

闽东滨海湿地生态脆弱性动态评价

游巍斌¹, 何东进¹, 林立¹, 王 韧², 蔡金标³, 王 鹏⁴, 张中瑞¹, 肖石红¹, 郑晓燕¹

(1. 福建农林大学林学院, 福建 福州 350002; 2. 福鼎市林业局, 福建 福鼎 355200;

3. 霞浦县林业局, 福建 霞浦 355100; 4. 宁德市林业局, 福建 宁德 352100)

摘要: 运用逻辑斯蒂模型定量评价了2001年和2010年2个时期闽东滨海湿地生态脆弱性的动态变化。结果表明:2001年和2010年闽东滨海湿地生态脆弱性综合评价指数(V)分别为0.5384和0.5374,均处中度脆弱水平;景观结构还算完整,但自然状态活力衰退,功能水平有一定退化,对外界干扰的恢复力减弱;尽管1993-2001年和1993-2010年期间各单因子指标变化方向和程度各异,但总体而言这2个时期湿地综合生态脆弱性变化程度较小。

关键词: 滨海湿地; 生态脆弱性; 动态评价; 闽东

中图分类号: Q149; P964

文献标识码: A

文章编号: 1671-5470(2013)06-0648-06

Dynamic assessment on ecological vulnerability of coastal wetlands in eastern Fujian Province

YOU Wei-bin¹, HE Dong-jin¹, LIN Li¹, WANG Ren², CAI Jin-biao³, WANG Peng⁴,

ZHANG Zhong-rui¹, XIAO Shi-hong¹, ZHENG Xiao-yan¹

(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China; 2. Forestry

Bureau of Fuding, Fuding, Fujian 355200, China; 3. Forestry Bureau of Xiapu, Xiapu, Fujian

355100, China; 4. Forestry Bureau of Ningde, Ningde, Fujian 352100, China)

Abstract: The coastal wetland ecological vulnerability of eastern Fujian Province in two periods (2001 and 2010) was evaluated dynamically by using logistic model. The result showed that ecological vulnerability indices in 2001 and 2010 were respectively 0.5384 and 0.5374, which was at the level of moderate ecological vulnerability. It indicated that landscape structure in the area was relatively complete, but nature status was influenced in some extent, whose vigor and function had a certain degradation, and the restoring ability to resist interference was weakened. Although single factor indices varied in different directions and degrees during the periods of 1993-2001 and 1993-2010, there still existed a small change of ecological vulnerability in two periods.

Key words: coastal wetland; ecological vulnerability; dynamic assessment; eastern Fujian Province

湿地、森林、海洋并称为全球三大生态系统,它们在净化环境、调蓄洪水、抵御自然灾害、保护生物多样性、稳定海岸等方面发挥着重要作用^[1]。然而,全球人口的爆炸式增长、快速城市化和工农业经济发展导致的盲目开垦、污染排放等人类行为给湿地生态系统健康造成巨大压力,湿地退化问题愈发严重,探索湿地保护理论和方法已成为人类可持续发展的重大课题^[2]。其中湿地生态脆弱性问题更是当前国际湿地科学研究前沿领域关键问题之一。滨海湿地处于海陆生态系统频繁相互作用的边缘地带,是典型的脆弱生态系统或生态敏感区;城市边缘带上的湿地生态系统受城市化、工业化等人为干扰或破坏,生态系统脆弱性问题尤为突出,滨海湿地生态脆弱性的评价成为备受关注的研究热点^[3-6]。湿地脆弱性是指在自然环境和人为压力下湿地退化的程度和可能性^[7]。湿地脆弱性的定量评价是湿地脆弱性研究的核心。通过分析湿地生态脆弱性的特征及其影响因子评价湿地生态系统的生态脆弱性^[6,8-13],多属于静态评价。对滨海湿地生态系统脆弱性动态评价研究鲜见报道。

