

DOI: 10.5846/stxb201706071037

吴春生, 黄 翀, 刘高焕, 刘庆生. 基于模糊层次分析法的黄河三角洲生态脆弱性评价. 生态学报, 2018, 38(13): - .

Wu C S, Huang C, Liu G H, Liu Q S. Assessment of ecological vulnerability in the Yellow River Delta using the Fuzzy Analytic Hierarchy Process. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(13): - .

## 基于模糊层次分析法的黄河三角洲生态脆弱性评价

吴春生, 黄 翀\*, 刘高焕, 刘庆生

中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101

**摘要:** 黄河三角洲位于黄河入海口, 生态系统类型丰富, 具有重要的生物多样性保护和生态屏障作用; 但频繁的人为活动和自然灾害已对该地区生态环境造成严重破坏, 生态脆弱性增强, 故及时掌握黄河三角洲的生态环境现状, 为区域生态环境保护和资源开发管理提供可靠的科学依据和重要的数据支撑是相当必要的。基于多元数据, 尝试利用模糊层次分析法对黄河三角洲进行生态脆弱性评价, 获取黄河三角洲的生态脆弱性空间分布状况并进行原因分析, 并利用模糊逻辑理论模型对指标和评价结果进行定量化分级, 提高了评价过程的可靠性。结果显示, 黄河三角洲生态脆弱性等级空间分布具有一定的规律性, 从沿海到内陆生态脆弱性逐渐减弱, 有堤坝防护的沿海地区相对其他沿海区域生态脆弱性低, 土壤质量和地下水位对生态脆弱性的影响较重, 空间相关性分别达到-0.55 和-0.74, 人为开发活动对生态环境也产生较大压力。

**关键词:** 生态脆弱性; 黄河三角洲; 模糊层次分析法; 模糊逻辑模型; 土壤质量; 土壤含盐量

## Assessment of ecological vulnerability in the Yellow River Delt ausing the Fuzzy Analytic Hierarchy Process

WU Chunsheng, HUANG Chong\*, LIU Gaohuan, LIU Qingsheng

State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Science and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100101, China

**Abstract:** The Yellow River Delta (YRD) is located in northeast Shandong province. It is formed by perennial deposition of sediment and frequent diversions of the Yellow River. YRD has many ecological system types, including farmland, grassland, and wetland and so on. The wetlands can be subdivided into meadows, marshes, and beaches. These areas have been the habitat and transfer stop of migratory birds, which makes it important for protection of biodiversity. It is also important as an ecological protective screen between inland and the ocean. However, YRD is facing new challenges from both nature and society; on the one hand, the storm tide, seawater intrusion, drought, and primary soil salinization make the area have a vulnerable ecologic foundation; on the other hand, the abundant land and oil resources have led to intense human activities. The primary ecological environment has been heavily fragmented because of destruction from farming and oil exploration, and the destruction further has led to a high secondary soil salinization degree and rapid expansion of the vulnerable area. All this makes it necessary to understand and grasp the current situation of the ecological environment in YRD, which is helpful for regional ecological environmental protection and development planning. The aim of this study was to evaluate the ecological vulnerability degree in YRD and then analyze the spatial characteristics and reasons for these characteristics according to the assessment results. The selected assessment method in the study was the fuzzy analytic hierarchy process (FAHP), which is the combination of the fuzzy evaluation method (FEM) and the traditional analytic

基金项目: 国家自然科学基金(41471335; 41671422)

收稿日期: 2017-06-07; 网络出版日期: 2018-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: huangch@reis.ac.cn

hierarchy process (AHP). FAHP combines the strong objectivity of FEM and the clear structure of AHP. This assessment process was more reasonable than other methods. Additionally, the fuzzy logic model was selected for the quantitative expression of the indicator grading and evaluation results, and was different from traditional grading methods that have strict quantity boundaries. Twenty-one evaluation indicators were selected from underwater status, soil condition, land use, landform, vegetation coverage, meteorological conditions, ocean influence, and social economy according to the “pressure-state-response” framework in AHP. The study result showed that the spatial distribution of ecological vulnerability of YRD had a strong regularity. Generally, the vulnerability degree gradually decreased from the coastline to inland, and the best ecological environmental status was around the crossing of the Yellow River and the Diao River. In the coastal area, the vulnerability degree was lower where there were seawalls than where there were none, while in the inland, the ecological environment was better along the rivers than in other areas, especially the areas where human activity was frequent such as farmland, aquaculture areas, and saltpans, where the vulnerability degrees were very high. Along with those artificial reasons, the regional soil and ground status were also bound up with ecological vulnerability, and the spatial correlations between soil quality and ground water level were  $-0.55$  and  $-0.74$  respectively.

**Key Words:** ecological vulnerability; Yellow River Delta; Fuzzy Analytic Hierarchy Process; Fuzzy Logic model; soil quality; soil salinity

20 世纪初,美国学者 Clements 将 Ecotone 这一术语引入到生态学中<sup>[1]</sup>,之后衍生出生态脆弱性的概念,但直到现在,生态脆弱性仍未有被大众接受的概念或定义。综合现有的研究可总结出:生态脆弱性是当区域生态环境受到外界干扰时,所表现出的抗干扰能力弱,受干扰后恢复能力低,且发生转变后难以恢复的性质特点。全球变暖、冰川融化、干旱、洪水、污染以及生物多样性丧失等环境问题使得生态环境异常敏感,生态脆弱区逐步扩张,开展生态脆弱性研究是相当必要的。

国内外对生态脆弱性的研究已从初期的定性描述逐渐演变为普遍的定量评价<sup>[2-5]</sup>,研究尺度精细化显著增强<sup>[6-7]</sup>,研究领域也在不断拓宽,如林草交错带<sup>[8]</sup>、流域<sup>[9]</sup>、海岸带<sup>[10]</sup>等,但对于河口三角洲这一特殊区域的生态脆弱性研究相对较少。目前生态脆弱性评价的方法众多,常用的包括模糊隶属度评价法、层次分析法、灰色关联评价法和主成分分析法等<sup>[11-14]</sup>,各个方法都有自身的缺点,如层次分析法受人为主观思想的影响较重,灰色关联度评价法的复杂计算过程被大多数专家诟病。评价指标是整个研究的核心之一,学者们建立了多种指标选取框架,如“压力-状态-响应”模型<sup>[15]</sup>、“暴露度-敏感度-适应性”模型<sup>[16]</sup>以及“驱动力-压力-状态-影响-响应-管理”模型<sup>[17]</sup>等,随着自然环境和社会发展中各种科学问题的提出,生态脆弱性指标的全面化也在不断完善。

