基于景观结构的福建省沿海生态风险时空特征

李月月，黄义雄，杨 阳，谢义坚，李 潇，叶功富，高 伟
（福建师范大学 地理科学学院，福建 福州 350007）

摘 要：[目的] 研究福建省沿海地区区域生态风险变化规律，为该区生态修复工作提供理论依据。[方法] 利用 ArcGIS 和 Fragstats 软件，基于土地利用变化的生态环境脆弱度和损失度构建景观生态风险评价模型，并利用地统计分析和空间自相关性分析方法，探究研究区生态风险分布特征及生态风险的空间相关性。[结果] 建设用地、林地和水域的面积呈上升趋势，灌丛、草地、耕地、滩涂和未利用地的面积均呈现出下降趋势，且碎化程度加深，分离度加大，而建设用地的破碎度和分离度逐渐下降，地域分布逐渐趋于集中；2000—2013 年的生态风险空间分布均大致呈带状分布，低、较低及中等生态风险等级的面积均有不同程度的增加，较高、高生态风险等级的面积均有不同程度的减小；研究区内生态风险指数在空间上具有较强的集聚效应，且生态风险指数空间分布均以高—高聚集和低—低聚集为主。[结论] 总体生态风险呈下降趋势，生态环境逐步好转，但景观生态问题依然很严峻，因此政府部门要在发展经济的同时注意当地的生态环境，实现经济与生态环境的协调发展。

关键词：生态风险；景观格局；时空变化；空间自相关
文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2018)04-0241-06 **中图分类号**：F301.2

文献参数：李月月，黄义雄，杨阳，等. 基于景观结构的福建省沿海生态风险时空特征[J]. 水土保持通报，2018，38(4)：241-246. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2018.04.039. Li Yueyue, Huang Yixiong, Yang Yang, et al. Temporal and spatial characteristics of coastal ecological risk in Fujian Province based on landscape structure[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(4): 241-246.

Temporal and Spatial Characteristics of Coastal Ecological Risk in Fujian Province Based on Landscape Structure

LI Yueyue, HUANG Yixiong, YANG Yang, XIE Yijian, LI Xiao, YE Gongfu, GAO Wei
(*College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian* 350000, *China*)

Abstract: [Objective] Studying the law of regional ecological risk changes in coastal areas in order to provide theoretical reference for ecological rehabilitation. [Methods] Taking the coastal area of Fujian Province as the research object, using geostatistical analysis and spatial auto-correlation analysis method with ArcGIS and Fragstats software, we constructed a landscape ecological risk assessment model based on the ecological environment vulnerability and loss degree of land use change. The distribution of ecological risk levels in the study area and the spatial correlation of ecological risks were analyzed. [Results] The areas of construction land, forest land, and water area all showed an upward trend, and the areas of shrubs, grassland, cultivated land, mudflats, and unused land all showed a downward trend, and the degree of fragmentation got worsened, the degree of separation was increased. The degrees of fragmentation and separation gradually decreased, and the geographical distribution gradually became concentrated. The spatial distribution of ecological risks in 2000—2013 was roughly in a banded pattern, and the areas at low, lower, and middle ecological risk levels all increased but with different increments. The areas at high and higher ecological risks both had been reduced to some extent. The ecological risk index in the study area had a strong agglomeration effect in space, and the spatial distribution of ecological risk indexes was mostly in high-high and low-low

收稿日期：2018-03-06 **修回日期**：2018-03-25
资助项目：福建省科技厅项目“木麻黄防护林防风固沙定位监测及生态服务价值评估”(DH-1383)
第一作者：李月月(1990—)，女(汉族)，河南省兰考县人，硕士研究生，研究方向为景观生态。E-mail：1152393226@qq.com。
通讯作者：黄义雄(1960—)，男(汉族)，福建省福州市人，研究员，主要从事景观生态方面的研究。E-mail：yxhuang@fjnu.edu.cn。

patterns. [Conclusion] The overall ecological risk showed a downward trend, and the ecological environment gradually improved. However, the landscape ecological problems are still severe. Therefore, the government departments must pay attention to the local ecological environment while developing economy, and realize the coordinated development of economy and ecological environment.

