

县域生态环境脆弱性评价及其动态分析 ——以黄河三角洲垦利县为例

王瑞燕¹, 赵庚星^{1,*}, 周 伟², 姜曙千¹, 秦元伟¹

(1. 山东农业大学资源与环境学院, 泰安 271018; 2. 河海大学计算机及信息工程学院, 南京 210098)

摘要: 县域是中国同时具备地域、空间和行政独立性的最基本区域单元, 科学评价该尺度生态环境脆弱性状况及变化具有积极的理论和现实意义。以典型生态环境脆弱区黄河三角洲垦利县为例, 在对生态环境脆弱性主要属性重新界定基础上, 分别从稳定性、敏感性和区域适应性 3 个方面选取评价指标构建指标体系, 建立了评价模型, 并对该县 1986 ~ 2003 年的生态环境脆弱性发展变化进行了动态分析。研究结果显示: 垦利县生态环境不稳定; 1986 ~ 2003 年期间, 垦利县生态环境敏感性总体呈下降趋势, 区域适应性总体呈上升趋势。偏相关分析方法对垦利县生态环境自然因子的敏感性排序结果为地下水埋深 > 蒸降比 > 地下水矿化度 > 气温, 确定地下水埋深、蒸降比和地下水矿化度为该区生态环境自然敏感因子。垦利县区域适应性的“障碍度”计算结果表明: 盐碱地治理比例始终是第一障碍因素; 农田防护林密度的限制集中出现在 1995 ~ 1998 年之间; 化肥农药增长率自 2000 年以后成为主要障碍因素; 有效灌溉面积比率和排涝体系面积比例的限制在 1990 年之前出现。研究结论认为, 垦利县生态环境脆弱度呈现降低趋势, 但仍处于脆弱状态, 需重点关注敏感因素和障碍因素的发展变化。研究表明, 该评价方法可体现出县域生态环境脆弱性的根本原因及其发展变化过程, 是对目前国内生态环境脆弱性研究领域的有益补充。

关键词: 县域; 稳定性; 敏感性; 适应性; 生态环境脆弱性

文章编号: 1000-0933(2009)07-3790-10 中图分类号: Q143 文献标识码: A

Assessment and dynamic changes of environmental vulnerability at county level: a case study in Kenli County of the Yellow River Delta, China

WANG Rui-Yan¹, ZHAO Geng-Xing^{1,*}, ZHOU Wei², JIANG Shu-Qian¹, QIN Yuan-Wei¹

1 College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China

2 College of Computer and Information Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(7): 3790 ~ 3799.

Abstract: The environmental vulnerability has been the issue in the field of international environment, but such domestic study is few. As county is the basic regional units characterized with regional, spatial and administrative independence in China, assessment of the environmental vulnerability at county level is a matter of importance. Based on the requirement of environment management, focused on county level, this paper clarified the attribute of environmental vulnerability, selected evaluation indexes from three aspects of stability, sensitivity and applicability, and established the evaluation models so as to systematically assess environmental vulnerability within county area. The results indicated that the environmental stability of Kenli County was instable, the environmental sensitivity appeared a descend trend and the environmental adaptability showed an uptrend as a whole during 1986 — 2003. The partial correlation method was adopted to analyze the natural factor sensitivity of Kenli County, and their sensitivity sequence was that the groundwater level > evaporation and precipitation ratio > groundwater salinity > air temperature. Therefore, the natural sensitive factors of the study area were determined as the former three. The results of obstacle degree of regional adaptability indicated that the saline-alkali soil amelioration rate

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40571160); 国家级“星火计划”重点资助项目(2007EA740002); 国家科技部“十一五”科技支撑计划资助项目(2006BAD10A10)

收稿日期: 2008-03-15; 修订日期: 2009-02-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaogx@sdau.edu.cn

was the most important obstacle factor during 1986 — 2003, the restriction of the farmland shelter-forest density mainly appeared during 1995 — 1998, and the pesticide and fertilization application became the main obstacle since 2000, and the effective irrigation area ratio and the drainage system area ratio raised as the problem before 1990. The conclusions are that the environmental vulnerability of Kenli County is declining, but still in vulnerable state. At the same time, Kenli County should put the emphases on the development of the sensitive and obstacle factors. The assessment method can find the fundamental reasons and the development process of the County environmental vulnerability, which is significant for the current domestic study.