黄河三角洲是由黄河长年冲积形成的,该地区拥有丰富的自然景观类型,具有重要的生物多样性保护和生态屏障作用,但其充裕的土地和石油资源也带来了严重的人类活动干扰,再加上频繁的自然灾害影响,出现了土壤退化、土地浪费、水体污染和海岸侵蚀等问题,使该地区生态环境受到严重威胁,所以对该区域进行生态脆弱性评估对区域生态保护和管理具有重要的科学意义和现实意义。目前也有部分学者对黄河三角洲的生态脆弱性做了评价研究,如德国宇航局的 Michel 通过实地调查和问卷咨询的方式开展研究,对农村环境在受到内外干扰情况下的脆弱性状况进行定性描述,但缺少相关的定量数据支持<sup>[18]</sup>;其他相关研究多是完全利用层次分析法进行评价<sup>[19-21]</sup>,在指标的权重设定中受人为主观因素的影响过重。

本文拟采用模糊评价方法与层次分析法相结合对黄河三角洲生态脆弱性进行评价,也称为模糊层次分析法,将模糊三角函数作为层次分析法中指标重要性比较的赋值方式,可以降低人为主观作用太强的缺点<sup>[22-23]</sup>,而层次分析法为模糊评价法选取指标时提供了更清晰的思路和逻辑<sup>[11]</sup>,此外,本研究利用模糊隶属度作为指标和评价结果的定量化分类依据,削弱了以往布尔运算等级界线太过严格的缺点。本文研究目的一方面是验证方法的可行性,另一方面根据研究区的生态脆弱性状况,从空间和定量统计方面做原因分析,为黄

河三角洲的可持续发展提供必要支撑。

### 1 研究区与数据

#### 1.1 研究区概况

黄河三角洲位于中国山东省东北部,属东营市辖区,坐标区间为 37°22'—38°04'N 和 118°14'—119°05' E,总面积约为 5062.59 km<sup>2</sup>,东部和北部与渤海相邻(图 1)。研究区地形平缓,呈西高东低,南高北低趋势,高程在 0.00 m 至 12.50 m 之间,受黄河改道和冲积作用,微地貌类型多,包括岗阶地、河成高地、低洼地、河滩地、平地以及滩涂地等。黄河三角洲属于温带大陆性季风气候,降雨集中于 6—9 月,年均蒸发量远大于降水量,分别为 1 885.00 mm 和 537.40 mm;研究区土壤主要为潮土,盐渍化重,砂粒含量较高,土壤质量普遍较低。研究区自然植被以草本植物为多,主要是耐盐性的芦苇、柽柳、白茅和翅碱蓬等,人工植被以农作物为主。研究区东部和北部设有两个自然保护区—黄河口自然保护区和一千二自然保护区;研究区人为活动日趋严重,农业开垦范围不断扩张,工业建设以及石油资源的开发增加了原有自然景观的破碎度。

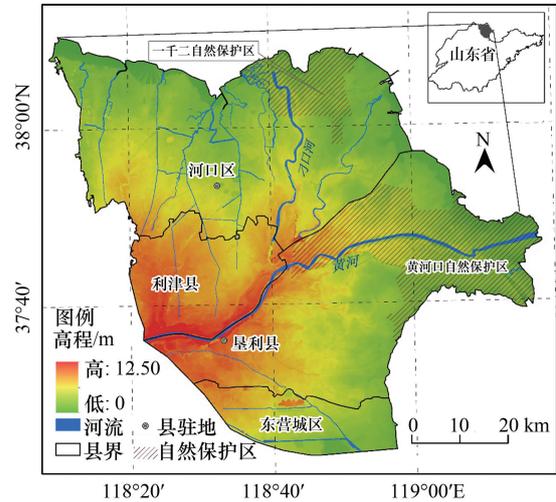


图 1 研究区位置及高程图

Fig.1 Location and elevation of the study area

#### 1.2 评价指标系统建立

生态脆弱性评价指标和因子选取的合理性和科学性,决定着评价过程的可行性以及评价结果的可靠性,所选指标要能够充分反映研究区面临的主要生态环境问题。目前黄河三角洲面临的主要生态环境问题可大致总结为:海洋潮汐和风暴潮导致的海水入侵造成陆地原有生态环境的破坏;地下水埋深较浅,地下水矿化度普遍较高,土壤盐碱化严重;人类活动极大改变了自然景观,也导致了土壤的次生盐渍化;农业化肥和农药的使用,工业的排污造成了严重的面源和点源污染,加剧了研究区的生态脆弱性。

根据以上的生态环境问题,本研究参照“压力-状态-响应”模型框架从地下水状况、土壤、土地利用状态、地形地貌、植被覆盖、社会经济、气候和海洋影响 8 个角度选取了 21 个评价指标,由于本文是将层次分析法与模糊理论相结合,该理论未将各指标划分至具体类别(压力、状态、响应)中,详细体系如图 2 和表 1 所示。

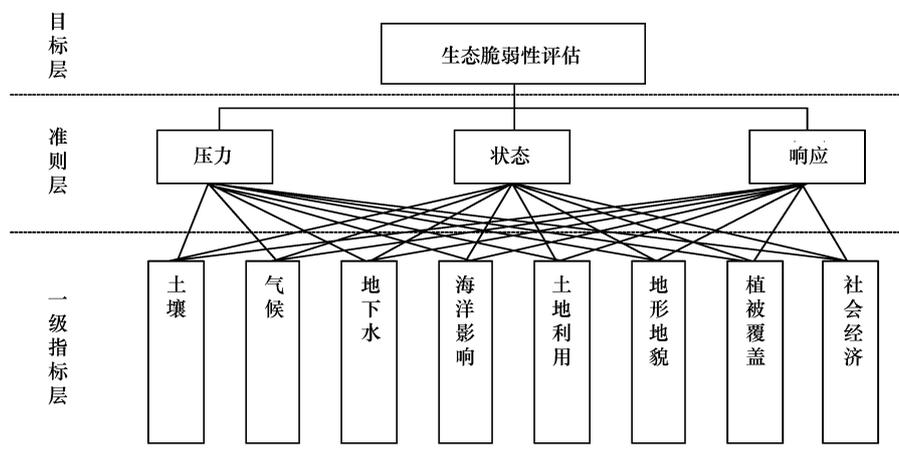


图 2 指标框架图

Fig.2 Index framework

表 1 一级指标和二级指标

Table 1 Two level index

一级指标 First class index	二级指标 Second class index	一级指标 First class index	二级指标 Second class index
地下水 Groundwater	地下水位	土地状况 Land status	土地垦殖率
	地下水矿化度		人类干扰指数
	土壤类型		土地利用
土壤条件 Soil condition	土壤质地	植被 Vegetation	水渠网密度
	土壤质量		植被覆盖度
	土壤含盐量		人口密度
	距海岸距离		道路网密度
海洋影响 Marine influences	海洋侵蚀系数	社会经济 Social economy	GDP 密度
	降雨量		高程
气候 Climatic conditions	≥10℃ 活动积温	地形地貌 Geomorphology	地貌类型
	干燥度		

