

土地生态系统脆弱性时空演化特征及影响因素

——以黄河三角洲高效生态经济区为例

张 帅,董会忠*,曾文霞 (山东理工大学管理学院,山东 淄博 255012)

摘要: 基于 BP 人工神经网络模型,对黄河三角洲高效生态经济区土地生态系统脆弱性进行综合评价和时空演化分析,并借助灰色关联度模型探究其影响因素.结果表明:研究区土地生态系统脆弱性从 2005 年的 1.244 降低至 2016 年的 1.113,脆弱性逐步改善;脆弱性由西到东、由内陆到沿海逐渐加剧,并表现出脆弱性平稳型和脆弱性渐低型 2 个演化特征;地均工业废水排放量、盐碱荒地面积比重、土地利用程度、建成区绿化覆盖率、节能环保支出占财政支出的比重是系统脆弱性的主要影响因素.因此,降低土地生态系统脆弱性的政策着力点应该集中在生态修复、优化土地利用结构和节能减排等方面.

关键词: 土地生态系统; 脆弱性; BP 人工神经网络; 时空演化

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2019)04-1696-09

DOI:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20190314.001

The time-space evolution characteristics of the vulnerability of land ecosystems and influencing factors: A case study of the Yellow River Delta Efficiency Eco-economic Zone. ZHANG Shuai, DONG Hui-zhong*, ZENG Wen-xia (School of Management, Shandong University of Technology, Zibo 255012, China). *China Environmental Science*, 2019,39(4): 1696~1704

Abstract: The BP artificial neural network model was used to conduct comprehensive evaluations and spatio-temporal evolution analyses of land ecosystem vulnerability in the efficiency eco-economic zone of the Yellow River Delta, then the grey correlation degree model was applied to explore the influencing factors. The results showed that the land ecosystem vulnerability decreased to 1.113 in 2016 from 1.244 in 2005 in the study area, and improved gradually. The vulnerability gradually increased from the west to the east and from the inland to the coastal, which showed two evolutionary characteristics: steady vulnerability type and lower vulnerability type. Average industrial wastewater discharge, proportion of saline-alkali wasteland, the degree of land use, the green coverage of built-up areas, and the proportion of energy-saving and environmental protection expenditures to fiscal expenditures were the main influencing factors of systemic vulnerability. Therefore, the policy focus of reducing the vulnerability of land ecosystems should be on ecological restoration, land utilization structure optimization, energy conservation and emission reduction.

Key words: land ecosystem; vulnerability; BP artificial neural network; spatiotemporal evolution

20 世纪中后期以来,全球环境变化、高强度的人类活动及两者之间的相互作用使得生态系统服务功能维持和经济增长的矛盾日益突出,我国社会经济的迅速发展很大程度上是以增加土地系统的脆弱性、损伤其主要生态环境功能为代价的^[1].人地关系失调导致的土地退化、土壤和水环境恶化、生态系统功能衰退等问题使我国土地资源环境面临前所未有的挑战^[2].如何改善人地关系、实现社会经济和土地生态环境的协调发展已成为当今社会普遍关注的焦点.自 1981 年脆弱性概念被引入地学领域,土地生态系统脆弱性研究逐渐深入,已经成为分析人地相互作用机制与过程、区域可持续发展的重要科学途径^[3-5].

对土地生态系统脆弱性的研究是在生态系统脆弱性研究的基础上发展起来的.作为复杂开放系

统,生态系统主要包含社会系统、自然系统和社会—自然耦合生态系统 3 类子系统^[6].生态系统脆弱性是组成生态系统的各子系统内部或子系统之间相互作用的结果^[7].对生态系统脆弱性的研究始于 1905 年,美国生态学家 Clements 将生态过渡带概念引入生态学领域^[8].1989 年,牛文元^[9]将生态脆弱带概念引入中国,此后生态脆弱性研究在中国逐步开展.

由于研究视角的不同和生态系统的复杂性,国内外学者对生态系统脆弱性内涵的界定尚未统一.如有学者定义生态系统脆弱性是生态系统在外界干扰下偏离原来状态并难以恢复的现象,是系统自身的一种属性^[10];也有学者认为生态系统脆弱性是

收稿日期: 2018-09-17

基金项目: 山东省重大理论与实践问题研究专项(18BSJJ05)

* 责任作者,教授, sdutdhz@126.com

一个度,是生态系统受到干扰时,易从一种状态转化为另一种状态的能力^[11];IPCC 第三次评估报告^[12]中考虑气候变化因素,定义生态系统脆弱性为系统容易遭受或没有能力应对气候变化对其不利影响的程度,是关于系统敏感性和适应能力的函数。然而经过进一步系统分析可以发现,相关学者在生态系统脆弱性基本内涵研究上仍然达到以下共识:生态系统脆弱性的客体是复杂开放的生态系统;生态系统脆弱性源于系统结构的不稳定性,外界扰动是生态系统表现出脆弱性的条件;生态系统脆弱性在时间和空间上具有异质性。

土地生态系统的脆弱性研究基础不仅包括脆弱性和生态系统理论,还融入了土地科学和可持续发展等理论。尽管相关研究起步较晚^[13],理论研究还不完善,但通过对生态系统脆弱性概念的理解,可以归纳出土地生态系统脆弱性具有以下特征:研究客体是土地生态系统;土地生态系统结构受到外界干扰,表现出系统正常功能衰退;土地系统的生态功能和社会价值对土地生态系统脆弱性评价有重要意义;土地生态系统脆弱性地域差异更显著。

脆弱性评价是土地生态系统脆弱性研究的核心内容。综合指数法^[14]、集对分析法^[15]、数据包络分析法^[16]、模糊物元法^[17]、生态足迹法^[18]等评价方法在脆弱性评价中均有过成功运用,而 BP 人工神经网络方法不但具有较强的非线性映射功能和容错功能,且具有较高的自学习和自适应能力,可以通过训练提高模型的泛化能力^[19],更适于解决复杂系统的脆弱性评价问题。