Key Words: county level; stability; sensitivity; adaptability; environmental vulnerability

自 20 世纪 80 年代生态过渡带的概念提出以来,生态环境脆弱性研究便成为国际生态环境研究的热点问题^[1~4]。目前,国内外所进行的相关研究从内容上可归纳为两类:一类是生态环境的单一或特定脆弱性评价,它是针对某一特定系统对某一个或某一类环境压力的生态环境脆弱性评价,如 IPCC 对海平面上升的脆弱性和气候变化的脆弱性研究^①, Weslawski 在潮汐地区进行的漏油脆弱性研究^[5], Loague 在区域尺度上进行的杀虫剂污染的地下水脆弱性研究^[6], Hughes 和 Brundrit 在国家尺度上进行的海平面上升的脆弱性研究^[7], 以及 Elrich 进行的生态系统对人为侵扰的脆弱性研究等^[8]。另一类是生态环境综合脆弱性评价,是对生态环境脆弱性的综合性全面衡量,评价指标既包含自然脆弱因子也包含社会经济因素。其中以南太平洋应用地球科学委员会(SOPAC)建立的用于度量不发达地区/国家和一些小的岛屿国家的生态环境脆弱性指标体系最具代表性^[9],国内所进行的生态环境脆弱性评价研究也多属此类^[10~18]。然而,生态环境的脆弱性是一项动态变化的综合过程,内部结构的不稳定性、对外界环境变化的敏感性和区域适应性是其最基本的 3 个属性,生态环境脆弱性评价需综合考虑生态环境的多维性、复合性、动态变化性及其空间尺度。总体看,目前的评价主要反映的是某一区域在某一时间点上的生态环境脆弱性,评价结果多为一反映脆弱性的综合值,属静态评价,难以体现生态环境脆弱性的动态演变及其不同属性。

县域是中国国民经济和社会格局的重要组成部分,是同时具备地域、空间和行政独立性的最基本区域单元,在社会经济发展中发挥着重要的支撑和基础性作用^[19],但县域发展明显落后于城市,生态环境破坏问题日益加重,阻碍了经济的持续健康发展,因此迫切需要对县域的生态环境脆弱性进行评价研究。目前国内相关研究主要集中在全国、区域和省市尺度,而针对县域及以下更小尺度的长时序动态研究还相对较少。

黄河口地区是陆地、海洋、淡水、农田、草地、湿地等生态系统的交错带,自然和社会经济条件独特,生态环境十分脆弱。因此,本文选择典型生态环境脆弱区黄河三角洲垦利县,基于生态环境脆弱性的内涵,从生态环境稳定性、敏感性和适应性三方面特征选取指标,建立相应的稳定性、敏感性与适应性模型,对研究区 1986 ~ 2003 年的生态环境脆弱性进行综合评价,试图探索反映生态环境脆弱性多方面特征的县域尺度生态环境脆弱性评价方法,为县域生态环境建设和环境灾害防治以及资源环境与社会经济的可持续发展提供依据。

1 研究方法

广泛收集垦利县 1986 ~ 2003 年生态环境的有关数据,然后选取生态环境脆弱性稳定性、敏感性和区域适应性的评价指标,对指标进行标准化处理,并确定各指标权重,在此基础上构建评价模型对该县生态环境脆弱性进行测度。

1.1 数据获取

本研究收集的资料主要包括:垦利县历年的气象观测数据,包括年均降水量、地面蒸腾量和气温数据;垦利县 1:5 万比例尺地形图和地貌类型分布图;垦利县水资源数据,包括地下水矿化度、地下水埋深资料等;第

① IPCC. 1992. Global Climate Change and the rising challenge of the sea. RSWG report IPCC.

二次土壤普查和历年调查分析的土壤资料;垦利县土地统计资料、土地资源调查变更数据等。以及主要来源于垦利县统计年鉴的社会经济资料,包括人口、农业生产、社会生产总值以及垦利县生态环境治理情况等社会经济资料。

1.2 指标体系

结合当地实际,本着可操作性、科学性、可表征性及可度量性等原则,选取生态环境稳定性、敏感性和适应性 3 方面指标,综合分析垦利县生态环境脆弱状况。

1.2.1 生态环境稳定性指标

生态环境稳定状况由一些最基本的环境因子决定,如土壤、地质和地形地貌等立地因素,这些因素由地质事件决定,随时间变化缓慢,人类活动对其影响甚微,在本研究中认为它是不变化的。而具体到区域尺度,是指与其他地区相比较,该区域稳定性程度的高低,因此将它作为一个相对的概念来看待,将更有实际意义。

垦利县位于黄河三角洲的扇形区的边缘,平均海拔低于 10m,地下水埋深浅且矿化度高。黄河尾间流路的摆动形成了岗、坡、洼相间的复杂的地貌类型。黄河冲积物是该县土壤形成的物质基础,因此垦利县土壤质地偏轻,毛管作用十分强烈,土壤极易返盐,再加上海水和高矿化度的地下水的共同作用,形成的土壤非常脆弱,土壤成为限制该县农业生产和经济发展的主要因素。因此,特殊的微地貌、较低的海拔高度、高矿化度的地下水以及年轻的土壤共同奠定了研究区脆弱生态环境的空间格局,其中,地貌类型、土壤质地和海拔高度是决定生态环境稳定性的关键因素。