Keywords: ecological risk; landscape pattern; temporal and spatial variations; spatial auto-correlation

随着城市化的快速发展,生态环境在全球气候变化和人类活动的双重胁迫下,受到了极大的破坏和冲击,出现各种生态问题,如环境恶化、灾害加剧等,生态环境面临巨大挑战[1],生态风险问题成为各国学者关注的焦点[2]。生态风险是指一定区域内的生态系统及其组分受自然或人类活动威胁所承受的风险,以及对其健康、生产力、遗传结构、经济价值和美学价值产生的不利影响[3-4]。生态风险评价是对生态环境灾害发生的机率进行定量化地评估[5],现阶段的生态风险评价已进入区域生态风险评价阶段[6]。区域生态风险评价是生态风险评价的一个分支,它在区域尺度上反映和评价环境污染、自然或人类活动对区域内的生态系统结构和功能等产生不利作用的可能性以及危害程度[7]。区域风险问题是多种因素相互作用的结果,其作用时间及产生的后果也很难预[8]。景观具有空间异质性而景观本身也是人类活动的对象[13],因此景观尺度成为研究人类活动与生态环境的重要尺度[9-10]。景观的组分结构特征是最易于保存的景观信息,其变化直接影响区域生态系统功能[9]。景观结构还可以比较准确地显示各种生态影响的空间分布以及梯度变化,为各种空间分析手段提供可能[11]。在缺乏生态监测资料的历史积累时,很多学者根据景观结构及其动态变化特征来揭示综合性生态影响的程度和分布范围[12]。目前生态风险的研究重点主要集中在流域[13]、行政区[14]、城市地域[15],但对于沿海地区的生态风险评价研究比较少,因此,本文从区域景观结构的角度分析生态风险,综合评价沿海地区各种生态影响因子及其积累性结果。

福建省有我国第二长的海岸线,是我国改革开放的前沿地带也是经济发展最快的地区之一,土地利用类型变化剧烈,用地矛盾突出,景观结构发生明显变化,生态环境脆弱。本文以福建沿海 32 个县(区)为研究对象,从景观结构变化的角度来分析福建沿海景观的生态风险的动态变化,以更加深入地探究福建沿海生态风险的变化趋势。

1 研究区概况

福建介于 23°32′—28°19′N,115°51′—120°52′E,地处看中国东海之滨,东隔台湾海峡,与台湾省相望,是中国当前对外开放的重点地区和前沿地带。沿海地区属于亚热带海洋性季风气候,是台风、暴雨、风暴潮等自然灾害的多发区,年均降水量在 1 000～1 800 mm。地处浙闽沿海山地丘陵的东南和闽粤沿海丘陵的北部,地势总体是西北高,地貌类型复杂多样。福建省现有森林覆盖率为 63.1%,居全国第一,是南方的“绿色宝库”。科学合理分析沿海地区的生态风险,有利于区域生态环境的可持续发展,充分发挥对内对外辐射的作用,带动经济的发展。

2 研究方法

2.1 数据来源

以福建沿海 2000,2013 年两期的 Landsat TM 遥感影像为数据源(成像时间集中在 6—11 月,影像平均含云量低于 7%)。根据中国土地利用分类标准和研究区内不同时期的土地利用现状,在 ENVI 5.0 软件平台的支持下,对图像进行融合、校正、配准等图像预处理,用最大似然法进行监督分类,将研究区的景观类型划分为林地、灌丛、草地、耕地、滩涂、水域、建设用地和未利用地 8 类景观。根据分类结果将空间栅格数据矢量化,借助 ArcGIS 10.0 创建拓扑关系,最终生成空间信息与属性信息相结合的数据库,满足研究需要。

2.2 基于景观结构的景观生态风险指数构建

景观指数法是景观生态学中最常用的定量研究方法,通过单一指数或若干指数的结合,以其数值变化反映景观格局变化信息及其结构组成和空间配置,不同的景观类型具有不同的生态功能,抵抗外界干扰的能力也不同[16]。本文依据景观格局指标,通过不同指数的叠加计算反映不同景观类型所代表的生态系统在受自然和人为干扰情况下其自然属性损失的程度,用景观损失指数(R_i)来表示,计算公式为:

$$R_i = S_i \cdot F_i \tag{1}$$

式中:S_i——景观干扰度指数;F_i——景观脆弱度指数。

景观干扰度指数 S_i 指不同区域受到干扰之后的损失程度,是破碎度、分离度和优势度权重的叠加,计算公式为:

$$S_i = aC_i + bN_i + cD_i \tag{2}$$

式中:a,b,c——破碎度、分离度和优势度的权重,其值大小反映不同景观的生态系统受到干扰的程度,

$a+b+c=1$,根据前人研究成果[12],采用专家咨询法确定,a,b,c 分别赋予 0.5,0.3,0.2 的权值.