闽东地区兼具山地与滨海资源特色,且为我国秋茄红树林天然分布的北缘区,滨海湿地生态环境状况特殊而复杂。在人类城市化过程以及台风、风暴潮等诸多自然灾害的共同作用下,闽东天然湿地面积不断

收稿日期:2013-01-06 修回日期:2013-06-22

基金项目:福建省科技厅重点资助项目(2009N0009);国家自然科学基金资助项目(41301203、30870435、31370624);教育部博士学科点专项基金资助项目(20133515120007、20103515110005);福建省自然科学基金资助项目(2011J01071、2008J0116)。

作者简介:游巍斌(1984-),男,讲师,博士,研究方向:景观生态学与森林生态学。Email:youweibin@163.com。通讯作者何东进(1969-),男,教授,博士生导师,研究方向:森林生态学与景观生态学。Email:fjhdj1009@126.com。

萎缩, 污染加剧, 湿地退化问题日趋严重, 滨海湿地生态系统日渐脆弱^[14-16]。因此, 通过构建闽东滨海湿地生态系统脆弱性评价体系, 对研究区 2001、2010 年生态系统脆弱性开展动态评价, 以为闽东滨海湿地的保护、恢复与重建提供科学依据。

1 研究区概况

福建省闽东(宁德市)位于福建省东北部,南连省会福州,北接浙江温州,西邻武夷名山,东与台湾岛隔海相望。土地面积 1.34 万 km²,地形特点为丘陵山地和沿海小平原,年平均气温 13.4 - 20.2 °C,年平均降雨量 1250 - 2350 mm,无霜期 235 - 300 d。东临台湾海峡,海岸线长 878 km,占全省海岸线总长的 28.35%;海域面积 4.45 万 km²,占全省海洋渔场总面积的 35.63%,区域内有岛、礁、沙、滩、岬角、水道、河口共 1215 个,滨海湿地资源丰富,水产丰饶,拥有海洋生物 600 多种。近年来,闽东滨海城市快速发展,大型工程修建和其他人为活动正急剧地改变着原始的湿地景观,使得滨海湿地生态系统脆弱性不断增大。

2 研究方法

2.1 滨海湿地分类体系的建立

基于对闽东滨海湿地资料的收集与湿地勘察,将 1993、2001 和 2010 年 3 个时期闽东沿海湿地的 TM 和 ETM 图像进行几何校正、图片配准,再结合研究区 1:10000 地形图和实地考察资料,对遥感图像进行监督分类和人机交互解译。使用 ENVI 软件的主要和次要分析功能对解译完成的图像进行去除椒盐噪声等分类后处理,像元个数不足 16 个且明显少于周围湿地类型的类别归为周围湿地。处理完得到最终分类图像,1993 年、2001 年、2010 年的分类精度分别为 90.00%、90.12% 和 89.58%。闽东滨海湿地划分为自然湿地(水域、潮间裸滩)、人工湿地(农田、人工库塘、养殖场)、非湿地景观(建筑用地、其他非湿地景观)三大类和水域、潮间裸滩、农田、人工库塘、养殖场、建筑用地、其他非湿地景观 7 个子类^[14]。数据来源于 3 个时期闽东社会经济统计年鉴。

2.2 指标体系的建立

基于生态系统健康理论,采用由联合国合作开发署建立的“压力-状态-响应(PSR)”模型框架,对闽东滨海湿地生态系统的脆弱性进行评价。一般而言,生态脆弱性影响因子包括自然因素和人为因素两大类,自然因素主要包括气候、地形地貌、植被、土壤等;人为因素包括过度垦殖、采伐、放牧等生产活动和工农业污染等方面。基于指标选取的目的性、整体性、数据易获取性、代表性等基本原则^[17,18],利用 PSR 模型建立闽东滨海湿地生态脆弱性评价指标体系(表 1),采用层次分析法确定评价指标权重^[19]。