## 2 数据来源研究方法

### 2.1 数据获取与处理

地下水数据:课题组近些年在黄河三角洲埋设了 16 口地下水井用于研究,本研究获取了 2014 年每口井的平均地下水位和平均地下水矿化度,利用普通克里格插值得到两者在整个研究区的分布状况;

海洋影响:本研究收集了 1984 年至 2014 年间 13 期海岸线分布特征,统计整个海岸每个位置的摆动频率,作为海岸侵蚀系数;距海岸距离以 2014 年海岸线为基准,利用欧氏距离法计算研究区各位置与海岸线的距离。

气候要素:从研究区内部和周边地区选取了 13 个气象站点,并从中国气象数据网(<http://data.cma.cn/site/index.html>)获取了各站点的累年日均气温和累年日均降雨量,并得到相应的年均 ≥10℃ 积温和年均降雨量,进而获得干燥度 ( $K$ )<sup>[24]</sup>,利用普通克里格插值得到各参数在研究区的分布状况。

$$K = \frac{0.16 \times (\text{全年} \geq 10^\circ\text{C 积温})}{\text{全年} \geq 10^\circ\text{C 期间的降雨量}}$$

社会经济统计数据:查询 2015 年中国统计年鉴,获取研究区内行政区的人口数量和 GDP,参考廖顺宝<sup>[25-26]</sup>等人提出的人口空间化方法,以“人口—居住地—影响要素”模式获取研究区的人口密度分布状况,继而得到 GDP 密度分布。

植被覆盖度:本研究以 2014 年 9 月份 Landsat8 OLS 数据为基础,首先获取研究区的 NDVI 指数,并利用以下公式计算得到研究区植被覆盖度:

$$VFC = (\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\text{soil}}) / (\text{NDVI}_{\text{veg}} - \text{NDVI}_{\text{soil}})$$

本研究中将  $\text{NDVI}_{\text{veg}}$  和  $\text{NDVI}_{\text{soil}}$  分别设定为研究区内的 NDVI 最大值和正的最小值,NDVI 小于等于 0 的区域直接设定其覆盖度为 0。

其他数据:土壤含盐量、土壤质量和 2014 年土地利用状况引用自吴春生对黄河三角洲土壤质量的研究成果<sup>[27-29]</sup>;研究区 DEM、微地貌数据、土壤类型和土壤质地取自中国科学院地理科学与资源研究所资源环境数据中心(<http://www.resdc.cn/>)。土地垦殖率、人类干扰指数、道路密度和水渠网密度数据源均为研究区 2014 年土地利用现状。所有数据均投影至统一坐标系下,并重采样为 30 m 空间分辨率。

### 2.2 模糊层次分析法

首先,参照层次分析法建立指标对比矩阵,根据有关黄河三角洲研究的专家给出的建议,多次修改对比矩阵,并通过一致性检验,参考 Kahraman<sup>[30]</sup>设定的模糊重要性对比赋值规则对原对比数值进行替代(表 2)。

表 2 指标重要性对比赋值标准

Table 2 9-Point saaty scale and triangular fuzzy number

重要性级别 Importance level	层次分析法赋值 AHP assignment	模糊三角函数赋值 Fuzzy function assignment	赋值倒数 Reciprocal
同一指标 Same	1	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)
两者同等重要 Equally	1	(1/2, 1, 3/2)	(2/3, 1, 2)
前者稍微重要 Slightly	3	(1, 3/2, 2)	(1/2, 2/3, 1)
前者明显重要 Obviously	5	(3/2, 2, 5/2)	(2/5, 1/2, 2/3)
前者强烈重要 Strongly	7	(2, 5/2, 3)	(1/3, 2/5, 1/2)
前者极端重要 Extremely	9	(5/2, 3, 7/2)	(2/7, 1/3, 2/5)

其次,计算指标权重。假设任意一个指标  $i$  与另一个指标  $j$  的重要性对比结果可以表示为  $(l_{ij}, m_{ij}, u_{ij})$ , 则指标  $i$  的累积扩展值可以表示为:

$$M_{g_i} = (l_{i1} + l_{i2} + \dots + l_{in}, m_{i1} + m_{i2} + \dots + m_{in}, u_{i1} + u_{i2} + \dots + u_{in}) = \left( \sum_{\alpha=1}^n l_{i\alpha}, \sum_{\alpha=1}^n m_{i\alpha}, \sum_{\alpha=1}^n u_{i\alpha} \right)$$

整个矩阵的累积扩展值表示为:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{\alpha=1}^n M_{g_i} = \left( \sum_{i=1}^n \sum_{\alpha=1}^n l_{i\alpha}, \sum_{i=1}^n \sum_{\alpha=1}^n m_{i\alpha}, \sum_{i=1}^n \sum_{\alpha=1}^n u_{i\alpha} \right)$$

指标  $i$  的综合扩展值为:

$$S_i = M_{g_i} \times \left[ \sum_{i=1}^n \sum_{\alpha=1}^n M_{g_i} \right] - 1 = (l_i, m_i, u_i)$$

$l, m, u$  为模糊三角函数 3 个顶点的横坐标,  $n$  为指标个数。对于任意两个综合扩展值  $S_i$  和  $S_j$ ,  $S_i \geq S_j$  的概率大小可表示为:

$$V(S_i \geq S_j) = hgt(S_i \cap S_j) = \mu_{S_i}(a) = \begin{cases} 1, m_i \geq m_j \\ 0, l_j \geq u_i \\ \frac{l_j - u_i}{(m_i - u_i) - (m_j - l_j)}, \text{其他} \end{cases}$$