景观优势度是斑块在景观中所占重要地位的一种指标,表达式为:

$$D_i=(M_i+L_i)/4+P_i/2 \quad (3)$$

式中:L_i——相对密度;P_i——盖度;M_i——频度;L_i=斑块 i 的数目/斑块的总数目,P_i=斑块 i 的面积/总面积,M_i=斑块 i 出现的样方数/总样方数。

景观脆弱度指数是指不同生态系统的易损性,根据前人研究结果[17],将研究区的景观类型生态脆弱性分为 8 级,由低到高依次为建设用地、林地、灌丛、草地、耕地、养殖用地、滩涂和未利用地,对此进行归一化处理后得到各类景观类型的脆弱度指数 F_i。

2.3　风险小区生态风险指数

结合已有的研究经验[18],同时根据研究区范围和采样工作量的大小,采用 10 km×10 km 的正方形风险小区采样格网进行等间距采样,生成 237 个风险小区。基于景观指数所构建的风险指数,计算每个风险小区的景观生态风险值,计算公式为[19]:

$$\mathrm{ERI}_i=\sum_{i=1}^{N}\frac{A_{ki}}{A_k}R_i \quad (4)$$

式中:ERI_i——风险小区 i 的景观生态风险指数;A_{ki}——第 k 个风险小区内景观类型 i 的面积;A——第 k 个小区的的总面积;R_i——景观类型 i 的景观损失度指数。在此基础上,计算每一个风险小区的综合生态风险指数,并将其作为该风险小区中心质点的生态风险指数。

2.4　地统计分析

地统计学是一种检测、模拟、评估变量在空间上的相关关系和格局的统计方法。为了直观的表现研究区生态风险程度的空间分布特点,根据相关研究[20],基于地统计学中半方差函数的理论进行模拟分析,利用 ArcGIS 10.0 平台地统计模块中普通克里格法进行插值生成 2000,2013 年的空间连续分布图进行空间分析。

2.5　空间自相关分析

选取 Moran I 和 LISA 研究研究区景观生态风险的空间相关性,Mroan I 主要反映空间邻域单元属性的相关性,当 Moran $I>0$ 时,说明具有正的相关性,且值越大说明相关性越明显,Moran $I<0$ 时,说明具有负相关性,值越小说明空间差异性越明显,Moran $I=0$ 时,说明该属性在空间上随机分布。LISA则反映研究属性值的高值和低值局部空间的集聚情况,通过识别高—高集聚和低—低集聚区域反映出局部空间的异常特征。

3　结果分析

3.1　景观格局的时空变化

借助 ArcGIS 10.2 及 Fragsrats 4.2 软件平台,提取研究区 2000—2013 年各景观类型的面积和斑块数目,根据上述公式,计算得出福建沿海地区 2000 和 2013 年各景观格局指数(表 1)。由表 1 可知,2000—2013 年景观格局发生了明显变化,各种土地利用类型的面积均有一定的波动,其中建设用地、林地和水域的面积呈上升趋势,其他土地利用类型的面积均呈现出下降趋势。建设用地面积显著增加,13 a 的增加量为 1.13×10^5 hm^2,年均增长量为 8 680.10 hm^2;林地面积也有一定的增长,增长量为 1.04×10^4 hm^2,水域面积增长面积不明显。景观面积下降最明显的是草地,下降量为3.96×10^4 hm^2,其他土地利用类型面积下降的顺序依次为灌丛、未利用地、耕地、和滩涂。研究区内建设用地、林地和水域的斑块数目有所增加,分别由 2000 年的 1.26×10^4,1.69×10^4 和 5 640 增加至 2013 年的 1.47×10^4,1.80×10^4 和 5 811,灌丛、草地、耕地、滩涂和未利用地的斑块数目均有减少,其中灌丛、草地和未利用地减少明显,分别减少 4 976,7 166和 3 670,主要是此 3 种地类稳定性差,容易向其他土地利用类型转化。同时,林地、灌丛、草地、耕地和未利用地的破碎度和分离度指数均有不同程度的上升,由此说明这 5 种景观类型的破碎化程度加深,分离度加大,随机散布的程度加剧,损失度上升;随着城市化进程的加快,城市建设面积的不断增加,使建设用地的破碎度和分离度逐渐下降,建设用地的地域分布也逐渐趋于集中,损失度下降,同时也表明自然景观不断向人文景观转化,因此所导致福建沿海地区的生态风险加大。

3.2　景观生态风险的时空分异及格局变化

根据景观生态风险的计算公式计算出福建沿海 237 个风险小区在不同时期的生态风险,并选取最佳的变异函数进行拟合,通过比较 2000 年和 2013 年均用球状模型拟合效果最佳,然后利用 ArcGIS 10.2 的地统计分析模块对福建沿海 2000 和 2013 年的生态风险进行克里金插值,并以自然间断法的方法将生态风险指数分为低生态风险(ERI<0.012 9)、较低生态风险(0.012 9≤ERI<0.014 3)、中生态风险(0.014 3≤ERI<0.018 1)、较高生态风险(0.018 1≤ERI<0.028 7)和高生态风险(ERI>0.028 7)5 个等级,得到福建沿海生态风险的空间分布图,并对不同生态风险的面积进行统计。