2.3 单项指标的计算

2.3.1 压力层指标 压力层主要描述生态系统所承受的压力大小,目前闽东滨海湿地生态系统的压力主要来源于人口增长和对自然湿地的开发,故从土地压力与人口压力两方面来反映湿地生态环境面临的压力^[22]。选取土地垦殖率作为土地压力的评价指标,该指标可以反映土地供人类生存所需的潜力。土地垦殖率与生态系统健康成负相关^[22],土地垦殖率 = 农用地面积 / 研究区总面积。选择人口密度和人口干扰指数作为人口压力指标。人类干扰度指数采用不同期间与人为干扰密切相关的景观类型(农田、人工库塘、养殖场、建筑用地)占研究区湿地总面积的比例来表示。

2.3.2 状态层指标 参考前人研究^[18,20],采用景观多样性、平均斑块面积、初级生产力、湿地平均弹性度和污染负荷指数表征湿地生态系统的现状。系统活力可由初级生产力反映,初级生产力用植被归一化指数(NDVI)度量。系统组织主要反映湿地生态系统的复杂性,选择景观多样性指数(H)和斑块平均面积指数(MPS)2个指标来度量。不同湿地景观类型的弹性指标计算公式表示如下:

$$ECO_{\max} = \sum_{i=1}^m (P_i \times B_i) \quad (1)$$

式中 ECO_{\max} 为各种景观类型的平均弹性度, P_i 为景观类型 i 所占的比例, m 为景观类型的数目, B_i 为第 i 类景观类型弹性度分值。 ECO_{\max} 越小,表明系统的生态弹性度越低,生态系统越脆弱。闽东滨海湿地不同景观类型生态弹性度赋值^[21]如下:水域 0.8,潮间裸滩 0.6,养殖场 0.4,建筑用地 0.3,农田 0.5,人工库

塘 0.3 其他非湿地类型景观 0.7.

采用自然湿地蓄水量和污染负荷指数 2 个指标表征湿地生态服务功能. 自然湿地面积包括水域和潮间裸滩两部分. 污染负荷指数是以海湾的重金属 Pb 含量来反映湿地净化水质的能力^[16 21]. 当某地区污染物越多, 污染负荷指数越大, 则湿地净化污染物数量愈少, 保持水质能力愈差.

表 1 闽东滨海湿地生态脆弱性评价指标体系

Table 1 Evaluation index system for coastal wetland ecological vulnerability in eastern Fujian Province

项目层	因素层	指标层	指标权重	测度指标来源和获取方式
压力 P	土地压力	土地垦殖率	0.150	景观指数计算
		人口压力	0.075	统计年鉴
		人类干扰度	0.075	景观指数计算
状态 S	活力	初级生产力	0.120	TM 遥感影像波段
	组织	景观多样性指数	0.090	景观指数计算
		平均斑块面积	0.090	景观指数计算
	弹性	湿地平均弹性度	0.090	实地监测和湿地数据计算
	服务	地表蓄水量	0.090	湿地景观面积数据
		污染负荷	0.120	相关文献
响应 R	自然系统响应	湿地面积变化比例	0.050	景观指数计算
	人类系统响应	人均 GDP	0.050	统计年鉴

2.3.3 响应层指标 将湿地生态系统响应层分为自然系统与人类系统两部分. 采用自然和人工湿地面积之和的变化反映自然对生态系统健康的响应. 考虑到在正常情况下相对恶劣的生态环境无法供给、维持一个良好的人类社会, 并且经济相对较弱, 因而采用人均 GDP 值来反映人类系统对生态系统变化的响应.

2.4 评价模型的建立

采用各单项指标因子和湿地生态脆弱性综合评估闽东滨海湿地生态脆弱性.

2.4.1 单因子评价模型 由于湿地生态系统并非一个平衡态的系统, 湿地内部各种反馈机制也不是单纯的线性关系, 而是在不断地与外界进行能量、物质交换的有序耗散结构, 因此, 简单的线性关系不能反映湿地生态系统中各方面和层次的状态. 这里选用逻辑斯蒂增长曲线模型来对各个单项指标进行评价^[20]. 该模型可表示为:

$$P = \frac{1}{1 + e^{(a - bR)}} \tag{2}$$

式中 P 表示单项指标的生态环境质量指数评价值(无量纲值); R 表示单项指标测度值(%).