设  $d_i'$  为  $S_i$  与其他综合扩展值比较后的最小值, 即:

$$d_i' = \min(V(S_i \geq S_k)), i \neq k, k = 1, 2, \dots, n$$

$$w' = (d_1', d_2', \dots, d_n')^T$$

对  $w'$  标准化即可获得各指标的权重:

$$w = (d_1, d_2, \dots, d_n)^T$$

在计算过程中会产生  $V(S_i \geq S_k) = 0$ , 导致  $d_i' = 0$ , 致使最终权重不合理, 在此情况下对指标对比矩阵中的元素进行标准化处理, 即可避免最终权重出现 0 的情况<sup>[31]</sup>。

### 2.3 模糊逻辑理论模型

模糊逻辑模型即是用模糊隶属度的方式来表达某个指标隶属于某个级别的概率, 而不是将指标指定为某一固定的等级<sup>[32]</sup>, 常用的隶属度函数为:

$$MF_{x_i} = [1 / (1 + ((x_i - b) / d) 2)]$$

其中  $0 < MF_{x_i} \leq 1$ ,  $MF_{x_i}$  为指标  $i$  的隶属度值,  $x_i$  为  $i$  的值,  $d$  为  $i$  的过渡区间的宽度, 一般选取隶属度值等于 0.5 和 1 时的指标值的差作为  $d$  的值,  $b$  为隶属度等于 1 时的指标值<sup>[33]</sup>。

对于每个指标需要根据研究目的设定其适宜范围, 当超出该范围时其隶属度值全为 0 或 1, 范围内的则利用隶属度函数来计算具体的隶属度值。而在确定适宜范围是往往需要借助于已有的研究成果、文献资料以及相关部门设定的标准规范等。

## 2.4 生态脆弱性评价方法

研究区最终的生态脆弱性评价利用加权求和的方法,即:

$$EVI = \sum_{i=1}^n A_i \times w_i$$

EVI 即为生态脆弱性值,  $w_i$  为各指标的权重值,  $A_i$  为各指标的隶属度。

## 3 研究结果

依据模糊层次分析法建立过程,各一级指标的重要性比较矩阵如下表 3 示:

表 3 一级指标重要性对比赋值

Table 3 Pair-wise comparison matrix of the first class index

	地下水 Groundwater	土壤条件 Soil condition	海洋影响 Marine influences	气候 Climatic conditions	土地 Land status	植被 Vegetation	社会经济 Social economy	地形地貌 Geomorphology
地下水 Groundwater	(1,1,1)	(1/2,2/3,1)	(5/2,3,7/2)	(3/2,2,5/2)	(1/2,2/3,1)	(2/3,1,2)	(3/2,2,5/2)	(3/2,2,5/2)
土壤条件 Soil condition	(1,3/2,2)	(1,1,1)	(5/2,3,7/2)	(2,5/2,3)	(3/2,2,5/2)	(3/2,2,5/2)	(5/2,3,7/2)	(5/2,3,7/2)
海洋影响 Marine influences	(2/7,1/3,2/5)	(2/7,1/3,2/5)	(1,1,1)	(1,3/2,5/2)	(2/5,1/2,2/3)	(1/3,2/5,1/2)	(1/2,2/3,1)	(1/2,2/3,1)
气候 Climatic conditions	(2/5,1/2,2/3)	(1/3,2/5,1/2)	(2/5,2/3,1)	(1,1,1)	(2/5,1/2,2/3)	(1/2,1,3/2)	(1/2,2/3,1)	(2/5,1/2,2/3)
土地 Land status	(1,3/2,2)	(2/5,1/2,2/3)	(3/2,2,5/2)	(3/2,2,5/2)	(1,1,1)	(3/2,2,5/2)	(2,5/2,3)	(5/2,3,7/2)
植被 Vegetation	(1/2,1,3/2)	(2/5,1/2,2/3)	(2,5/2,3)	(2/3,1,2)	(2/5,1/2,2/3)	(1,1,1)	(3/2,2,5/2)	(1,3/2,2)
社会经济 Social economy	(2/5,1/2,2/3)	(2/7,1/3,2/5)	(1,3/2,2)	(1,3/2,2)	(1/3,2/5,1/2)	(2/5,1/2,2/3)	(1,1,1)	(1/2,2/3,1)
地形地貌 Geomorphology	(2/5,1/2,2/3)	(2/7,1/3,2/5)	(1,3/2,2)	(3/2,2,5/2)	(2/7,1/3,2/5)	(1/2,2/3,1)	(1,3/2,2)	(1,1,1)

由于二级指标较多,不再逐个展示,参照权重计算的方法和过程,各指标的权重如下表 4 所示:

表 4 各级指标相对权重及综合权重

Table 4 Index weights

一级指标 First class index	一级指标权重 Weight of first class index	二级指标 Second class index	二级指标权重 Weight of second class index	综合权重 Synthetic weight
地下水 Groundwater	0.19	地下水水位	0.50	0.095
		地下水矿化度	0.50	0.095
		土壤类型	0.09	0.0279
土壤条件 Soil condition	0.31	土壤质地	0.07	0.0217
		土壤质量	0.40	0.124
		土壤含盐量	0.44	0.1364
海洋影响 Marine influences	0.05	距海岸距离	0.22	0.011
		海洋侵蚀系数	0.78	0.039
		降雨量	0.57	0.0228
气候 Climatic conditions	0.04	>= 10℃ 活动积温	0.30	0.012
		湿润度/干燥度	0.13	0.0052
		土地垦殖率	0.06	0.0138
土地状况 Land status	0.23	人类干扰指数	0.50	0.115
		土地利用	0.17	0.0391
		水渠网密度	0.27	0.0621
植被 Vegetation	0.12	植被覆盖度	1.00	0.12
		人口密度	0.50	0.02
社会经济 Social economy	0.04	道路网密度	0.19	0.0076
		GDP 密度	0.31	0.0124
地形地貌 Geomorphology	0.02	高程	0.68	0.0136
		地貌类型	0.32	0.0064

从表 4 中看出,一级指标中的土壤条件权重为 0.31,比其他各指标权重都大,说明土壤属性特征对于黄河三角洲生态安全稳定具有重要的作用,而由于研究区地形平缓,无较大起伏,所以地形地貌的影响相对较小,其所占权重也相应较小。

依据模糊逻辑模型构建过程,经查阅与各指标有关的文献资料、书籍和已有的研究成果<sup>[22, 24, 34-36]</sup>,并结合研究区实际情况,确定了各指标的脆弱性适宜范围、各指标的趋向性以及各指标在模糊函数中的  $b$  值和  $d$  值。定量指标详情如下表 5 所示:由于定性指标无数值型界线,无法利用模糊函数计算隶属度,故根据相关资料指定各定性指标的隶属度,详情如表 6 和表 7 所示:

表 5 各指标适宜范围及模糊函数参数值设定

Table 5 Suitability range of all index and values of  $b$  and  $d$ 

一级指标 First class index	二级指标 Second class index	指标范围 Range of index	趋向性 Tendency	$b$	$d$
地下水 Groundwater	地下水位/m	1—3	负向型	1	1
	地下水矿化度/(g/L)	2—30	正向型	30	20
土壤条件 Soil condition	土壤质量	0.3—0.7	负向型	0.3	0.2
	土壤含盐量/%	0.1—0.6	正向型	0.6	0.2
海洋影响 Marine influences	距海岸距离/km	2—30	负向型	2	23
	海洋侵蚀系数	0—0.83	正向型	0.83	0.33
土地状况 Land status	土地垦殖率	0.03—0.5	正向型	0.5	0.2
	人类干扰指数	0.5—1	正向型	1	0.2
植被状况 Vegetation	水渠网密度/(km/km <sup>2</sup> )	1—5	负向型	1	2
	植被覆盖度	0.1—0.6	负向型	0.1	0.35
社会经济 Social economy	人口密度/(人/km <sup>2</sup> )	100—1500	正向型	1500	1000
	道路网密度/(km/km <sup>2</sup> )	0.2—1.5	正向型	1.5	0.9
气候条件 Climatic conditions	GDP 密度/(万元/km <sup>2</sup> )	50—2500	正向型	2500	2000
	降雨量/mm	400—1000	负向型	400	300
	≥10℃活动积温/℃	4300—4600	负向型	4300	200
	干燥度	1.0—1.7	正向型	1.7	0.35

注: $b$  和  $d$  为隶属度函数中的设定参数

表 6 不同土地利用类型隶属度设定

Table 6 Membership values of different land use types

类型 Land use type	隶属度 Membership	类型 Land use type	隶属度 Membership
河流 River	0	沟渠 Channel	0.7
林地 Forest	0.1	内陆滩涂 Inland tidal flats	0.7
农田 Farmland	0.2	水工建筑用地 Waterworks construction	0.7
园地 Garden plot	0.2	采矿用地 Mineral estate	0.8
坑塘水面 Pond	0.3	港口码头用地 Wharf	0.8
水库 Reservoir	0.3	盐碱地 Alkaline land	0.9
草地 Grassland	0.4	盐田 Salt pan	0.9
交通用地 Traffic land	0.4	养殖 Aquaculture	0.9
居民地 Residence	0.4	沿海滩涂 Beach	1
沼泽地 Marshland	0.6		

根据上述的适宜性范围并参照模糊隶属度函数获取各定量指标在研究区内的生态脆弱性隶属度空间分布状况,结合各指标的权重,利用加权求和模型获取研究区整体的生态脆弱性隶属度,并利用自然断点法将脆弱性结果分成 6 个级别,各级别空间分布及面积统计如下图 3 和下表 8 所示:

表 7 不同土壤条件和地貌类型隶属度设定

土壤质地 Soil texture	隶属度 Membership	土壤类型 Soil type	隶属度 Membership	地貌类型 Geomorphology	隶属度 Membership
水体 Water	0	水体 Water	0	水体 Water	0
中壤 Medium loam	0.2	潮土 Fluvo-aquic soils	0.3	河成高地 High land	0.2
轻壤 Light loam	0.5	盐化潮土 salined fluvo-aquic soil	0.6	平地 Flat ground	0.4
重壤 Heavy loam	0.5	滨海盐潮土 Coastal saline soil	0.9	河滩地 Benchland	0.6
黏土 Clay	0.6			低洼地 Depression	0.8
砂壤 Sand	0.7			滩涂地 Mudflat	1.0

表 8 各生态脆弱性级别数值统计

脆弱性级别 Vulnerability class	隶属度范围 Membership range	面积/km <sup>2</sup> Area	比例/% Percentage
不脆弱 Non	0.16—0.32	464.17	9.19
微度脆弱 Weakly	0.32—0.41	820.40	16.23
轻度脆弱 Slight	0.41—0.50	901.42	17.84
中度脆弱 Medium	0.50—0.59	801.42	15.86
重度脆弱 Severely	0.59—0.67	1113.25	22.03
极度脆弱 Extremely	0.67—0.78	952.82	18.85

从图 3 中可以看出,在空间位置上越靠近海岸,脆弱性越高,以黄河入海口周边和研究区西北沿海最高,向内陆逐渐降低,研究区中部黄河和刁口河交叉处周边脆弱性最低,整体规律与预计结果相符合,与其他研究成果相比,整体结果也更为合理。

从统计结果看(表 8),重度脆弱区分布面积最大,范围最广,面积达到 1113.25 km<sup>2</sup>,占总面积的 22.03%,相对来说研究区北部沿海更多,尤其刁口河东侧面积较广;其次是极度脆弱区,面积为 952.85 km<sup>2</sup>,该区域分布更靠近海岸线,除刁口河入海口两侧和一千二自然保护区沿海外,其他沿海地区基本上为极度脆弱生态环境;中度、轻度、微度和不脆弱区被极度脆弱区和重度脆弱区包围,且四种类型整体上也由外向内脆弱度逐渐降低,中度脆弱区和轻度脆弱区处于外围,两者呈镶嵌分布,不脆弱区与微度脆弱区在最内侧,也呈零星交叉分布,不脆弱区面积最小为 464.17 km<sup>2</sup>。

为了更好的对研究区生态脆弱性做原因分析,根据各指标设定结果,土地状况所占权重仅次于土壤条件,故将评价结果与土地利用现状进行叠加,重点分析几个主要土地利用类型的生态脆弱性特点,结果如下表 9 所示。表 9 显示,农田面积最大,其主要分布在前三个脆弱性级别,以微度脆弱区面积最大为 405.06 km<sup>2</sup>,其次是不脆弱区和轻度脆弱区,农田在重度脆弱区和极度脆弱区也有少量分布。盐碱地同样在 6 个脆弱性级别区均有分布,相对于农田来说,除了不脆弱区,在其他级别面积分布较为均匀,轻度脆弱区和中度脆弱区面积基本相等,重度脆弱区面积最大为 290.10 km<sup>2</sup>。根据整个研究区脆弱性分布可以看出,沿海滩涂基本上都属