1.2.2 生态环境敏感性指标

一个区域的生态环境脆弱性是在外界环境的影响下不断变化的,其直接成因是系统中某些容易发生变化的生态环境要素,敏感性则是生态环境脆弱性时空变化的具体表征。由于外界环境变化的不确定性,在实际工作中直接选取敏感性因子比较困难,而敏感性在现实中外在表现为生态环境的恶化和生态环境问题的加剧,这些数据相对易得,且能较全面客观的反映生态环境敏感性状况。因此,考虑到实际工作的可操作性,研究中根据生态环境问题的严重程度,围绕生态环境问题选取评价指标,衡量生态环境的敏感性。

垦利县生态环境问题集中体现在土壤盐碱化、自然草场退化、土地质量下降、淡水资源匮乏以及湿地、芦苇地和滩涂等重要生境面积萎缩等几个方面。研究中,选取盐碱地比例、中低产田比例、土壤有机质含量、地表水面积比例、草场退化比例、重要生境占地率和林草覆盖率等 7 项指标评价垦利县生态环境敏感性。

1.2.3 区域适应性指标

区域对外界环境变化产生敏感性响应后,其最终受到的影响程度还取决于它对这种因敏感性响应而进行的适应性调整能力,即区域适应性。在敏感性响应一致的情况下,区域适应性愈强,生态环境脆弱性将愈小。一个地区对生态环境变化的适应能力与当地的科学技术水平、文化教育水平、环保意识以及经济发展水平等有关。考虑当地社会经济条件对生态环境变化的适应能力、承受能力及调控能力确定适应性指标,具体指标见表 1。

1.3 评价指标的处理及权重确定

1.3.1 定性指标的量化处理

为进行定量评价,采用专家打分法对地貌类型、土壤质地等定性指标的稳定性进行量化处理,如表 2, 3。调查发现,在垦利县境内,海拔高度 4m 以上的地带基本脱离了海水的影响,而海拔高度低于 4m 的地带,经常受到海潮和风暴潮的侵袭,因此根据受海水影响程度,将海拔高度分为大于 4m 和小于 4m 两个级别,对应的稳定度为 1.00 和 0.10。

1.3.2 评价指标标准化

生态环境的脆弱程度具有一定的模糊性,研究中采用模糊评价方法对定量指标进行标准化处理,分别计算指标的隶属度^[20]。由于各因素对生态环境脆弱性特征影响不同,计算中采用戒下型、戒上型两种函数。

表 1 垦利县生态环境区域适应性指标

指标 Index *	1986	1990	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
人均 GDP(yuan) GDP per capita	950.80	1027.00	2280.00	3149.50	4251.20	6507.60	7149.70	8285.70	7393.70	8577.00	10056.00	12112.00	15919.00
非农业社会总产值(yuan) Total Non-agricultural product of society	471.48	840.00	1434.80	1434.40	2043.90	2755.60	2780.60	5035.50	4613.10	3632.10	6024.90	5567.70	7457.10
人均耕地(hm ²) Arable Land per capita	0.242	0.236	0.242	0.243	0.241	0.236	0.234	0.242	0.244	0.245	0.284	0.248	0.290
人口密度(人/km ²) Population density	93.57	98.05	96.70	95.98	94.83	94.32	94.55	95.28	95.73	95.91	96.18	96.23	96.36
每万人大学生数(人) Undergraduate per ten thousand	4.61	7.55	14.17	10.91	10.43	7.35	10.31	10.18	14.02	12.83	17.87	29.88	30.83
农民人均收入(yuan) Income per farmer	359.00	457.00	592.00	775.00	1212.00	1525.00	2067.00	2075.00	2403.00	2478.00	2591.00	2800.00	2981.00
有效灌溉面积比率(%) Available irrigate area rate	28.60	45.05	50.26	62.76	74.90	65.91	73.20	65.81	72.28	63.89	56.76	52.47	54.62
排涝体系面积比例(%) Drainage system area rate	12.88	27.91	30.33	30.23	27.36	25.60	27.94	29.43	29.42	29.39	29.43	29.01	29.11
农田防护林密度(km·km ⁻²) farmland shelter-forest density	3.91	3.54	3.59	3.6	5.5	5.59	5.59	5.59	5.59	5.59	5.59	6.2	6.2
水污染治理达标率(%) Water pollution amelioration rate	35.20	38.24	56.31	96.00	85.69	77.17	59.17	86.56	90.32	47.70	100.00	100.00	95.40
工业废气烟尘达标率(%) Industry exhaust gas and soot amelioration rate	84.00	94.47	90.67	90.67	90.67	79.19	99.71	78.22	97.76	75.93	83.41	100.00	100.00
退耕还林还草比例(%) Conversion rate of farmland to forestland or grassland	1.27	2.79	-2.23	-2.11	-13.75	6.88	-0.08	2.52	0.01	0.01	0.05	0.11	0.40
盐碱地治理比例(%) saline-alkali soil amelioration rate	2.88	2.93	3.11	3.24	3.91	4.19	6.26	6.56	7.54	8.19	8.25	8.90	9.06
化肥农药增长率(%) pesticide and fertilization application increasing rate	4.10	22.45	25.00	6.67	31.25	-14.29	5.56	36.84	0.00	19.23	23.81	-15.38	9.09

