海养殖区密度 Density of aquaculture area	遥感分类数据	$\frac{A_1}{A}$	A为区域总面积, A1 为围海养殖区面积
坡度 Slope	DEM 数据	$\frac{h}{l} \times 100\%$	h 为高程差, l 为水平距离

NDBI 主要反映城镇或建设用地信息,但其本质上揭示的是地表的裸露特征^[14],因此 NDBI 最大的区域 在大丰港后方的临港产业区以及海岸线附近的滩涂。滩涂植被区向陆一侧植被覆盖度逐渐增大,NDBI 逐渐 减小,到农田区地表基本为农作物覆盖,NDBI 最低。从景观指数来看,建设用地分布较为分散,斑块数量多, 平均斑块面积小,景观破碎程度大,生态弹性度较低,一旦遭受破坏难以自我修复;而农田区、围海养殖区、滩 涂植被区平均斑块面积大,景观破碎度小,具有较高的生态弹性度,自然恢复能力较强。

2.3 耦合 TOPSIS-VOR 模型的生态系统健康评价法

2.3.1 生态系统健康评价指标归一化

生态系统是多变量的,因此对生态系统健康的度量标准也是多指标的。为了使各指标间可以相互比较, 需要根据表1中的指标类型分别对各指标进行归一化处理,计算公式如下:



图 3 各指标遥感空间差异分布图

Fig.3 Spatial difference map of remote sensing for each index

1) 具有积极健康意义指标:

$$Y = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$$
(8)

2) 具有消极健康意义指标:

$$Y = (X_{\max} - X) / (X_{\max} - X_{\min})$$
(9)

式中,X表示原始数据, X_{max} 表示样本数据的最大值, X_{min} 表示样本数据的最小值。

2.3.2 TOPSIS 评价法

TOPSIS 法(Technique for order preference by similarity to ideal solution)是有限方案多目标决策分析的一种 常用方法,其基本原理是:以归一化后的原始数据矩阵,采用余弦法找出有限方案中的最优方案和最劣方案, 然后分别计算各评价对象与最优方案和最劣方案间的距离,根据各评价对象与最优方案的相对接近程度,来 判断评价对象的优劣^[19-20]。 单一指标归一化处理以后,采用 TOPSIS 模型分别对 3 个子系统下的指标进行计算,具体步骤如下: 1)构建评估矩阵。设有 n 个评价对象, m 个评价指标,得到原始数据矩阵为:

$$X = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{m1} & X_{m2} & \cdots & X_{mn} \end{bmatrix}$$
(10)

式中,各元素为*X_{ii}*,*i*=1,2,…,*m*;*j*=1,2,…,*n*。

2) 原始指标标准化处理。处理方式同公式 8 和 9。

3)确定最优方案和最劣方案。最优方案 Z⁺ 由归一化后矩阵 Z 中的最大值构成: Z⁺ = (max Z₁, max Z₂, ..., max Z_n);最劣方案 Z⁻ 由归一化后矩阵 Z 中的最小值构成: Z⁻ = (min Z₁, min Z₂, ..., min Z_m)。

4) 计算每一个评价对象与 Z^+ 和 Z^- 的距离 D_i^+ 和 D_i^- 。

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^m (\max Z_{ij} - Z_{ij})^2}$$
(11)

$$D_{i}^{-} = \sqrt{\sum_{i=1}^{m} (\min Z_{ij} - Z_{ij})^{2}}$$
(12)

5) 计算各评价对象与最优方案的接近程度 C_i 。

$$C_{i} = \frac{D_{i}^{-}}{D_{i}^{+} + D_{i}^{-}}$$
(13)