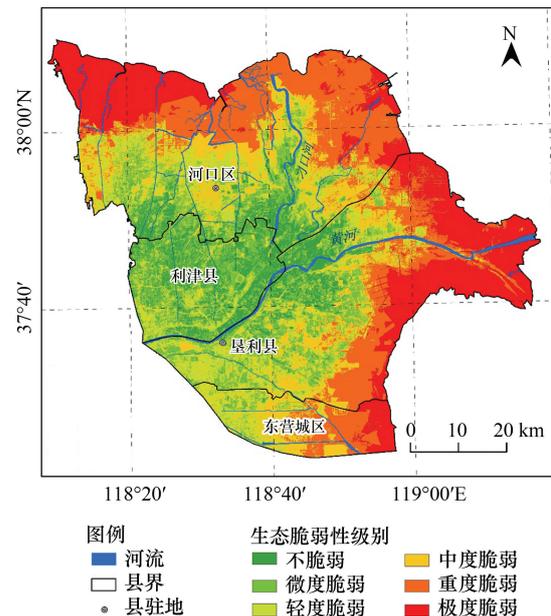


图 3 研究区生态脆弱性级别空间分布状况

Fig.3 Spatial distribution of ecological vulnerability in the study area

于极度脆弱类型,面积达到 359.50 km<sup>2</sup>,而在一千二保护区北侧的滩涂则属于重度脆弱区。居民地以分布在轻度脆弱区和中度脆弱区为主,草地和林地在各级别内分布面积较均匀,内陆滩涂和园地总面积较少。

表 9 主要土地利用类型在各生态脆弱性级别上的分布面积(km<sup>2</sup>)

Table 9 Area of main land use types in all EV grades(km<sup>2</sup>)

土地类型 Land use type	不脆弱 Non	微度脆弱 Weakly	轻度脆弱 Slight	中度脆弱 Medium	重度脆弱 Severely	极度脆弱 Extremely	总计 Total
草地 Grassland	10.28	23.07	45.03	48.47	37.28	3.46	167.59
内陆滩涂 Inland tidal flats	3.92	6.61	5.32	2.38	5.72	11.08	35.03
农田 Farmland	327.23	405.06	226.98	104.66	46.42	4.06	1114.40
沿海滩涂 Beach	—	—	0.00	0.74	117.91	359.50	478.15
盐碱地 Alkaline land	26.97	116.86	189.54	188.38	290.10	102.41	914.26
园地 Garden plot	8.26	10.00	2.71	0.34	0.01	—	21.33
林地 Forest	21.05	34.25	32.90	30.07	48.29	24.24	190.80
总计 Total	397.71	595.85	502.49	375.04	545.73	504.75	2921.57

#### 4 分析和讨论

从评价结果中生态脆弱性各级别的空间分布状况来看,空间格局较为合理,与预期设想和实际的自然条件影响相符,也证明了该方法的合理性和适用性,可以为其他类似研究提供借鉴和依据。与前期黄河三角洲生态环境脆弱性研究成果相比<sup>[19-21]</sup>,模糊理论的加入使得评价过程中人为主观要素影响得到减弱,隶属度函数的使用不但实现了定量化评价,而且在评价等级划分上更加灵活,评价结果更为详细且在空间上的连续性较强。

从评价指标上看,表 4 显示一级指标中土壤条件所占权重最大,其中又以土壤含盐量和土壤质量最为重要,所以生态脆弱性的空间分布受土壤含盐量和土壤质量的空间分布影响较重,从吴春生对土壤质量和土壤含盐量的研究成果看(图 4),两者与生态脆弱性评价结果在空间上具有相似性,土壤质量与生态脆弱性的空间相关性达到-0.55;在土壤质量较差的区域,生态脆弱性高,如黄河入海口周边,研究区的西北部和东南部等,而在刁口河与黄河交叉处周边土壤质量较高,土壤含盐量低,故其为不脆弱区。所以可以从如何提高土壤质量和降低土壤含盐量方面采取措施,来降低区域生态环境的脆弱度,如减少对耐盐植被的破坏,提高区域的植被覆盖,从而减少因蒸发而产生的表土聚盐现象,植被的枯枝落叶也能够提高土壤的肥力。

另外与生态脆弱性有较大关系的是土地状况和地下水条件。土地利用状况中人类干扰指数影响占比重较大,尤其是农田的开发和人工湿地(养殖和盐田)的建设对生态环境的改变较大,上述土地利用状况与生态脆弱性结果叠加统计结果以及下图 5 中主要土地利用类型的空间分布状况显示,一部分农田处于生态脆弱性较高的区域,这不利于生态环境的维持和保护,尤其当土壤肥力不足,作物产量降低时,该区域往往被弃耕,进而产生次生盐渍化,处于高生态脆弱性等级的盐碱地中有部分即为此类土地;另外,养殖和盐田开发破坏了原有生态环境的演化方向,加重了生态脆弱性程度。所以避免在脆弱性高的区域进行人为开发,对于保护区域生态环境有重要的作用。

图 5 中地下水埋深的空间分布状况显示其与生态脆弱性的空间分布格局也存在一定的相似性,两者的空间相关性达到-0.74,地下水矿化度较高,其埋深越浅,地表返盐越严重,长期的低植被覆盖率也使得净初级生产力较低,当受到外界干扰时,易改变原有状态,且难以恢复。

此外,对比研究区沿海区域的脆弱性空间差异可以看出,在设有防护措施或修复工程的位置,生态脆弱性相对较低,如从黄河口自然保护区北部至刁口河河口西岸的沿海岸段,分别建有不同类型的防护堤,有效阻挡了海水和潮汐向陆地的侵入,保障了植被的生长,从而提高了生态环境的稳定性;而黄河入海口及其周边区域由于要为动植物提供海陆交互的栖息地环境,故保留原有自然状态,减少人为影响则是正确的处理方式;所以