对于常数 a 、 b , 采用以下方法确定: 当 $R = 0.01$ 时, P 值近似为 0.001; 当 $R = 0.99$ 时, P 值近似为 0.999. 则此时方程中的 a 、 b 分别为 4.595 和 9.19. 鉴于指标变化对生态脆弱性影响一致性问题, 评价指标量值增加与生态系统健康的增加方向相同时的单项指标计算公式为:

$$P = \frac{1}{1 + e^{(4.595 - 9.19R)}} \tag{3}$$

当评价指标量值增加与生态系统健康的增加方向相反时, 单项指标计算公式为:

$$P = 1 - \frac{1}{1 + e^{(4.595 - 9.19R)}} \tag{4}$$

式中, 各指标含义同式(2).

2.4.2 多因子综合评价模型 在各个单项指标值的基础上, 采用加权平均计算生态脆弱性综合评价指数, 其公式为:

$$V = \sum_{i=1}^b W_i \times P_i \tag{5}$$

式中: V 为湿地生态脆弱性综合评价指数; W_i 表示 i 个指标的权重值; P_i 表示第 i 个单项指标的评价值.

2.5 脆弱性等级划分

根据已有研究结果^[17 18 20 21]按照综合评价得分高低, 从高到低排序, 反映研究区的生态脆弱状况. 生态脆弱性程度分级和生态脆弱状态含义表示如下. (1) 一级($0 \leq V < 0.2$) , 潜在脆弱. 湿地景观结构完整,

状态自然,活力强,功能水平正常,恢复力很强。(2)二级($0.2 \leq V < 0.4$)轻度脆弱。湿地景观结构较完整,状态较自然,活力较强,功能水平正常,恢复力较强。(3)三级($0.4 \leq V < 0.6$)中度脆弱。湿地景观结构还算完整,自然状态已受一定影响,活力衰退,功能水平有一定退化,对外界干扰的恢复力减弱。(4)四级($0.6 \leq V < 0.8$)重度脆弱。湿地景观的结构破碎,自然状态受到极大破坏,活力很差,功能水平很大程度上退化,对外界干扰响应迅速。(5)五级($0.8 \leq V \leq 1.0$)极度脆弱。湿地景观的结构完全破碎,自然状态已经彻底破坏,功能水平极低,对外界干扰响应迅速。

3 结果与分析

3.1 闽东滨海湿地生态脆弱性单因子指标评价

当外界压力超过湿地生态系统所能承受范围时,便会对湿地生态系统的结构和功能造成损害,甚至导致湿地生态系统功能退化。闽东滨海湿地不同时期各指标值见表2,生态脆弱性单因子评价价值与测度值见表3。1993-2010年,闽东滨海湿地生态脆弱性各单因子指标变化趋势各异,土地垦殖率由3.66%上升至4.5%,上升了近0.9%;人口密度上升了0.89%;人类干扰面积由1993年占研究区面积的9.9%增至13.7%。景观多样性指数增加0.0240,表明近二十多年来闽东滨海湿地多样性程度有所提高。平均斑块面积由81.11 hm^2 增加至87.34 hm^2 。然而,湿地平均弹性度减少0.0133,地表蓄水量减少4.64%;污染负荷指数有所增加。1993-2010年人均GDP增长9.5倍的同时,湿地总面积减少了364.23 hm^2 ,这与人口和社会经济的发展带来的土地利用需求关系密切。

表2 不同时期闽东滨海湿地生态环境脆弱性评价指标值

Table 2 Assessment index value of ecological environment vulnerability in coastal wetland of eastern Fujian Province in different periods