通过文献梳理可以发现,由于土地生态系统脆弱性研究仍处于起步阶段,相关学者对该领域的关注主要集中在土地退化、土地利用变化和系统服务价值的研究上^[20-23],以脆弱性视角对土地生态系统进行针对性研究的文献相对较少,在现有的土地生态系统脆弱性研究中存在以下问题:相关概念界定模糊,定量研究中缺乏适宜的表征方法;侧重于土地生态系统现状的研究,对系统的动态发展过程缺乏深入探索。

黄河三角洲高效生态经济区位于海陆交错地带,土地后备资源丰富,但土壤沙化、盐碱化情况严重,且资源开采等经济活动频繁,受多重系统的动力作用,具有土地生态系统复杂多变,本底脆弱,产生生

活污染严重的特征。基于上述分析,本文选择黄河三角洲高效生态经济区为研究对象,在明确相关概念的基础上构建评价体系,结合 BP 人工神经网络模型和灰色关联度模型对研究区土地生态系统脆弱性的时空分布变化进行综合评价分析,揭示研究区土地生态系统脆弱性的时空演化动态特征及其主要影响因素,为推进研究区土地生态系统的有效保护提供科学参考。

1 研究区域概况

黄河三角洲地处是以黄河历史冲积平原和鲁北沿海地区为基础,不断向周边延伸扩展形成的北起套儿河口,南至淄脉河口的地域空间,总面积 $2.65 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。该区域不仅有丰富的石油、天然气、海盐、地热等自然资源,而且拥有的未利用土地超过山东省的三分之一,是我国东部沿海土地后备资源最多的地区。此外,河海交错、海陆兼备的自然条件,使该区域生态系统交错分布,独具特色,大面积的浅海滩涂和种类齐全的湿地构成了我国温带最广阔、最完整、最年轻的湿地生态系统^[24]。然而黄河三角洲的成陆过程和海岸变迁使水土流失、土壤盐碱化等成为长期以来制约该区域土地生态系统运行的重要因素,而近年来地域资源开发等经济活动的加剧,使地区生态环境和系统受到严重破坏,在内外环境的作用下体现出较高的敏感性和较低的应对能力,土地生态环境脆弱性尤为显著^[25]。因此对成陆时间短,地质环境问题多,本底脆弱,且正值开发旺期的黄河三角洲高效生态经济区土地生态系统进行脆弱性分析具有重要的研究价值。

2 指标体系构建与研究方法

2.1 土地生态系统脆弱性内涵与指标体系构建

土地生态系统是土地各组成要素之间,及其与环境之间相互联系构成的具有自我调节功能和代偿作用的动态复合系统,系统内环境介质和生物群落等生态因子时刻处于动态运动之中。因为土地生态系统自身具有一定的应对能力,所以当系统的应对能力足以对抗生态因子的扰动时,土地生态系统则表现出平衡状态,反之,系统的结构将受到损害,功能也将衰退,土地生态系统的平衡状态将被打破。土地生态系统在内外因素干扰下,

因应对能力不足系统平衡被打破难以恢复,所表现出结构或功能受到损害的系统属性,即脆弱性。内部因素来自系统本身结构的合理化程度与对外界扰动破坏的承载力;外部因素主要来自区域经济的稳定性、土地综合管理及法治建设方面的社会经济因素等。本文综合考虑国内外学者对脆弱性内涵的阐释和黄河三角洲高效生态经济区土地生态系统的发展现状,对土地生态系统脆弱性内涵的界定包括两个方面:一是土地生态系统本身所具有的敏感性,是系统自身的一种属性;二是土地生态系统受内外因素干扰,维持原有土地生态平衡状态的能力。

在界定内涵的基础上,根据数据选取的系统性、

科学性和可操作性原则,参考相关研究^[26-27],并结合研究区土地生态系统复杂多变的特征,从敏感性和脆弱性 2 个方面构建了土地生态系统脆弱性评价指标体系(表 1)。测算敏感性指数的 10 个指标中,前 4 项反映社会经济发展的总体情况对土地生态系统敏感性的影响;第 $S_5\sim S_8$ 项反映了工农业生产活动造成的土地系统生态环境压力对敏感性的影响;最后 2 项土地结构因素是区域土地生态系统敏感性特点的直接反应。测算应对能力指数的 10 个指标中, $R_1\sim R_7$ 选取了区域经济、人口、产业结构、城镇化等相关指标来反映土地生态系统治理的社会经济基础; $R_8\sim R_{10}$ 反映了政府对区域土地生态环境治理的能力和力度。

表 1 土地生态系统脆弱性评价指标体系
Table 1 Assessment indicator system for the vulnerability of land ecosystem

| 目标层 | 准则层 | 代码 | 指标层 |
|------------------------|---------------|----------|---|
| 土地生态系统 脆弱性指数 (V) | 敏感性指数 (S) | S_1 | 地方财政收入增长率(%) |
| | | S_2 | 地均 GDP(万元/km ²) |
| | | S_3 | 人口密度(人/km ²) |
| | | S_4 | 城镇失业率(%) |
| | | S_5 | 化肥使用强度(t/km ²) |
| | | S_6 | 地均工业废水排放量(10 ⁴ t/km ²) |
| | | S_7 | 地均工业 SO ₂ 排放量(t/km ²) |
| | | S_8 | 地均工业固体废物排放量(10 ⁴ t/km ²) |
| | | S_9 | 土地利用程度(%) |
| | | S_{10} | 盐碱荒地面积比重(%) |
| | 应对能力指数 (R) | R_1 | 地方财政自给率(%) |
| | | R_2 | 人均 GDP(元/人) |
| | | R_3 | GDP 增长率(%) |
| | | R_4 | 固定资产投资密度(万元/km ²) |
| | | R_5 | 第三产业比值(%) |
| | | R_6 | 城镇居民人均可支配收入(元/人) |
| | | R_7 | 教育支出占的比重(%) |
| | | R_8 | 节能环保支出占财政支出的比重(%) |
| | | R_9 | 建成区绿化覆盖率(%) |
| | | R_{10} | 自然保护区面积比重(%) |