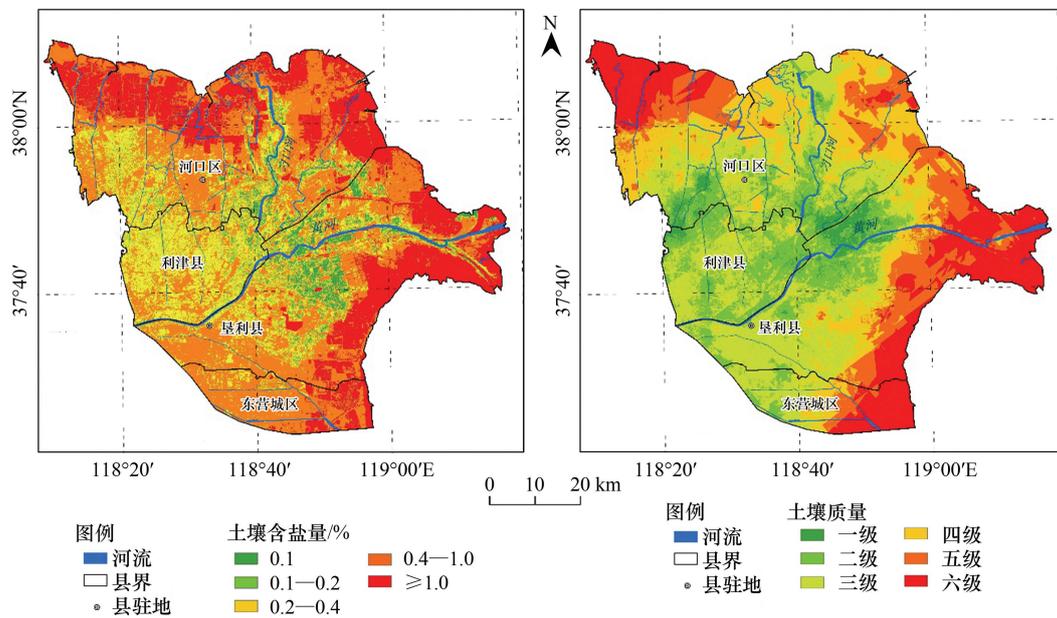


图 4 土壤质量和土壤含盐量空间分布状况

Fig.4 Spatial distributions of soil quality and soil salinization in study area

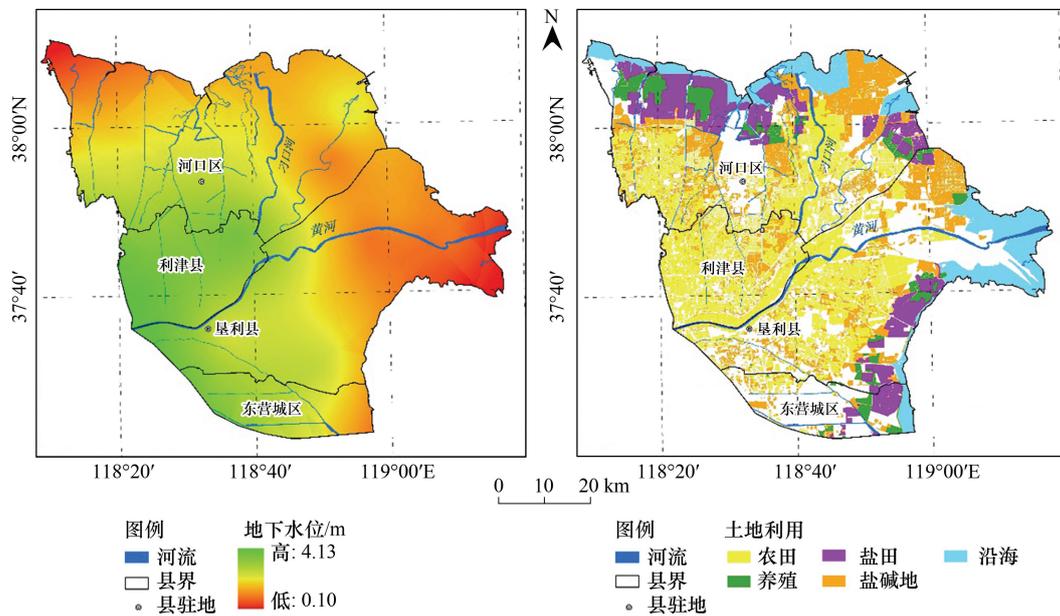


图 5 地下水位和主要土地利用类型空间分布状况

Fig.5 Spatial distributions of main land use types and groundwater level in study area

根据不同的岸段类型,采取相应的保护措施对于黄河三角洲生态稳定性具有积极作用。

与其他利用模糊层次分析法对生态脆弱性进行评价的研究相比,方法运用上存在很大差异,相互之间缺少对比,无法得知所选的指标对比函数以及权重计算方法的优劣性,这在以后的研究中还需要进一步探索;另外本研究只是针对 2014 年的黄河三角洲生态脆弱性做了评估,所以在做原因分析时只能从现状上讨论,总体上论据较为牵强,说服力不足;为更好的分析黄河三角洲生态脆弱性空间分布特征,还需要利用多期数据进行对比,动态的展示空间上的变化,但由于前期的数据不足,如土壤质量等,只能期待后期数据的完整性,而且还要注意本研究中选取的指标在后期研究中的适用性等。

## 5 结论

本研究利用模糊层次分析法和模糊隶属度理论对黄河三角洲生态脆弱性进行了评价,评价结果显示生态脆弱性级别分布具有一定的规律,从沿海到内陆脆弱性逐渐减弱,其中以黄河入海口周边、东南沿海以及西北沿海等地区脆弱性最高,而处于内陆的黄河和刁口河沿岸为不脆弱区域,空间分布格局整体上合理可信,也证实了方法的可用性;土壤含盐量作为黄河三角洲土壤的特殊指标,其对生态脆弱性影响较大,以土壤养分为主要内涵的土壤质量对其影响更大,空间相关性达到-0.55;地下水埋深直接控制着土壤含盐量的大小,其与生态脆弱性的空间相关性大小为-0.74;另外,人为活动如农田耕作、盐田和养殖开发以及石油开采对研究区生态环境产生了不利影响,而沿海堤坝的建设则为生态环境免受海水侵扰提供了屏障,有效保护了生态环境。为更好的分析黄河三角洲生态脆弱性原因以及提供保护生态环境的方法,未来要着眼于生态脆弱性的动态研究,利用多期结果进行对比。

### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 牛文元. 生态环境脆弱带 ECOTONE 的基础判定. 生态学报, 1989, 9(2): 97-105.
- [ 2 ] Pei H, Fang S F, Lin L, Qin Z H, Wang X Y. Methods and applications for ecological vulnerability evaluation in a hyper-arid oasis: a case study of the Turpan Oasis, China. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(2): 1449-1461.
- [ 3 ] Song G B, Li Z, Yang Y G, Semakula H M, Zhang S S. Assessment of ecological vulnerability and decision-making application for prioritizing roadside ecological restoration: a method combining geographic information system, Delphi survey and Monte Carlo simulation. *Ecological Indicators*, 2015, 52: 57-65.
- [ 4 ] 王介勇, 赵庚星, 王祥峰, 王丽华, 刘世美, 刘涛. 论我国生态环境脆弱性及其评估. *山东农业科学*, 2004, (2): 9-11.
- [ 5 ] 王铮, 张丕远, 刘啸雷, 刘燕华. 中国生态环境过渡的一个重要地带. *生态学报*, 1995, 15(3): 319-326.
- [ 6 ] Aretano R, Semeraro T, Petrosillo I, De Marco A, Pasimeni M R, Zurlini G. Mapping ecological vulnerability to fire for effective conservation management of natural protected areas. *Ecological Modelling*, 2015, 295: 163-175.
- [ 7 ] Petrosillo I, Zaccarelli N, Zurlini G. Multi-scale vulnerability of natural capital in a panarchy of social-ecological landscapes. *Ecological Complexity*, 2010, 7(3): 359-367.
- [ 8 ] 刘东霞, 卢欣石. 呼伦贝尔草原生态环境脆弱性评价. *中国农业大学学报*, 2008, 13(5): 48-54.
- [ 9 ] 陈晓, 塔西甫拉提·特依拜. 塔里木河下游生态脆弱性评价. *生态经济*, 2007, (10): 140-143.
- [ 10 ] 崔利芳, 王宁, 葛振鸣, 张利权. 海平面上升影响下长江口滨海湿地脆弱性评价. *应用生态学报*, 2014, 25(2): 553-561.
- [ 11 ] Chatterjee K, Bandyopadhyay A, Ghosh A, Kar S. Assessment of environmental factors causing wetland degradation, using fuzzy analytic network process: a case study on Keoladeo National Park, India. *Ecological Modelling*, 2015, 316: 1-13.
- [ 12 ] Chen W F, Cutter S L, Emrich C T, Shi P J. Measuring social vulnerability to natural hazards in the Yangtze River delta region, China. *International Journal of Disaster Risk Science*, 2013, 4(4): 169-181.
- [ 13 ] Owoade O K, Awotoye O O, Salami O O. Ecological vulnerability: seasonal and spatial assessment of trace metals in soils and plants in the vicinity of a scrap metal recycling factory in Southwestern Nigeria. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, 186(10): 6879-6888.
- [ 14 ] Zheng H F, Shen G Q, He X Y, Yu X Y, Ren Z B, Zhang D. Spatial assessment of vegetation vulnerability to accumulated drought in Northeast China. *Regional Environmental Change*, 2015, 15(8): 1639-1650.
- [ 15 ] 马骏, 李昌晓, 魏虹, 马朋, 杨予静, 任庆水, 张雯. 三峡库区生态脆弱性评价. *生态学报*, 2015, 35(21): 7117-7129.
- [ 16 ] 魏晓旭, 赵军, 魏伟, 颜斌斌. 中国县域单元生态脆弱性时空变化研究. *环境科学学报*, 2016, 36(2): 726-739.
- [ 17 ] Zhang F, Liu X P, Zhang J Q, Wu R N, Ma Q Y, Chen Y N. Ecological vulnerability assessment based on multi-sources data and SD model in Yinma River Basin, China. *Ecological Modelling*, 2017, 349: 41-50.
- [ 18 ] Wolters M L, Sun Z C, Huang C, Kuenzer C. Environmental awareness and vulnerability in the Yellow River Delta: Results based on a comprehensive household survey. *Ocean & Coastal Management*, 2016, 120: 1-10.
- [ 19 ] 李连伟, 刘展, 宋冬梅, 李东旭, 胡利民, 石学法. 黄河三角洲环境脆弱性评价方法及其应用. *中国农业大学学报*, 2013, 18(1): 195-201.
- [ 20 ] 王介勇. 黄河三角洲生态环境脆弱性及其土地利用效应[D]. 泰安: 山东农业大学, 2005.
- [ 21 ] 伊飞. 黄河三角洲湿地生态脆弱性评价[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2011.

- [22] Li L, Shi Z H, Yin W, Zhu D, Ng S L, Cai C F, Lei A L. A fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) approach to eco-environmental vulnerability assessment for the danjiangkou reservoir area, China. *Ecological Modelling*, 2009, 220(23): 3439-3447.
- [23] Wang Y M, Luo Y, Hua Z S. On the extent analysis method for fuzzy AHP and its applications. *European Journal of Operational Research*, 2008, 186(2): 735-747.
- [24] 孟猛, 倪健, 张治国. 地理生态学的干燥度指数及其应用评述. *植物生态学报*, 2004, 28(6): 853-861.
- [25] 廖顺宝, 李泽辉. 四川省人口分布与土地利用的关系及人口数据空间化试验. *长江流域资源与环境*, 2004, 13(6): 557-561.
- [26] 廖顺宝, 孙九林. 基于 GIS 的青藏高原人口统计数据空间化. *地理学报*, 2003, 58(1): 25-33.
- [27] Wu C S, Liu G H, Huang C. Prediction of soil salinity in the Yellow River Delta using geographically weighted regression. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2017, 63(7): 928-941.
- [28] 吴春生, 黄翀, 刘高焕, 刘庆生. 黄河三角洲土壤含盐量空间预测方法研究. *资源科学*, 2016, 38(4): 704-713.
- [29] 吴春生, 刘高焕, 黄翀, 刘庆生, 管续栋. 基于 MDS 和模糊逻辑的黄河三角洲土壤质量评估. *资源科学*, 2016, 38(7): 1275-1286.
- [30] Kahraman C, Ertay T, Buyukozkan G. A fuzzy optimization model for QFD planning process using analytic network approach. *European Journal of Operational Research*, 2006, 171(2): 390-411.
- [31] Chang D Y. Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research*, 1996, 95(3): 649-655.
- [32] Baja S, Chapman D M, Dragovich D. A conceptual model for defining and assessing land management units using a fuzzy modeling approach in GIS environment. *Environmental Management*, 2002, 29(5): 647-661.
- [33] Joss B N, Hall R J, Sidders D M, Keddy T J. Fuzzy-logic modeling of land suitability for hybrid poplar across the Prairie Provinces of Canada. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008, 141(1/3): 79-96.
- [34] 陈沈良, 谷国传, 吴桑云. 黄河三角洲风暴潮灾害及其防御对策. *地理与地理信息科学*, 2007, 23(3): 100-104, 112.
- [35] 徐建明, 张甘霖, 谢正苗, 吕晓男. 土壤质量指标与评价. 北京: 科学出版社, 2010: 46-47.
- [36] 张琨. 区域 LUCC 对生态环境脆弱性影响研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2014.