* 下同 the same below

表 2 地貌稳定性分级表
Table 2 Grades of physiognomy stability

地貌类型 Physiognomy	河滩高地 River upland	缓岗 Slow hill	微斜平地 Plain	洼地 Wash	海滩地 Beach
脆弱程度 Vulnerability	1.00	0.80	0.60	0.40	0.20

表 3 土壤质地稳定性分级表
Table 3 Grades of soil texture stability

土壤质地 Soil texture	砂壤 Sandy loam	轻壤 Light loam	中壤 Loam	重壤 Loamy clay	粘土 Clay loam
脆弱程度 Vulnerability	0.20	0.30	0.40	0.85	1.00

适宜采用戒下型隶属度函数的指标包括人口密度、化肥农药增长率、土壤有机质含量、地表水面积比例、重要生境占地率和林草覆盖率,其函数公式为:

$$f_1 = \begin{cases} 0.1 & x \geq x_2 \\ 0.9(x_2 - x)/(x_2 - x_1) + 0.1 & x_1 < x < x_2 \\ 1 & x \leq x_1 \end{cases}$$

除以上两类指标外,其他指标采用戒上型函数,其函数公式为:

$$f_2 = \begin{cases} 0.1 & x \leq x_1 \\ 0.9(x - x_1)/(x_2 - x_1) + 0.1 & x_1 < x < x_2 \\ 1 & x \geq x_2 \end{cases}$$

公式 f 代表评价隶属度, x 代表评价因素实际分值。由于各项指标缺乏统一标准,因此在确定隶属度转折点 x_1 和 x_2 比较困难,研究中把每项指标的最小值和最大值分别作为 x_1 和 x_2 。

1.3.3 评价指标权重确定

指标权重反映了评价指标对生态环境脆弱性的影响程度。本研究采用层次分析法确定适应性指标权重,专家打分法确定稳定性指标与敏感性指标权重,结果见表4~表6。

表 4 生态环境稳定性指标的权重
Table 4 Weights of environment stability indexes

指标 Index	地貌类型 Physiognomy	海拔高度 Altitude	土壤质地 Soil texture
权重 Weight	0.4	0.25	0.35

表 5 生态环境敏感性指标的权重
Table 5 Weights of environment sensitivity indexes

指标 Index	地表水面积比例 Surface water proportion	土壤有机质含量 Soil organic content	重要生境占地率 Key habitat occupied footage ratio	林草覆盖率 Vegetation coverage ration	盐碱地比例 Saline-alkali soil rate	中低产田比例 Low and middle yield field rate	草场退化比例 Degraded grass farm soils rate
权重 Weight	0.1	0.1	0.1	0.15	0.3	0.1	0.15

1.4 生态环境脆弱性评价模型

根据各评价指标隶属度和权重,采用综合指数法计算生态环境稳定性指数、敏感性指数和适应性指数,用3个分指数的算数平均数作为生态环境脆弱性指数:

$$sta = \sum_{q=1}^3 v_q \times w_q \tag{1}$$

$$v_q = \sum_{i=1}^j v_i \times \frac{S_i}{S_{\text{总}}} \tag{2}$$

式中, sta 表示生态环境稳定性综合指数; v_q 和 w_q 分别为第 q 个单项稳定性指标的区域综合隶属度和综合

表 6 生态环境适应性指标的权重
Table 6 Weights of environment adaptability indexes

一级指标 First grade index	权重 Weight	二级指标 Second grade index	权重 Weight	综合权重 Integrate weight
社会经济因素 Society and economy factor	0.2	人均 GDP(n_1)	0.16	0.032
		非农业社会总产值比重(n_2)	0.23	0.046
		人均耕地(n_3)	0.22	0.044
		人口密度(n_4)	0.24	0.048
		每万人大学生数(n_5)	0.15	0.03
农业生产条件因素 Agricultural produce condition factor	0.37	农民人均收入(n_6)	0.11	0.0407
		有效灌溉面积比率(n_7)	0.25	0.0925
		排涝体系面积比例(n_8)	0.34	0.1258
		农田防护林密度(n_9)	0.3	0.111
环境治理因素 Environment amelioration factor	0.43	水污染治理达标率(n_{10})	0.15	0.0645
		工业废气烟尘达标率(n_{11})	0.12	0.0516
		退耕还林还草比例(n_{12})	0.2	0.086
		盐碱地治理比例(n_{13})	0.35	0.1505
		化肥农药增长率(n_{14})	0.18	0.0774