年份	土地垦殖率 %	人口密度 人· km^{-2}	人类干扰度 %	NDVI	景观多样性 指数	平均斑块面积 hm^2
1993	0.03658	225	0.099	-3.4941	0.958	81.106
2001	0.03975	241	0.111	-3.6384	0.976	82.701
2010	0.04503	227	0.137	-3.5313	0.982	87.343
年份	湿地平均 弹性度	地表蓄水量 hm^2	污染负荷指数 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	湿地面积变化 hm^2	人均GDP 元	
1993	0.7256	179509.1	0.8159	204407.19	1928	
2001	0.7233	178526.4	0.8619	204543.32	7261	
2010	0.7123	171175.2	0.9212	204042.96	20174	

从项目层各指标变化来看,1993-2010年闽东滨海湿地压力普遍增加,土地垦殖率不断提高、人口密度增加,以及伴随而来的人类干扰强度增强是闽东滨海湿地生态系统压力的主要来源。闽东地区二十多年来共增加近34万人,从人口的地区分布上看,人口汇聚在沿海县。人口大量增加造成人类生存所需资源以及对环境条件的需求提高,对环境资源索取能力提高与生产生活相关的人为干扰活动(滩涂养殖、围垦养殖、围海造陆等)使得湿地生态系统面临较大压力,脆弱性程度提高。人类活动虽然小幅度提高了闽东滨海的景观多样性,但也导致自然湿地景观破碎度增大;平均斑块面积增大表明湿地生态系统有趋于集中分布的趋势。

一般而言,生态系统的弹性表征系统对外界干扰的抵抗能力,弹性越高,生态系统越稳定。闽东滨海湿地弹性度降低,表明湿地对外界干扰的抵抗能力逐渐下降。湿地蓄水量的降低和污染负荷指数的提高主要是由于研究区自然湿地逐渐向人工景观转移所致^[14]。

3.2 闽东滨海湿地生态脆弱性综合评价

基于湿地生态系统总体生态脆弱性,将闽东滨海湿地压力、活力、组织、弹性、服务、自然系统响应、人类系统响应等生态脆弱性单因子指标加权后得到研究区生态脆弱性综合评价指数(V)。如表3所示,2010年和2001年闽东滨海湿地的生态脆弱性综合评价指数(V)分别为0.5374和0.5384,均属中度脆弱等级。此等级湿地生态特征表现为:湿地景观结构还算完整,但自然状态已受一定影响,活力衰退,功能水平有一定退化,对外界干扰的恢复力减弱。进一步比较2个时期生态脆弱性综合评价指数可知,2001-2010年研究区生态脆弱性指数仅下降了0.001,脆弱性程度变化微小,说明此期间,虽然闽东滨海湿地压力层各

单因子指标均有所增加,而研究区脆弱性程度却略有下降,这也从一个侧面反映压力因素虽然是湿地脆弱性增大的重要因素,然而,湿地总体脆弱性程度还需综合考虑湿地系统固有结构所维持的状态及其相应的自然和人类响应因素.1993-2001年和1993-2010年各单因子指标变化方向和程度不同,而研究区综合脆弱性程度变化程度小,这可能是由于湿地生态系统非线性作用机制的存在,各单因子指标的线性变化经过湿地非线性系统内多重反馈机制综合作用所致.

表 3 闽东滨海湿地生态环境脆弱性评价结果¹⁾

Table 3 Assessment results of coastal wetland ecological vulnerability in eastern Fujian Province