2.2 研究方法

由于土地生态系统脆弱性与系统因子扰动的敏感程度成正比,与系统对因子扰动的应对能力成反比,脆弱性指数计算方法如下:

$$V_i = S_i / R_i, i = 1, 2, \dots, m \tag{1}$$
$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j x_{ij}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \tag{2}$$

$$R_i = \sum_{j=1}^n v_j y_{ij}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \tag{3}$$

式中: V_i 、 S_i 、 R_i 分别为第 i 个评价单元的系统脆弱性指数、敏感性指数和应对能力指数; w_j 和 v_j 分别为第 j 个敏感性指标和第 j 个应对能力指标的权重,以熵权和 AHP 组合方法计算; x_{ij} 和 y_{ij} 分别表示第 i 个评价单元的第 j 个敏感性指标和第 j 个应对能力

指标的标准化值; n 为评价指标的个数; m 为评价单元的个数。

BP 人工神经网络通常是指基于误差反向传播算法(BP 算法)的多层前向神经网络,其基本思想是构建网络模型,通过不断调整权值和阈值使模型的输出值尽量接近期望值^[28]。本文构建 BP 神经网络模型如下:

由于一个三层神经网络可以精确实现任意给定的闭区间的连续函数^[29],所以本文构建 3 层神经网络拓扑结构(图 1)。

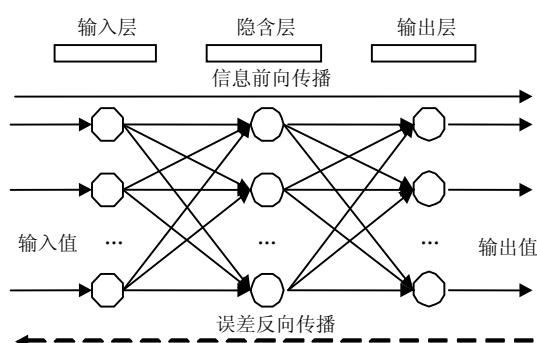


图 1 BP 人工神经网络拓扑结构

Fig.1 The architecture of BP artificial neural network

定义 x_i 为输入层第 i 个节点输入值, d_k 为第 k 个节点期望的输出值, v_{ij} 为输入层第 i 个节点值到隐含层第 j 个节点值的权值, a_j 为对应的阈值; w_{jk} 为隐含层第 j 个节点值到输出层第 k 个节点值的权值, b_k 为对应的阈值. n, m, l 分别输入层、隐含层和输出层的节点个数. 传递函数采用双极性 Sigmoid 型可微函数 $f(x) = \frac{1 - e^{-x}}{1 + e^{-x}}$. BP 神经网络主要包含 2 个训练过程: 信息前向传播和误差反向传播. 首先信息通过权重和传递函数, 由输入层逐级向前传播到隐含层, 然后由输出层输出. 则隐含层第 j 个节点输出值为 y_j :

$$y_j = f\left(\sum_{i=1}^n v_{ij}x_i + a_j\right), j = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

输出层第 k 个节点输出值为 o_k :

$$o_k = f\left(\sum_{j=1}^m w_{jk}y_j + b_k\right), k = 1, 2, \dots, l \quad (5)$$

当网络输出值与期望值不等时, 存在输出误差 $E = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^l (d_k - o_k)^2$. 若误差不满足模型的精度要求, 则需要将误差值沿网络反向传播, 通过调整权值来优化模型

$$\begin{cases} \Delta w_{jk} = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{jk}} & j = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, l \\ w_{jk}^{N+1} = w_{jk}^N + \Delta w_{jk} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \Delta v_{ij} = -\eta \frac{\partial E}{\partial v_{ij}} & i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m \\ v_{ij}^{N+1} = v_{ij}^N + \Delta v_{ij} \end{cases} \quad (7)$$

式中: 负号表示梯度下降, 常数 $\eta \in (0, 1)$ 表示比例系数, 在训练中表示学习速率. Δw_{jk} 和 Δv_{ij} 表示权值调整量, w_{jk}^{N+1} 和 v_{ij}^{N+1} 表示第 $N+1$ 次调整后权值. 同时, 模型训练过程中可以通过调整学习步长、动量因子等参数来优化模型. 最后将测试样本数据带入构建好的模型进行仿真, 检验其泛化能力, 若不满足要求则再次调整参数, 直至模型满足使用要求即完成模型的构建.

灰色关联分析法(GRA)在分析小样本的指标关联问题时准确性较高, 能充分体现数据的动态意义, 通过测定系统的母序列和子序列, 即因变量和自变量, 在几何形状方面的接近程度来判断指标关系是否紧密^[30]. 本文利用灰色关联分析法来测度评价指标与土地生态系统脆弱性之间的关系, 寻求土地生态系统脆弱性的主要影响因素.

2.3 数据来源

原始指标数据主要来源于 2006~2017 年黄河三角洲高效生态经济区 19 个县(市、区)统计年鉴和统计公报、《山东省统计年鉴》(2006~2017 年)^[31]、《山东省环境状况公报》(2005~2016 年)^[32] 及各县(市、区)国土资源志和生态规划等相关统计资料.