权重; i 表示该指标的不同类型, j 表示该指标的类型数; v_i 、 s_i 分别表示该指标第 i 个类型的隶属度和在区域中所占的面积, $S_{\text{总}}$ 为区域总面积。

$$sen = \sum_{i=1}^7 v_i \times w_i \tag{3}$$

$$ada = \sum_{j=1}^{14} v_j \times w_j \tag{4}$$

式中, sen 表示生态环境敏感性综合指数; v_i 和 w_i 分别为第 i 个敏感性指标的隶属度和权重。 ada 表示生态环境适应性综合指数; v_j 和 w_j 分别为第 j 个适应性指标的隶属度和权重:

$$Evi = (1 - sta + sen + 1 - ada) / 3 \tag{5}$$

式中, Evi 表示生态环境脆弱性综合指数,取值为 $[0,1]$,其值越大,表明区域生态环境越脆弱。具体采用等间距法划分为 5 个等级,即:不脆弱 $0 \leq ESSI < 0.2$;轻度脆弱 $0.2 \leq ESSI < 0.4$;中度脆弱 $0.4 \leq ESSI < 0.6$;重度脆弱 $0.6 \leq ESSI < 0.8$;极脆弱 $0.8 \leq ESSI < 1.0$ 。

2 结果及分析

2.1 生态环境稳定性评价结果及分析

将各指标的隶属度代入式(2),计算得各评价指标的区域综合稳定隶属度(表 7),将各指标综合稳定隶属度和综合权重代入式(1),计算得垦利县生态环境稳定性综合指数为 0.41,研究中采用模糊数学评价进一步确定垦利县的生态环境稳定性程度。

表 7 垦利县生态环境稳定度评价
Table 7 The environmental stability value of Kenli County

指标 Index	综合稳定隶属度 Integrate stability subjection	非常稳定 The most stable	较稳定 More stable	稳定 Stable	不稳定 Unstable	较不稳定 More unstable	非常不稳定 The most unstable
地貌类型 Physiognomy	0.41	0	0	0	1	0	0
海拔高度 Altitude	0.58	0	0	0	1	0	0
土壤质地 Soil texture	0.30	0	0	0	0	1	0

(1) 稳定性级别的划分

将生态环境的稳定程度分为 6 个等级:非常稳定、较稳定、稳定、不稳定、较不稳定和非常不稳定。

(2) 区域稳定度综合评价

将由各稳定性指标权重组成的权重矩阵以及由区域综合稳定隶属度组成的稳定性评价矩阵相乘,得到垦利县区域稳定度矩阵为(0,0,0,0.65,0.35,0)。按最大隶属原则,垦利县生态环境稳定性综合评价结果为“不稳定”。

2.2 生态环境敏感性、适应性及脆弱性评价结果及分析

2.2.1 评价结果

据式(3)~式(5),分别计算各年度生态环境敏感性指数、适应性指数和生态环境脆弱性指数,结果如图 1。

由计算结果得出垦利县生态环境敏感度有明显波动,变化范围为 0.47~0.81。敏感度 > 0.5 的年份(1986~2001 年)占年份总数的 84.6%,2002 年和 2003 年的敏感度也仅是略低于 0.5,说明垦利县生态环境敏感度较高。另外,从图 1 看出,垦利县生态环境敏感度从 1990 年开始先是升高,到 1995 年达到最高值,年均增幅达 16.7%,之后的 3a 时间里又大幅下降,年均降幅达 19.6%。从 1998 年到 2003 年,生态环境敏感度变化较为平稳。敏感度的这一变化特点说明垦利县生态环境在 1995 年遭受了较大的影响。调查发现,研究区 1995 年发生了一场强大的风暴潮,淹没了 2600hm² 土地,对生态环境造成了很大影响,由此造成生态环境脆弱度的急剧变化。但此后研究区生态环境敏感度总体呈下降趋势。

垦利县生态环境适应度范围为 0.33~0.77,均值为 0.5,年均变化幅度为 0.04,生态环境适应度变化平缓没有明显的峰值出现,说明没有出现大的生态环境决策扰动。适应度在 0.5 以上的年份(1997~2003 年)占总数的 53.8%,说明垦利县生态环境适应性一般。对垦利县生态环境脆弱度变化时序进行回归分析,得回归方程式: $y = 0.035x - 69.875$ (通过显著性检验, $R^2 = 0.94$),区域适应度总体呈上升趋势,说明当地人们抵抗环境变化的能力在逐步提高,区域环保意识在逐渐增强。