测度值与单项指标评价值	土地垦殖率 %	人口密度 人·km ⁻²	人类干扰度 %	NDVI	景观多样性指数	平均斑块面积 hm ²
测度值 R ₁	0.0032	0.0711	0.0120	-0.1443	0.0180	0.0197
P _{i 2001}	0.9897	0.9810	0.9888	0.9973	0.0118	0.0120
测度值 R ₂	0.0085	0.0089	0.0380	-0.0372	0.0240	0.0769
P _{i 2010}	0.9892	0.9892	0.9859	0.9929	0.0124	0.0201
测度值与单项指标评价值	湿地平均弹性度	地表蓄水量 hm ²	污染负荷指数 mg·L ⁻¹	湿地面积变化 hm ²	人均 GDP 元	综合评价指数 V
测度值 R ₁	-0.0023	-0.0055	0.0460	0.0007	2.7661	-
P _{i 2001}	0.0098	0.0095	0.9848	0.0101	9 × 10 ⁻¹⁰	0.5384
测度值 R ₂	-0.0133	-0.0464	0.1053	-0.0018	9.4637	-
P _{i 2010}	0.0089	0.0066	0.9741	0.0098	0	0.5374

¹⁾ R₁ 为 1993-2001 年指标测度值; R₂ 为 1993-2010 年指标测度值; P_{i 2001} 为 1993-2001 年单项指标评价值; P_{i 2010} 为 1993-2010 年单项指标评价值.

4 小结与讨论

基于生态系统健康理论与景观生态学理论,运用逻辑斯蒂模型对闽东滨海湿地 2001 年和 2010 年 2 个时期湿地生态系统脆弱性进行了定量评价.结果表明:2001 年和 2010 年闽东滨海湿地生态系统生态脆弱性综合评价指数(V)分别为 0.5384 和 0.5374,均处中度脆弱水平,闽东滨海湿地景观结构还算完整,但自然状态已受一定影响,活力衰退,功能水平有一定退化,对外界干扰的恢复力减弱.1993-2010 年各指标测度值有所差异,但由于湿地生态系统非线性反馈机制的综合作用,此期间湿地脆弱性变化程度较小.

当前湿地生态系统脆弱性评价主要集中在关于“时点”的静态研究方面,这种基于脆弱性现状特征的静态评价,难以反映湿地脆弱性的动态变化趋势.为此,本文以 1993 年的湿地生态系统状态为基期(此时期闽东城市开发水平较低),通过评价 2001 年与 2010 年不同时期的脆弱性状态,以湿地脆弱性“时段”特征实现动态评估.“构建指标体系—确定评价单元—确定评价方法—划分湿地脆弱性等级—综合分析”湿地脆弱性评价程序基本得到认可和统一^[7],但由于研究资料、研究技术、评价对象的时空尺度性、湿地系统自身复杂性及自然和人文影响因素相互作用的复杂性,湿地评价中的不确定性普遍存在.这种不确定性问题在本文中主要表现在两方面.一方面,生态脆弱性等级采用等距划分,主观性较强;同一级别内的不同类别在评分的时候没有显示出区别而产生的不确定性,或不同级别的分界处的评分过分拉大也会产生不确定性.目前降低不确定性的方法有随机数学方法、模糊数学及灰色系统方法^[23],但现有的有限的零散湿地监测数据,使得上述方法受到一定限制.另一方面,在计算各单因子评价指标时,需要根据研究区的实际情况,确定测度值增量对生态系统脆弱性或健康程度的影响方向.如 1993-2010 年单位面积 NDVI 值上升了 1%,实地调查发现,这种上升主要是因为研究区原本裸露的潮间滩涂和浅海水域围垦成为农田.而对于滨海湿地生态系统而言,潮间裸滩的影响大于农田,故这种变化对闽东滨海湿稳定性的维持反而不利.同时,宁德的飞鸾、漳湾和霞浦等地,均有不同面积的互花米草入侵,导致 NDVI 值提高,然而,互花米草的生物入侵对于滨海湿地生态系统来说是极为不利的因素.因而,湿地脆弱性评价过程中,不论是指标体系构建还是评价模型计算都应保持对不确定性问题的关注,这也将是今后湿地脆弱性评价研究的难点和重要突破口.