3 结果与分析

3.1 研究区土地生态系统脆弱性评价结果

以 2005~2016 年研究区的相关数据为基础, 依照上述方法构建、训练模型并导入数据计算, 结合式(1), 得到黄河三角洲高效生态经济区土地生态系统脆弱性评价结果(2005、2010 和 2016 年评价结果见表 2).

表 2 2005、2010 和 2016 年研究区土地生态系统脆弱性指数
Table 2 Vulnerability indexes of land ecosystem of the target area in 2005, 2010 and 2016

| 地区 | 2005 年 | | | 2010 年 | | | 2016 年 | | |
|----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | <i>S</i> | <i>R</i> | <i>V</i> | <i>S</i> | <i>R</i> | <i>V</i> | <i>S</i> | <i>R</i> | <i>V</i> |
| 东营 | 0.883 | 0.589 | 1.500 | 0.822 | 0.683 | 1.204 | 0.784 | 0.669 | 1.173 |
| 河口 | 0.857 | 0.612 | 1.400 | 0.826 | 0.645 | 1.280 | 0.782 | 0.667 | 1.172 |
| 垦利 | 0.890 | 0.583 | 1.527 | 0.830 | 0.632 | 1.313 | 0.810 | 0.671 | 1.208 |
| 利津 | 0.864 | 0.641 | 1.347 | 0.826 | 0.701 | 1.178 | 0.773 | 0.674 | 1.147 |
| 广饶 | 0.851 | 0.654 | 1.302 | 0.813 | 0.652 | 1.247 | 0.796 | 0.653 | 1.218 |
| 滨城 | 0.810 | 0.632 | 1.283 | 0.792 | 0.669 | 1.184 | 0.729 | 0.656 | 1.111 |
| 沾化 | 0.823 | 0.634 | 1.297 | 0.766 | 0.631 | 1.215 | 0.723 | 0.618 | 1.171 |
| 惠民 | 0.801 | 0.647 | 1.237 | 0.784 | 0.703 | 1.116 | 0.730 | 0.723 | 1.009 |
| 阳信 | 0.780 | 0.638 | 1.223 | 0.749 | 0.657 | 1.141 | 0.738 | 0.671 | 1.099 |
| 无棣 | 0.820 | 0.638 | 1.285 | 0.773 | 0.653 | 1.184 | 0.734 | 0.620 | 1.184 |
| 博兴 | 0.798 | 0.691 | 1.155 | 0.786 | 0.720 | 1.092 | 0.753 | 0.726 | 1.037 |
| 邹平 | 0.763 | 0.679 | 1.124 | 0.741 | 0.680 | 1.089 | 0.728 | 0.705 | 1.033 |
| 寿光 | 0.821 | 0.700 | 1.173 | 0.781 | 0.687 | 1.136 | 0.762 | 0.699 | 1.091 |
| 昌邑 | 0.830 | 0.700 | 1.185 | 0.793 | 0.678 | 1.170 | 0.772 | 0.682 | 1.132 |
| 寒亭 | 0.815 | 0.672 | 1.213 | 0.799 | 0.706 | 1.132 | 0.765 | 0.680 | 1.125 |
| 庆云 | 0.774 | 0.722 | 1.073 | 0.745 | 0.685 | 1.088 | 0.733 | 0.727 | 1.009 |
| 乐陵 | 0.772 | 0.720 | 1.073 | 0.747 | 0.680 | 1.099 | 0.688 | 0.671 | 1.025 |
| 莱州 | 0.825 | 0.656 | 1.257 | 0.806 | 0.684 | 1.179 | 0.788 | 0.679 | 1.160 |
| 高青 | 0.779 | 0.693 | 1.124 | 0.723 | 0.686 | 1.054 | 0.746 | 0.689 | 1.083 |
| 全区 | 0.819 | 0.658 | 1.244 | 0.784 | 0.675 | 1.161 | 0.754 | 0.678 | 1.113 |

注:*S*为敏感性指数,*R*为应对能力指数,*V*为脆弱性指数.

3.2 土地生态系统脆弱性时空演化特征分析

3.2.1 时序变化趋势 绘制研究区土地生态系统敏感性、应对能力和脆弱性指数变化趋势图(图 2).

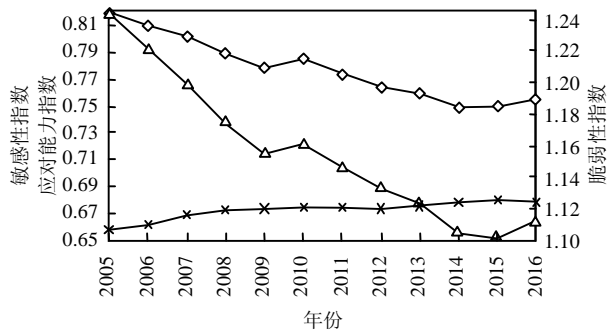


图 2 2005~2016 年研究区土地生态系统敏感性、应对能力和脆弱性变化趋势

Fig.2 Trends of sensitivity, response ability and vulnerability of land ecosystem of the target area from 2005 to 2016
—◇— 敏感性 —×— 应对能力 —△— 脆弱性

由图 2 可以看出,2005~2016 年黄河三角洲高效生态经济区土地生态系统应对能力指数呈上升趋势,而敏感性指数和脆弱性指数走势一致,呈现整体

下降、局部波动的趋势,脆弱性指数由 1.244 下降到 1.113.说明在时间维度上,系统结构和功能在逐步完善,人地矛盾关系正在逐步缓和.这与研究区产业结构的优化,经济的稳步增长,居民生态意识逐步增强等息息相关.近年来,研究区各县(市、区)不断加大对环境污染的控制和减排力度,同时加强生态环境建设、土地退化防范等措施,使研究区土地生态系统内外要素间的运动逐步协调,起到了优化系统结构,修复系统功能的作用,在一定程度上降低了系统的敏感性,提高了系统应对能力.