垦利县生态环境脆弱度等级从 1986 年至 1996 年皆为重度脆弱,其余年份为中度脆弱。对垦利县生态环境脆弱性变化时序进行回归分析,可得回归方程式: $y = -0.015x + 30.66$ (通过显著性检验, $R^2 = 0.83$)。总的看来,垦利县生态环境脆弱度在评价时段内总体呈由高向低的发展趋势,说明该区域生态环境建设已初见成效,但目前生态环境仍处于中度脆弱状态,不容乐观,因此,找出敏感性因子和主要限制因素,制定科学合理的生态环境治理策略,对于继续改善区域生态环境脆弱性状况,实现区域可持续发展有着重要的现实意义。

2.2.2 生态环境敏感性因子分析

为进一步探明研究区生态环境敏感性发展变化的动因及其对外界环境因素的响应,本文采用偏相关分析方法对垦利县生态环境自然因子进行分析。考虑到水分和盐分是制约垦利县生态环境质量的主要因子,重点对与此关系最密切的气温、蒸降比、地下水埋深、地下水矿化度等 4 项指标,按前述模糊评价方法进行标准化处理,运用偏相关分析方法对脆弱性演变对外界环境变化的响应程度进行定量分析,得到垦利县生态环境自然因子的敏感性排序结果为:地下水埋深(0.65*) > 蒸降比(0.59) > 地下水矿化度(0.52) > 气温(0.08),地下水埋深对外界环境的变化敏感程度最高,对脆弱性影响达到显著水平,其次是蒸降比和地下水矿化度,相关性也比较大,气温变化对生态环境脆弱性的影响程度最低。地下水埋深、蒸降比和地下水矿化度是研究区生态环境的敏感性因子。在此基础上,可通过这些指标的定期监测快速掌握生态环境脆弱性的发展态势,同时

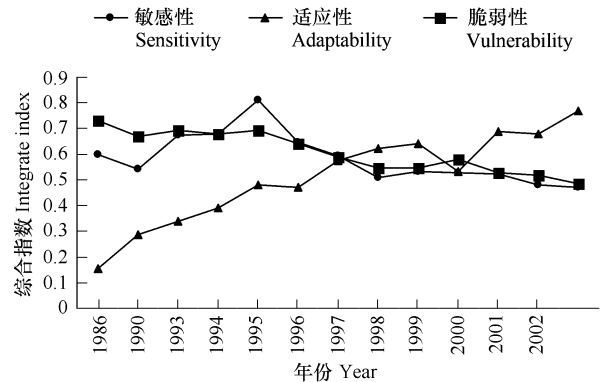


图 1 垦利县生态环境敏感性、适应性和脆弱性变化曲线

Fig. 1 The environment sensitivity, adaptability and vulnerability curves of Kenli County

可在生态环境建设中采取相应措施降低环境脆弱性。

2.2.3 生态环境适应性的障碍因素分析

为给垦利县生态环境调控和治理提供数据支撑,需进一步确定垦利县生态环境适应性的障碍因素。参考相关文献^[20],生态环境适应性障碍度的计算公式如下:

$$A_i = w_i s_i / \sum_{i=1}^{14} w_i S_i \tag{6}$$

式中,障碍度 A_i 是单项适应性指标对脆弱性的影响度; w_i 为单项适应性指标权重值; s_i 为单项适应性指标的隶属度。

绘制各年份各指标障碍度散点图,根据障碍度集聚状况,确定障碍度 $A_i > 0.1$ 为划分各年度障碍因素标准,各年份障碍因素及出现的频率见表 8。

表 8 各年份障碍因素及出现的频率
Table 8 Obstacle factors and their frequency in each year of Kenli County

障碍因素 Obstacle factor	年份 Year													出现频率(%) Emergence frequency
	1986	1990	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	
n_7	0.12	0.11												15.38
n_8	0.16													7.69
n_9					0.11	0.16	0.17	0.18						30.77
n_{11}												0.13		7.69
n_{12}									0.17					7.69
n_{13}	0.20	0.23	0.24	0.25	0.25	0.21	0.22	0.23	0.25	0.23	0.18	0.19	0.13	100
n_{14}										0.13	0.11		0.15	23.08

n_7 : 有效灌溉面积比率 Available irrigate area rate; n_8 : 排涝体系面积比例 Drainage system area rate; n_9 : 农田防护林密度 Farmland shelter-forest density; n_{11} : 工业废气烟尘达标率 Industry exhaust gas and soot amelioration rate; n_{12} : 退耕还林还草比例 Conversion rate of farmland to forestland or grassland; n_{13} : 盐碱地治理比例 Saline-alkali soil amelioration rate; n_{14} : 化肥农药增长率 Pesticide and fertilization application increasing rate