式中, $0 \leq C_i \leq 1_\circ C_i$ 值越大,表明评价对象越优。

2.3.3 VOR 模型

根据生态系统健康的定义,组织力、活力和恢复力是系统健康的具体反映,因此健康可以从活力 V、组织力 0 和恢复力 R 的 3 个方面来度量^[21]。度量生态系统健康的指数 HI 定义为:

$$HI = V \times O \times R \tag{14}$$

2.3.4 生态健康评价等级划分

参考相关专家学者提出的生态系统健康等级划分标准^[22],将研究区范围内生态健康子系统及生态健康 综合指数按照相等间断法划分为5个级别,如表4所示。

		Table 4 Ecosystem	health assessment grad	e	
健康等级	健康分值	健康水平	健康等级	健康分值	健康水平
Health grade	Health score	Health level	Health grade	Health score	Health level
一级 Grade one	0.8—1	健康	四级 Grade four	0.2—0.4	较差
二级 Grade two	0.6-0.8	良好	五级 Grade five	0-0.2	差
三级 Grade three	0.4—0.6	一般			

表4 生态系统健康评价等:

3 结果分析

3.1 子系统健康状况分析

采用 TOPSIS 模型分别对 3 个子系统下的指标进行计算并分级,结果如图 4 所示,图 5 显示了子系统中各等级所占区域总面积的比例。

3.1.1 生态系统活力健康状况

生态系统的活力体现在初级生产力和物质循环两个方面。从图 4 和图 5 中可以看出,一级和二级活力较好的区域大约占了整个研究区的四分之一,对应的主要地物类型是农田,这是因为农作物初级生产力较高,活





Fig.5 The proportion of vigor, organization, and resilience

力值也相应较高。活力为三级的占比 73.66%,这部分区域主要是围海养殖区和滩涂植被覆盖区域,整体活力 一般。对于围海养殖区来说,养殖水域以渔业养殖为主,对水质要求较高,因此水体中藻类数量少,其初级生 产力比农田低;同时为了防止水中的养分流失,围海养殖水域需要控制与外界水体的连通,水体交换速度慢, 物质循环速度要小于农田区域,所以围海养殖区活力值低于农田区。滩涂植被区由于植被生长不如农作物旺 盛,活力值也较于农田区域略低。活力值较差的地区主要位于大丰港区的临港产业区,由于港口运营的需要, 港区后方建有大片的仓储区、加工区等,地表被建筑物、道路等覆盖和分割,破坏了原有的湿地生态系统,导致 植被覆盖率低,区域热岛效应明显,生态系统活力明显降低。

3.1.2 生态系统组织力健康状况

组织力体现生态系统的复杂性,组织越复杂,生态系统越健康。经分析可知,研究区组织力主要集中在二级和三级,分别占区域总面积的 50.78%和 41.93%,整体组织力较高。这部分区域主要包括了围海养殖区、农田、林地以及滩涂植被,景观类型多样化,对生态健康有积极作用。四级区域主要在大丰港区,组织力较差,主要原因是该区域以建筑用地为主,受人类活动干扰较大,对生态健康造成消极影响。五级区域零星分布在海岸线附近的光滩,滩面生态系统类型单一,组织力最低。

3.1.3 生态系统恢复力健康状况

在所有等级中,恢复力为二级的区域面积最大,占 50.63%。这部分区域主要是围海养殖区,属于人工围垦区域,受自然干扰的恢复速度较快,抵抗力较强,因此恢复力较好。三级区域占 38.91%,主要是农田、滩涂和少部分林地,其中农作物和滩涂植被的生长受自然因素影响较大;滩涂区域在水动力环境和沉积动力环境变化下,会发生侵蚀或淤积变化;而林地一经破坏,恢复所需时间较长,因此这类地区相对而言恢复力一般。四级主要是大丰港区所在地,港口建设投资大,一经破坏,修复需要消耗大量人力物力资源,因此该地区恢复力较差。

3.2 生态系统健康状况分析

将 TOPSIS 模型和 VOR 模型耦合,对海岸带陆域生态系统进行定量分析,根据生态系统健康综合评价值, 绘制了生态系统综合健康评价值空间分布图如图 6 所示。