3.2.2 空间分异格局 综合考虑黄河三角洲高效生态经济区土地生态系统特征和现实的脆弱性状况,根据脆弱性指数的取值范围,以其平均值 $M=1.158$ 和标准差 $Std=0.084$ 作为评价依据,将 V 划分为 4 个档次(表 3).

为了揭示土地生态系统脆弱性等级的空间分布,利用 ArcGIS 软件绘制土地生态系统脆弱性分类的空间演变图(2005、2010 和 2016 年脆弱性等级分布见图 3).

表 3 土地生态系统脆弱性评价标准
Table 3 Evaluation criteria for land ecosystem vulnerability

| 脆弱性指数范围 | 脆弱性等级 | 解释 |
|---------------------|-------|--|
| $0 < V < (M - Std)$ | 低脆弱 | 系统受到内外因素扰动能维持平衡状态,敏感性较低,应对能力较强 |
| $(M - Std) < V < M$ | 中等脆弱 | 系统结构易受到破坏,能维持系统基本功能 |
| $M < V < (M + Std)$ | 较高脆弱 | 结构已受到破坏且不易恢复,部分功能衰退 |
| $(M + Std) < V$ | 高脆弱 | 系统受到内外因素扰动偏离平衡状态且不能恢复,系统结构不合理导致承载力低下,严重影响系统功能,敏感性较高,应对能力较低 |

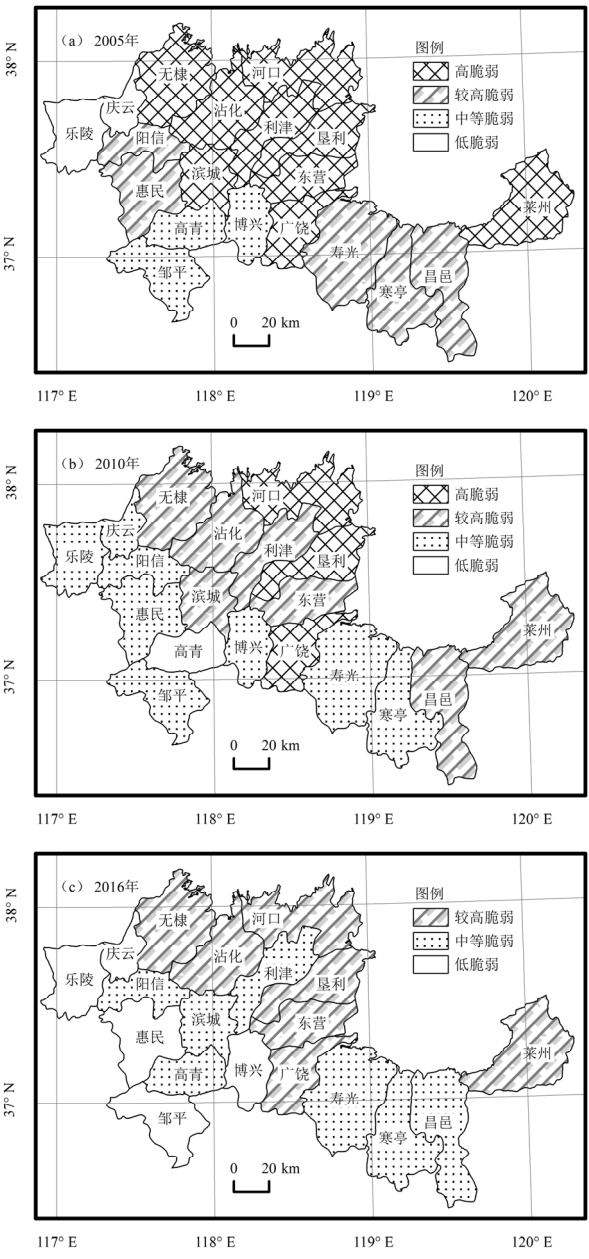


图 3 2005、2010 和 2016 年研究区土地生态系统脆弱性等
级空间分布
Fig.3 Vulnerability degree distributions of land ecosystem of
the target area in 2005, 2010 and 2016

由图 3 可以看出,研究区各城市土地生态系统脆弱性等级空间分异明显,呈现整体分散、局部集中

的分布态势,脆弱性由西到东、由内陆到沿海逐渐加剧.脆弱性等级较高的城市集中于研究区东部,黄河两翼辐射区域内,说明这些区域系统结构破坏严重,系统功能下降,面对内外扰动因素的威胁敏感性凸显而应对能力不足,系统脆弱性显著,系统结构和功能的破坏问题亟待解决;研究区西部及南部内陆城市脆弱性等级相对较低,说明研究区内,内陆城市土地生态系统结构较为稳定,基本功能较为完善,对内外因素扰动的敏感性较低而应对能力较强;位于东南渤海沿岸的寿光市、寒亭区和昌邑市处于中等脆弱水平,表明该区土地生态系统结构易受到破坏,尚能维持基本功.与西部内陆城市相较而言,东部沿海河口城市长期以来受自然环境影响,土壤沙化、盐渍化程度更高,且沿海区域石油、矿产等资源更为丰富,伴随着以土地资源为代价的城市化、工业化的蔓延式扩展,土地生态系统的敏感性状态较西部城市更严重,脆弱性特征更显著.