参考文献

- [1] 崔保山, 杨志峰. 湿地生态系统健康评价指标体系 II. 方法与案例[J]. 生态学报, 2002, 22(8): 1231-1239.
- [2] 奚勇, 唐学玺, 王悠. 滨海湿地生态修复研究进展[J]. 海洋环境科学, 2012, 31(4): 616-620.
- [3] 刘世栋, 高峻. 旅游开发对上海滨海湿地植被的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(10): 2992-3000.
- [4] NHUAN M T, NGOC N T M, HUONG N Q, et al. Assessment of vietnam coastal wetland vulnerability for sustainable use (case study in Xuanthuy Ramsar Site, Vietnam) [J]. Journal of Wetlands Ecology, 2009, 2(1-2): 1-16.
- [5] MOSER S C, JEFFRESS WILLIAMS S, BOESCH D F. Wicked challenges at land's end: managing coastal vulnerability under climate change[J]. Annual Review of Environment and Resources, 2012, 37: 51-78.
- [6] 付博, 姜琦刚, 任春颖. 扎龙湿地生态脆弱性评价与分析[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(1): 49-52.
- [7] 摆万奇, 尚二萍. 湿地脆弱性评价研究进展[J]. 湿地科学, 2012, 10(3): 378-384.
- [8] 万忠娟, 于少鹏, 王海霞, 等. 松嫩平原典型湿地脆弱性分析与评价[J]. 东北师大学报: 自然科学版, 2003, 35(2): 93-99.
- [9] 陈久和. 城市边缘湿地生态环境脆弱性研究——以杭州西溪湿地为例[J]. 科技通报, 2003, 19(5): 395-398.
- [10] 郭跃东, 何岩, 邓伟, 等. 扎龙河滨湿地水系统脆弱性特征及影响因素分析[J]. 湿地科学, 2004, 2(1): 47-53.
- [11] 廖富强, 刘影, 叶慕亚, 等. 鄱阳湖典型湿地生态环境脆弱性评价及压力分析[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(1): 133-137.
- [12] 杨志荣, 吴次芳, 刘勇. 快速城市化地区湿地脆弱性评价——以杭州湾湿地为例[J]. 资源科学, 2009, 31(2): 243-249.
- [13] 刘振乾, 刘红玉, 吕宪国. 三江平原湿地生态脆弱性研究[J]. 应用生态学报, 2001, 12(2): 241-244.
- [14] 林立, 何东进, 王韧, 等. 闽东滨海湿地景观分类体系与格局特征[J]. 西南林学院学报, 2012, 32(2): 62-67.
- [15] 何东进, 郑开基, 王韧, 等. 闽东滨海湿地不同起源秋茄林重金属元素 Zn、Cd、Cu 的累积与分布特征比较[J]. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2012, 41(2): 187-192.
- [16] 何东进, 郑开基, 王韧, 等. 闽东湿地重金属污染特征与生态风险评价[J]. 武夷科学, 2009, 25: 44-49.
- [17] 左伟, 周慧珍, 王桥. 区域生态安全评价指标体系选取的概念框架研究[J]. 土壤, 2003, 35(1): 2-7.
- [18] 吴姗姗. 莱州湾南岸滨海湿地的景观格局变化及其生态脆弱性评价[D]. 济南: 山东师范大学, 2009.
- [19] 朱卫红, 郭艳丽, 孙鹏, 等. 图们江下游湿地生态系统健康评价[J]. 生态学报, 2012, 32(21): 6609-6618.
- [20] 李永建. 拉鲁湿地生态环境质量评价的景观生态学方法应用研究[D]. 成都: 四川大学, 2002.
- [21] 高吉喜. 可持续发展理论探索——生态承载力理论、方法与应用[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2001.
- [22] 黄方, 刘湘南, 张养贞. GIS 支持下的吉林省西部生态环境脆弱态势评价研究[J]. 地理科学, 2003, 23(1): 95-100.
- [23] 周建飞, 曾光明, 黄国和, 等. 基于不确定性的城市扩展用地生态适宜性评价[J]. 生态学报, 2007, 27(2): 774-782.

(责任编辑: 叶济蓉)