3.2.1 不同景观类型的健康状况

从图 6 中可以看出,在所有地物类型中,河流占研 究区总面积的2.02%,都处于一级和二级,生态健康状 况较好。建设用地主要包括大丰港区及其附属设施和 道路等,约占研究区总面积的8.06%,处于四级和五级, 受人类活动影响较大,尤其是道路会将原本连通的自然 景观人为阻隔,因此这类地区生态健康状况较差。农田 区域占研究区面积的24.07%,大部分处于三级,少部分 处于二级,农作物通过光合作用进行固碳,调节区域气 候,对湿地生态健康有积极作用,因此生态健康状况相 对较好。围海养殖区面积最大,占研究区总面积的50. 86%,大部分处于二级,少部分处于三级,由于围海养殖 水体对调节气温有积极作用,因此这类地区也是生态健 康相对较好的区域。滩涂植被约占总面积的15.17%, 基本处于三级,滩涂地区本身地形冲淤变化大,植被类 型由于护花米草等先锋植被与本土植被之间的种群竞 争,景观类型不稳定,因此从景观角度来看这类地区生 态健康一般。



图 6 生态系统综合健康评价 Fig.6 Integrated health assessment of ecosystems

3.2.2 不同空间范围的健康状况

对图 6 进行统计可知,江苏中部海岸陆域生态系统健康状态整体较好,健康状态一级健康和二级良好的 区域面积共占 27.62%,健康状态三级一般的区域面积占 60.94%,健康状态四级较差和五级差的区域面积共 占 11.44%。从空间分布来看,大丰港至王港岸段生态健康状况最差,该岸段人类活动频繁,建筑物密度大,工 厂生产会产生大量废气废水,对环境造成污染和破坏,而人类居住区域也会产生大量生活垃圾,对生态环境造 成严重影响。斗龙港至四卯酉河段主要由围海养殖区、农田和滩涂组成,受污染较轻,环境保护程度较高,景 观破碎程度小,因此整体生态健康状况相对较好。此外,新洋港至斗龙港段的丹顶鹤国家级珍禽自然保护区 以及川东港西南处的麋鹿国家级自然保护区健康状况均为二级良好至一级健康之间,政府部门通过限制人类 开发活动,有计划地对环境加以保护,控制环境污染和生态破坏行为,防止环境质量恶化,有利于保持生态平 衡,因此生态状况较好。

4 结论

依据景观生态学和生态系统健康理论,以遥感数据为基础,建立了可直接从遥感影像中获取的评价指标 体系,并采用耦合的 TOPSIS-VOR 模型对江苏中部海岸生态系统进行健康评价。得出以下结论:

(1) 江苏中部海岸地区整体生态健康状态中等偏好,健康状况处于一般及以上的地区占总面积的88. 56%,健康状况较差和差的地区仅占总面积的11.44%。

(2)从地物类型来看,围海养殖区、农田集中区域以及自然保护区湿地生态健康状况较好,而建设用地区 域生态健康状况相对较差。

(3)从空间分布来看,斗龙港至四卯酉河岸段主要是农田区、围海养殖区和滩涂植被区,污染较小,整体 生态健康最好:四卯酉河至王港河岸段生态健康状况最差,该区域主要包括大丰港区及其临港产业区,景观破 碎程度高,受人类活动干扰频繁,可在区域内适当增加植被覆盖,开挖部分水面,增加区域的景观多样性,从而 提高生态系统活力。

与传统的以 PSR 模型和层次分析法相结合构建的生态健康评价模型相比,本文所提出的 TOPSIS-VOR 耦合模型评价方法具有以下优势:(1)评价指标数据基本均可从遥感影像中计算得到,数据获取方便,有利于 开展生态系统健康时序分析研究;(2)耦合模型不需要对指标权重进行赋值,避免了主观因素对客观评价结 果的影响:(3)评价结果能有效反映研究区内不同地物类型生态健康状况的空间分布特征,避免了传统评价 方法得到的生态健康评价结果仅用一个数值来表示整个区域健康状况带来的片面性,能够为管理者对生态系 统修复提供空间参考依据。

参考文献(References):