3.2.3 时空演化特征分析 结合表 2 和图 3 可以看出,2005~2016 年,黄河三角洲高效生态经济区 19 个县(市、区)土地生态系统脆弱性呈现出显著的时空演化特征:脆弱性平稳型和脆弱性渐低型.庆云、乐陵、高青 3 个城市呈现脆弱性平稳型特征,脆弱性变化较小;其余城市则呈现脆弱性渐低型特征,脆弱性变化显著.研究期内,低脆弱等级城市由 2 个增加到 5 个,利津县、滨城区和惠民县跨越了 2 个脆弱性等级,脆弱性状况明显改善.然而,2016 年尚有 7 个城市(研究区近一半面积)仍处于较高脆弱等级,说明黄河三角洲高效生态经济区土地生态系统整体处于较高脆弱性水平.这些城市大多隶属东营和滨州市.东营市油气资源丰富,是我国胜利油田所在地,多年油田工业的发展带来的河流污染、输油管道泄漏等问题对土地生态系统的正常运行造成严重威胁,同时快速的城市化发展使得系统原有的排盐碱功能遭到严重破坏,土壤盐渍化问题加剧.滨州市则存在土

地退化严重,土壤沙化、盐渍化程度高等问题,受土地质量限制,土地利用程度低,单位面积经济承载力低,土地生态系统脆弱性较高。

3.3 土地生态系统脆弱性影响因素分析

为进一步探明黄河三角洲高效生态经济区土地生态系统脆弱性的主要影响因素,运用灰色关联法对系统脆弱性与影响因素进行分析(表 4)。

表 4 研究区土地生态系统脆弱性评价指标关联度
Table 4 Correlation coefficients of vulnerability assessment indexes of land ecosystem in the target area

| 排名 | 评价指标 | 所属准则层 | 关联度 |
|----|--------------------------|--------|-------|
| 1 | 地均工业废水排放量 | 敏感性指数 | 0.912 |
| 2 | 盐碱荒地面积比重 | 敏感性指数 | 0.885 |
| 3 | 土地利用程度 | 敏感性指数 | 0.874 |
| 4 | 建成区绿化覆盖率 | 应对能力指数 | 0.858 |
| 5 | 节能环保支出占财政支出的比重 | 应对能力指数 | 0.852 |
| 6 | 地均工业 SO ₂ 排放量 | 敏感性指数 | 0.824 |
| 7 | 自然保护区面积比重 | 应对能力指数 | 0.813 |
| 8 | 地均工业固体废物排放量 | 敏感性指数 | 0.811 |
| 9 | 人均 GDP | 应对能力指数 | 0.787 |
| 10 | 化肥使用强度 | 敏感性指数 | 0.778 |
| 11 | 第三产业比值 | 应对能力指数 | 0.771 |
| 12 | 地均 GDP | 敏感性指数 | 0.770 |
| 13 | 地方财政自给率 | 应对能力指数 | 0.717 |
| 14 | GDP 增长率 | 应对能力指数 | 0.710 |
| 15 | 教育投入占财政支出的比重 | 应对能力指数 | 0.709 |
| 16 | 城镇居民人均可支配收入 | 应对能力指数 | 0.697 |
| 17 | 地方财政收入增长率 | 敏感性指数 | 0.686 |
| 18 | 人口密度 | 敏感性指数 | 0.671 |
| 19 | 固定资产投资密度 | 应对能力指数 | 0.642 |
| 20 | 城镇失业率 | 敏感性指数 | 0.533 |

由表 4 可以看出,地均工业废水排放量与土地生态系统脆弱性指数关联度系数最大,为 0.912,城镇失业率为脆弱性指数关联度系数最小,为 0.533,说明地均工业废水排放量对系统脆弱性影响最显著,各因素对脆弱性指数的影响程度差异较大。地均工业废水排放量、盐碱荒地面积比重、土地利用程度、建成区绿化覆盖率、节能环保支出占财政支出的比重与脆弱性指数的关联度系数达到 0.85 以上,为研究区土地生态系统脆弱性的主要影响因素。且从整体来看,敏感性影响因素与脆弱性指数的关联度系数比应对能力影响因素相对较高,说明研究区土地生态系统敏感性比应对能力对脆弱性的影响更显著。

为分析脆弱性状况严重城市的主要影响因素,

根据图 3 选取 2016 年系统处于较高脆弱性等级的 7 个城市,分别对其进行脆弱性指数与影响因素的关联度计算,筛选影响较高的前 4 位因素为各市区的主要影响因素(表 5)。

表 5 研究区土地生态系统脆弱性主要影响因素
Table 5 Vulnerability main influencing factors of land ecosystem in the target area

| 地区 | 第一因素 | 第二因素 | 第三因素 | 第四因素 |
|----|----------|----------|----------|----------|
| 东营 | S_6 | S_8 | S_5 | R_{10} |
| 河口 | S_7 | S_{10} | R_8 | S_9 |
| 垦利 | S_7 | S_{10} | S_8 | R_8 |
| 广饶 | S_6 | S_{10} | S_5 | R_1 |
| 沾化 | S_9 | S_{10} | S_5 | R_{10} |
| 无棣 | S_9 | R_9 | S_{10} | S_6 |
| 莱州 | S_{10} | R_{10} | R_8 | R_9 |

由表 5 可以看出,东营、河口、垦利、广饶 4 个县(区)土地生态系统脆弱性指数的主要影响因素为地均工业污染物排放量、盐碱荒地面积比重、政府节能环保支出占财政支出的比重及自然保护区面积的比重;土地利用程度、盐碱荒地面积比重和建成区绿化覆盖率为沾化区和无棣县系统脆弱性指数的主要影响因素;盐碱荒地面积比重、自然保护区面积比重是莱州市系统脆弱性指数的主要影响因素。需区分不同地区,针对性的采取应对措施。

3.4 政策建议

通过上述分析,针对不同区域从生态修复、优化土地利用结构和节能减排等方面提出建议。

3.4.1 对于土地利用率低,盐碱滩涂面积比重大,土地生态退化严重的滨州部分城市,应加强土地生态系统的修复和重建工作,有序推进未利用土地的集中开发,扩建区域人工湿地,合理调整土地利用结构,改善土地空间的无序扩展和资源浪费现状。

3.4.2 对于脆弱性相对较低的西部其他城市,要进一步完善土地生态系统结构,强化系统功能,工业生产中,加快推进工业废物的集中排放与处理,实现集群式发展。农业生产中,降低农用化肥施用量,并进一步增强自然保护区的建设,优化土地利用结构。

3.4.3 对于以东营市为主的石油、化工产业发展成熟,资源开发强度大,但土壤盐渍化程度高,且工业污染严重的东部沿海城市,应加强工业企业节能减排的政策支持,遏制企业偷排、超排现象。特别是针对油气、盐碱等传统资源型支柱产业,增加政府节能环保

保的财政支出,投资绿化改造关键技术研发,降低能耗和污染排放,提高资源综合利用率.此外,要完善海岸防护设施,增加沿海防护林工程体系建设,提高森林覆盖率.