由表 8 可以看出,在 1986 ~ 2003 年期间,盐碱地治理比例(n_{13})始终是第一障碍因素,说明垦利县盐碱地面积大一直是困扰当地的最严重环境问题,提高盐碱地治理率是降低生态环境脆弱性的最有效措施;农田防护林密度(n_9)的限制集中出现在 1995 ~ 1998 年之间,也是该区生态环境的主要障碍因素,应作为生态环境脆弱性监测的重要指标;化肥农药增长率(n_{14})自 2000 年以后成为主要障碍因素,说明化肥农药的施用量过高,已对环境产生负面影响,今后应严格控制化肥和农药的施用量以降低生态环境脆弱度。有效灌溉面积比率(n_7)和排涝体系面积比例(n_8)的限制在 1990 年之前出现,以后年份没有构成障碍,这与当地兴修水利工程有关。统计资料显示,垦利县于 1993 年建成大、中型水库 108 座,截至 2003 年共有水库 221 座,扩大和改善灌溉面积 24 万亩,使当地生态环境脆弱性的适应力得到显著提高。工业废气烟尘达标率(n_{11})和退耕还林还草比例(n_{12})出现的频率较低,对生态环境脆弱性的影响较小。

3 结论与讨论

(1)本研究有别于目前国内外关于生态环境脆弱性评价模型研究的显著之处在于:一方面,评价尺度定位于中国最基本区域单元——县域,研究的实践性和针对性较强,计算结果有较明显的社会经济和政策指导意义。另一方面,本文提出的基于生态环境脆弱性三大属性的评价方法以及基于时间序列的动态分析研究,不仅能够反映某时间点上区域生态环境脆弱性状态,还能够揭示其发展变化趋势,对生态环境脆弱性预警具有积极意义,为县域生态环境脆弱性的定量和动态研究提供了有效方法,是对当前生态环境脆弱性评价的有益补充。

(2)以位于黄河三角洲河口地区的垦利县为实验区,利用本文所建立的区域生态环境脆弱性评价指标体

系和计算模型,对垦利县的区域稳定性进行判定,对生态环境敏感性、区域适应性以及脆弱性进行动态分析和趋势研究,结果表明:垦利县生态环境的稳定性状况为“不稳定”;生态环境敏感性程度总体较高,但自 1995 年达峰值后呈下降趋势;生态环境适应性呈上升趋势,在这两个趋势影响下的脆弱性也呈明显的降低趋势,这说明了该区域经济增长与环境之间较为协调,生态环境建设已见成效,生态环境脆弱性状况在逐渐改善。但由于该区域生态环境的不稳定和高敏感性而形成的高本底脆弱性,致使当前该区域生态环境脆弱性仍处于脆弱状态,因此,制定合理的生态环境保护 and 治理策略,推动生态环境脆弱性状况的持续好转,其任务仍然艰巨。评价结果能多角度、全面地反映特定区域生态环境脆弱性的综合状况,证明了该评价方法的可行性和适宜性。

(3)20 世纪 80 年代中期到 90 年代中期,土壤盐碱化和草场退化等生态问题严重,社会经济生产非常落后,该区域生态环境脆弱度较高,90 年代中期以后,垦利县加大农田水利基础设施建设力度,大力改善农业生产条件,改造大面积中低产田和荒碱地,推动农业结构调整,大力发展高效生态农业,区域适应力大幅提高,有效改善了区域生态环境状况,因此,有效灌溉面积比率、排涝体系面积比例和农田防护林密度在 1998 年之后不再是该区生态环境脆弱性的限制因子;但地下水埋深、蒸降比和地下水矿化度为垦利县生态环境敏感性因子,并且从 1986 至 2003 年,盐碱地治理比例始终是研究区生态环境第一障碍因素,这说明土壤盐碱化仍是今后垦利县主要的生态问题。而化肥和农药的不合理施用自 2000 年以后对生态环境脆弱性造成威胁,因此继续坚持盐碱地改良,引导合理施用农民化肥、农药,发展生态农业是降低该县生态环境脆弱度的有效途径。

References:

- [1] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, (4): 1—23.
- [2] Williams L R, Kaputka L A. Ecosystem vulnerability: a complex interface with technical components. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2000, 19(2): 1055—1058.
- [3] Tixier A, Dandrieux G, Dusserre R. Environmental vulnerability assessment in the vicinity of an industrial site in the frame of ARAMIS European project. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 13 (7): 251—264.
- [4] Kvarner J, Swensen G, Erikstad L. Assessing environmental vulnerability in EIA—the content and context of the vulnerability concept in an alternative approach to standard EIA procedure. *Environmental Impact Assessment*, 2006, 26(3): 511—527.
- [5] Weslawski J M, J Wiktor, Zajaczkowski M, Futsaeter G, Moe K A. Vulnerability assessment of Svalbard intertidal zone for oil spills. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 1997, 44: 33—41.
- [6] Loague K. Regional-scale groundwater vulnerability estimates—impact of reducing data uncertainties for assessments in Hawaii. *Ground Water*, 1994, 32(4): 605—616.
- [7] Hughes P, Brundrit G B. An index to assess South Africa vulnerability to sea-level rise. *South African Journal of Science*, 1992, 88(6): 308—311.
- [8] Elrich P R, Elrich A H. *Healing the planet*. New York: Addison-Wesley Publishing Company, 1991.
- [9] Villa F, McLeod H. Environmental vulnerability indicators for environmental planning and decision-making: guidelines and applications. *Environmental Management*, 2002, 29(3): 335—348.
- [10] Wang S Y, Liu J S, Yang C J. Eco-environmental vulnerability evaluation in the Yellow River Basin, China. *Pedosphere*, 2008, 18(2): 171—182.
- [11] Shen Y C. the pilot studies of Chinese vulnerable environment division. In: Zhao G J ed. *Comprehensive environment improvement and the recovering technology study*. Beijing Science & Technology Press, 1995.
- [12] Zhao Y L, Zhang L J. Study on method of quantitative assessment of fragile environment. *Scientia Geographica Sinica*, 1998(1): 73—78.
- [13] Liu Y H. the division and indexes of Chinese vulnerable environment. In: Zhao G J ed. *Comprehensive environment improvement and the recovering technology study*. Beijing Science & Technology Press, 1995. 8—17.
- [14] Shi D M, Liang Y. Evaluation and conservation of fragile ecological environment in China. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 1(16): 6—10.
- [15] Ran S H, Jin J J, Xue J Y. Assessment of vulnerable ecological regions: theory and methodology. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(1): 117—122.
- [16] Lü C H. analysis the typical vulnerable environment of our country. In: Zhao G J ed. *Comprehensive environment improvement and the recovering technology study*. Beijing Science & Technology Press, 1993. 43—53.

- [17] Wang Z H, Zhang P Y, Liu X L, On the ecological sensitive zone in china. *Acta Ecologica Sinica*, 1995, 15(3):320—326.
- [18] Xue J Y. the sensitivity assessment method of the vulnerable environment. In: Zhao G J ed. *Comprehensive environment improvement and the recovering technology study*. Beijing Science & Technology Press, 1995. 19—24.
- [19] Yuan P, Xu B, Zhang L J. Dynamic study on assessments of county's sustainable development based on ecological footprint model: a case study of Aluke'rqin Banner of Inner Mongolia Autonomous Region. *Scientia Agricultural Sinica*, 2007, 40(4):773—781.
- [20] Li X J, Liu N, Tian S F. Evaluation and countermeasure of sustainable land use of Kenli County in Yellow River Delta. *Journal of Safety and Environment*, 2005, 5(6):91—95.

参考文献:

- [11] 申元村. 中国脆弱环境区划的初步研究. 见:赵桂久主编. *生态环境综合整治与恢复技术研究*. 北京:北京科学技术出版社, 1995. 69 ~ 76.
- [12] 赵跃龙, 张玲娟. 脆弱生态环境定量评价方法的研究. *地理科学*, 1998(1):73 ~ 78.
- [13] 刘燕华. 中国脆弱环境划分与指标. 见:赵桂久主编. *生态环境综合整治和恢复技术研究*. 北京:北京科学技术出版社, 1995. 8 ~ 17.
- [14] 史德明, 梁音. 我国脆弱生态环境的评估与保护. *水土保持学报*, 2002, 1(16):6 ~ 10.
- [15] 冉圣宏, 金建君, 薛纪渝. 脆弱生态区评价的理论与方法. *自然资源学报*, 2002, 17(1):117 ~ 122.
- [16] 吕昌河. 我国典型脆弱生态类型浅析. 见:赵桂久主编. *生态环境综合整治和恢复技术研究*. 北京:北京科学技术出版社, 1993. 43 ~ 53.
- [17] 王铮, 张丕远, 刘啸雷, 等. 中国生态环境过渡的一个重要地带. *生态学报*, 1995, 15(3):320 ~ 326.
- [18] 薛纪渝. 脆弱环境敏感性评价方法探讨. 见:赵桂久主编. *生态环境综合整治与恢复技术研究*. 北京:北京科学技术出版社, 1995. 19 ~ 24.
- [19] 袁平, 徐斌, 章力建. 可持续发展评价中的生态足迹动态研究——以内蒙古阿鲁科尔沁旗为例. *中国农业科学*, 2007, 40(4):773 ~ 781.
- [20] 李新举, 刘宁, 田素锋等. 黄河三角洲垦利县可持续土地利用评价及对策研究. *安全与环境学报*, 2005, 5(6):91 ~ 95.