- [1] 范学忠, 袁琳, 戴晓燕, 张利权. 海岸带综合管理及其研究进展. 生态学报, 2010, 30(10): 2756-2765.
- [2] 徐浩田,周林飞,成遣.基于 PSR 模型的凌河口湿地生态系统健康评价与预警研究.生态学报, 2017, 37(24): 8264-8274.
- [3] 李杨帆,朱晓东,邹欣庆,刘青松,高建华.盐城海岸湿地资源环境压力与生态调控响应.自然资源学报,2004,19(6):754-760.
- [4] Yurnita A, Trisutomo S, Ali M. Assessing the sustainable development of coastal reclamation: a case of Makassar using GIS application. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017, 79(1): 012013.
- [5] 王一涵,周德民,孙永华. RS 和 GIS 支持的洪河地区湿地生态健康评价. 生态学报, 2011, 31(13): 3590-3600.
- [6] Vázquez-González C, Fermán-Almada J L, Moreno-Casasola P, Espejel I. Scenarios of vulnerability in coastal municipalities of tropical Mexico: an analysis of wetland land use. Ocean & Coastal Management, 2014, 89: 11-19.
- [7] Marre J B, Pascoe S, Thébaud O, Jennings S, Boncoeur J, Coglan L. Information preferences for the evaluation of coastal development impacts on ecosystem services: a multi-criteria assessment in the Australian context. Journal of Environmental Management, 2016, 173: 141-150.
- [8] 孙磊,孙英兰,周震峰.青岛市海岸带生态系统压力综合评价指标体系研究.海洋环境科学,2009,28(5):584-587.
- [9] 宁立新,马兰,周云凯,白秀玲.基于 PSR 模型的江苏海岸带生态系统健康时空变化研究.中国环境科学,2016,36(2):534-543.
- [10] 黄康宁,黄硕琳. 我国海岸带综合管理的探索性研究. 上海海洋大学学报, 2010, 19(2): 246-251.
- [11] 索安宁,曹可,初佳兰,于永海,王权明,关道明.基于 GF-1 卫星遥感影像的海岸线生态化监测与评价研究——以营口市为例.海洋学 报,2017,39(1):121-129.
- [12] 徐涵秋. 新型 Landsat8 卫星影像的反射率和地表温度反演. 地球物理学报, 2015, 58(3): 741-747.
- [13] 邢前国,陈楚群,施平.利用 Landsat 数据反演近岸海水表层温度的大气校正算法.海洋学报, 2007, 29(3): 23-30.
- [14] 吴宏安, 蒋建军, 周杰, 张海龙, 张丽, 艾莉. 西安城市扩张及其驱动力分析. 地理学报, 2005, 60(1): 143-150.
- [15] 左平,李云,赵书河,周鑫,滕厚锋,陈浩. 1976年以来江苏盐城滨海湿地景观变化及驱动力分析.海洋学报, 2012, 34(1): 101-108.

10

- [16] 覃志豪,李文娟,徐斌,陈仲新,刘佳. 陆地卫星 TM6 波段范围内地表比辐射率的估计. 国土资源遥感, 2004, 16(3): 28-32, 36-36, 41-41.
- [17] 张宝秀, 熊黑钢, 徐长春. 新疆于田绿洲生态弹性度与景观环境分析. 水土保持研究, 2008, 15(6): 112-114.
- [18] 徐明德,李静,彭静,钮键,曹露.基于 RS 和 GIS 的生态系统健康评价. 生态环境学报, 2010, 19(8): 1809-1814.
- [19] Lourenzutti R, Krohling R A. A generalized TOPSIS method for group decision making with heterogeneous information in a dynamic environment. Information Sciences, 2016, 330: 1-18.
- [20] 洪惠坤, 廖和平, 魏朝富, 李涛, 谢德体. 基于改进 TOPSIS 方法的三峡库区生态敏感区土地利用系统健康评价. 生态学报, 2015, 35 (24): 8016-8027.
- [21] 傅伯杰,刘世梁,马克明. 生态系统综合评价的内容与方法. 生态学报, 2001, 21(11): 1885-1892.
- [22] 陈鹏. 基于遥感和 GIS 的景观尺度的区域生态健康评价——以海湾城市新区为例. 环境科学学报, 2007, 27(10): 1744-1752.