4 结论

4.1 整体上看,2005~2016 年黄河三角洲高效生态经济区土地生态系统脆弱性呈现整体下降、局部波动的趋势,系统敏感性对脆弱性的影响比应对能力对脆弱性的影响更为显著,研究区土地生态系统脆弱性特征突出.

4.2 脆弱性空间分布呈现整体分散、局部集中,西低东高,由内陆到沿海逐渐加剧的态势.主要表现出脆弱性平稳型和脆弱性渐低型两个时空演化特征,受油气化工产业无序发展及土壤盐碱化程度高、土地系统本底脆弱的影响,隶属东营和滨州两市的部分县级城市脆弱性等级较高.

4.3 地均工业污染物排放量、盐碱荒地面积比重、土地利用程度、建成区绿化覆盖率、节能环保支出占财政支出的比重为系统脆弱性的主要影响因素,在多重系统动力的作用下,研究区土壤盐碱、沙化程度较大.在工业化、农业化推进过程中,产业布局失衡,采用粗放型经济发展模式,加剧了系统脆弱性.城镇化发展促进了人口和产业的集聚,优化了产业布局 and 资源配置,在一定程度上缓解了土地生态系统脆弱性压力.

参考文献:

- [1] 黄河清,甄霖,闫惠敏.土地系统的脆弱性及其恢复力建设[J]. 中国科学院院刊, 2009,24(6):649-654.
Huang Q H, Zhen L, Yan H M. Current status of the vulnerability of land systems in China and some considerations on strategies for resilience building [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2009,24(6):649-654.
- [2] 程钰,王亚平,张玉泽,等.黄河三角洲地区人地关系演变趋势及其影响因素[J]. 经济地理, 2017,37(2):83-89,97.
Cheng Y, Wang Y P, Zhang Y Z, et al. The evolution trend and driving factors of man-land relationship about the Yellow River Delta Area [J]. Economic Geography, 2017,37(2):83-89,97.
- [3] Timmerman P. Vulnerability, resilience and the collapse of society [R]. Toronto: Institute for Environmental Studies, University of Toronto, 1981.
- [4] 史培军,王静爱,陈婧,等.当代地理学之人地相互作用研究的趋向——全球变化人类行为计划(IHDP)第六届开放会议透视[J]. 地理学报, 2006,61(2):115-126.

- Shi P J, Wang J A, Chen J, et al. The future of human-environment interaction research in geography: lessons from the 6th Open Meeting of IHDP [J]. Acta Geographica Sinica, 2006,61(2):115-126.
- [5] 李鹤.东北地区矿业城市脆弱性特征与对策研究[J]. 地域研究与开发, 2011,30(5):78-83.
Li H. Vulnerability of mining cities in Northeast China and its control measures [J]. Areal Research and Development, 2011,30(5):78-83.
- [6] Gallopín G C. Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity [J]. Global Environmental Change, 2006,16(3):293-303.
- [7] 徐君,李贵芳,王育红.生态脆弱性国内外研究综述与展望[J]. 华东经济管理, 2016,30(4):149-162.
Xu J, Li G F, Wang Y H. Review and prospect of research on ecological vulnerability in China and abroad [J]. East China Economic Management, 2016,30(4):149-162.
- [8] Risser P G. The status of the science examining ecotones [J]. Bioscience, 1995,45(5):318-325.
- [9] 牛文元.生态环境脆弱带 ECOTONE 的基础判定[J]. 生态学报, 1989,9(2):97-105.
Niu W Y. The discriminatory index with regard to the weakness, overlapness, and breadth of ECOTONE [J]. Acta Ecologica Sinica, 1989,9(2):97-105.
- [10] 赵珂,饶懿,王丽丽,等.西南地区生态脆弱性评价研究——以云南、贵州为例[J]. 地质灾害与环境保护, 2004,15(2):38-42.
Zhao K, Rao Y, Wang L L, et al. Evaluation of ecological fragility in southwest of China [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2004,15(2):38-42.
- [11] 安宏锋,徐浩,安宁,等.喀斯特山区生态环境脆弱性综合评价——以贵州省黔中地区为例[J]. 环境影响评价, 2016,38(4):51-56.
An H F, Xu H, An N, et al. Comprehensive evaluation of eco-environmental vulnerability in Karst Mountain areas: A case study of the central region of Guizhou province [J]. Environmental Impact Assessment, 2016,38(4):51-56.
- [12] IPCC. Climate change 2001: impacts, adaptation and vulnerability [R]. United Kingdom: Cambridge University Press, 2001:75-103.
- [13] 赵源,黄成敏,温军会.土地系统脆弱性研究进展和展望[J]. 中国农业资源与区划, 2013,34(5):121-127.
Zhao Y, Huang C M, Wen J H. Research progress and prospect of land system vulnerability [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2013,34(5):121-127.
- [14] 苏飞,张平宇.中国区域能源安全供给脆弱性分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2008,18(6):94-99.
Su F, Zhang P Y. Vulnerability analysis of regional energy security supply in China [J]. China Population, Resources and Environment, 2008,18(6):94-99.
- [15] 王肖敏,彭飞,韩增林.基于 SPA 的海洋产业系统脆弱性与障碍因素研究——以中国沿海地区为例[J]. 资源开发与市场, 2015, 31(2):166-171.
Wang X M, Peng F, Han Z L. Analysis of marine industrial system vulnerability and obstacle factors based on Set Pair Analysis: A case study of the coastal provinces of China [J]. Resource Development & Market, 2015,31(2):166-171.
- [16] 裴欢,王晓妍,房世峰.基于 DEA 的中国农业旱灾脆弱性评价及时空演变分析[J]. 灾害学, 2015,30(2):64-69.

- Pei H, Wang X Y, Fang S F. Study on temporal-spatial evolution of agricultural drought vulnerability of China based on DEA mode [J]. *Journal of Catastrophology*, 2015,30(2):64-69.
- [17] Alcamo J, Acosta-Michlik L, Carius A, et al. A new approach to quantifying and comparing vulnerability to drought [J]. *Regional Environmental Change*, 2008,8(4):137-149.
- [18] 徐留兴,常毅,赵源. 基于生态足迹的蒙经县土地系统脆弱性分析 [J]. *安徽农业科学*, 2015,43(31):14-17.
- Xu L X, Chang Y, Zhao Y. Land system vulnerability analysis based on ecological footprint in Yingjing [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2015,43(31):14-17.
- [19] 孟超,胡健. 基于BP神经网络的中国煤炭安全评价研究 [J]. *科研管理*, 2016,37(8):153-160.
- Meng C, Hu J. A research on China's coal mine safety evaluation based on BP neural network [J]. *Science Research Management*, 2016, 37(8):153-160.
- [20] Salvati L, Zitti M. Assessing the impact of ecological and economic factors on land degradation vulnerability through multiway analysis [J]. *Ecological Indicators*, 2009,9(2):357-363.
- [21] 胡喜生,洪伟,吴承祯,等. 福州市土地生态系统服务时空分异特征 [J]. *中国环境科学*, 2013,33(5):881-888.
- Hu X S, Hong W, Wu C Z, et al. Spatiotemporal differentiation of land eco-system service in Fuzhou City [J]. *China Environmental Science*, 2013,33(5):881-888.
- [22] Metzger M J, Rounsevell M D A, Acosta-Michlik L, et al. The vulnerability of ecosystem services to land use change [J]. *Ecosystems and Environment*, 2006,114(1):69-85.
- [23] 盛中华,董会忠,殷秀清,等. 基于熵权可拓模型的土地利用规划环境影响评价——以黄河三角洲高效生态经济区为例 [J]. *资源开发与市场*, 2017,33(12):1433-1438.
- Sheng Z H, Dong H Z, Yin X Q, et al. Environmental Impact Assessment of land use planning based on entropy weight and extension model: A case study in Yellow River Delta Efficient Eco-economic Zone [J]. *Resource Development & Market*, 2017, 33(12):1433-1438.
- [24] 程钰,王亚平,张玉泽,等. 黄河三角洲地区人地关系演变趋势及其影响因素 [J]. *经济地理*, 2017,37(2):83-89,97.
- Cheng Y, Wang Y P, Zhang Y Z, et al. The evolution trend and driving factors of man-land relationship about the Yellow River Delta Area [J]. *Economic Geography*, 2017,37(2):83-89,97.
- [25] 董会忠,吴朋,万里洋. 基于 NC-AHP 的区域生态安全评价与预警——以黄河三角洲高效生态经济区为例 [J]. *科技管理研究*, 2016,36(9):79-84,88.
- Dong H Z, Wu P, Wan L Y. Evaluation and early-warning of regional ecological security based on NC-AHP: A case study of the efficient ecological economic zone of the Yellow river Delta [J]. *Science and Technology Management Research*, 2016,36(9):79-84,88.
- [26] 许倍慎,周勇,徐理,等. 湖北省潜江市土地生态脆弱性时空分析 [J]. *中国土地科学*, 2011,25(7):80-85.
- Xu B S, Zhou Y, Xu L, et al. Spatio-temporal analysis on the land ecological vulnerability in Qianjiang City, Hubei Province [J]. *China Land Science*, 2011,25(7):80-85.
- [27] Pei H, Fang S F, Lin L, et al. Methods and applications for ecological vulnerability evaluation in a hyper-arid oasis: a case study of the Turpan Oasis, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015,74(2): 1449-1461.
- [28] Widrow B D. Learning in artificial neural networks a statistical perspective [J]. *Neural Computation*, 1989,1(4):425-464.
- [29] Robert H N. Theory of the backpropagation neural network [C]. *The International Joint Conference on Neural Networks*, 1989:593-605.
- [30] 谭学瑞,邓聚龙. 灰色关联分析:多因素统计分析新方法 [J]. *统计研究*, 1995,(3):46-48.
- Tan X R, Deng J L. Gray correlation analysis: A new method of multivariate statistical analysis [J]. *Statistical Research*, 1995(3):46-48.
- [31] 2017 山东统计年鉴 [M]. 北京:中国统计出版社, 2017:45-236.
- Shandong statistical yearbook: 2017 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2017:45-236.
- [32] 山东省环境保护厅. 2016 山东省环境状况公报 [EB/OL]. http://xxgk.sdein.gov.cn/xxgkml/hjzkgb/201706/t20170602_1122660.html, 2017-06-02.
- Environmental Protection Department of Shandong Province. Shandong Environmental State Bulletin: 2016 [EB/OL]. http://xxgk.sdein.gov.cn/xxgkml/hjzkgb/201706/t20170602_1122660.html, 2017-06-02.

作者简介: 张帅(1991-),女,河北唐山人,山东理工大学硕士研究生,主要从事管理科学理论与方法研究.发表论文1篇.