表 1 研究区各景观类型的景观格局指数

类 型	年份	面积/hm²	斑块数	破碎度	分离度	优势度	干扰度	脆弱度	损失度
建设用地	2000	148 757.49	12 596	0.084 67	0.583 88	0.296 92	0.276 89	0.027 8	0.007 70
	2013	261 602.73	14 632	0.055 93	0.357 85	0.334 46	0.202 21	0.027 8	0.005 62
林 地	2000	1 170 045.45	16 887	0.014 43	0.085 95	0.530 71	0.139 14	0.055 6	0.007 74
	2013	1 180 465.92	17 980	0.015 23	0.087 91	0.539 82	0.141 95	0.055 6	0.007 89
灌 丛	2000	122 962.05	22 426	0.182 38	0.942 53	0.320 22	0.437 99	0.083 3	0.036 48
	2013	92 970.27	17 450	0.187 69	1.099 62	0.303 31	0.484 4	0.083 3	0.040 35
草 地	2000	80 478.54	18 416	0.228 83	1.304 99	0.278 88	0.561 69	0.138 9	0.078 02
	2013	40 902.21	11 250	0.275 05	2.006 87	0.245 36	0.788 65	0.138 9	0.109 54
耕 地	2000	689 255.28	29 263	0.042 46	0.192 07	0.454 11	0.169 67	0.111 1	0.018 85
	2013	668 418.21	28 673	0.042 90	0.196 05	0.458 13	0.171 89	0.111 1	0.019 10
滩 涂	2000	76 754.07	4 091	0.053 30	0.644 92	0.175 75	0.255 27	0.194 4	0.049 63
	2013	68 790.6	3 503	0.050 92	0.665 86	0.180 65	0.261 35	0.194 4	0.050 81
水 域	2000	45 561.6	5 640	0.123 79	1.275 65	0.266 98	0.497 98	0.166 7	0.083 01
	2013	46 875.51	5 811	0.123 97	1.258 54	0.269 14	0.493 37	0.166 7	0.082 25
未利用地	2000	61 919.01	12 973	0.209 52	1.423 59	0.232 43	0.578 32	0.222 2	0.128 5
	2013	35 708.04	9 303	0.260 53	2.090 43	0.221 89	0.801 77	0.222 2	0.178 15

从图 1 和表 2 可以看出，福建省沿海地区 2000 和 2013 年的的生态风险空间分布均大致呈带状分布，2000 年处于低生态风险等级和较低生态风险等级的面积分别为 4.24×10^5 hm² 和 2.67×10^5 hm²，分别占研究区总面积的 17.7%和 11.1%，低风险等级主要分布在沿海北部的福鼎市、霞浦县、蕉城区和罗源县等地区，较低风险等级主要分布在低风险等级的外围，此地带的林地和耕地面积大，生态风险相对较低，中风险等级主要分布在福安市、连江县的西侧以及福清市—城厢区的中部、泉港区、惠安县和南安市以及同安区的大部分区域，面积为 5.45×10^5 hm²，约占研究区总面积的 22.9%，这些地区主要为耕地向建设用地的过渡地带。较高风险区域主要分布于连江—城厢区和丰泽区和杏林区的沿海地带，以及龙海市、诏安县和东山岛等地区，面积为 7.38×10^5 hm²，占研究区总面积的 31.4%，这些区域的景观类型单一，未利用地和草地的分布较多，因此生态风险较高。高风险等级主要集中在平潭县、湄湘湾北岸以及漳浦县和云霄县，这些区域主要由于人类干预活动加大，林地退化导致斑块破碎化程度高以及分离度加大，因此生态风险高，约占总面积的 16.8%。与 2000 年相比，2013 年低生态风险、较低生态风险及中生态风险的面积均有不同程度的增加，低生态风险面积增加5 813.85 hm²，主要发生在霞浦一带，其主要原因为林地面积有所增加，生态脆弱性降低。较低生态风险等级的面积增加 1.03×10^4 hm²，增加量主要由低风险等级的转化。中风险等级面积增加 1.29×10^5 hm²，空间位置的变化主要表现为向东部的扩张，侵占了2 000处于较高生态风险等级的区域，其在长乐市至城厢区表现最明显，主要原因是城市进程的加快，导致建设用地面积大量增加，出现规模化的城市景观，连通性增加，景观破碎化程度降低，而建设用地的脆弱度又较小，因此生态风险降低。较高生态风险等级和高生态风等级的面积均有不同程度的减小，面积减少量分别为 1.50×10^4 hm² 和 1.30×10^4 hm²，分别由31.4%，16.8%降低至 30.8%和 11.4%，较高风险等级的空间变化除了长乐至相城区的面积减少外，龙海市和漳浦县地区面积增加，大部分来源于高风险等级的转化，主要由于建设用地面积的逐渐增加和集中导致景观分离度和景观脆弱度逐渐降低。

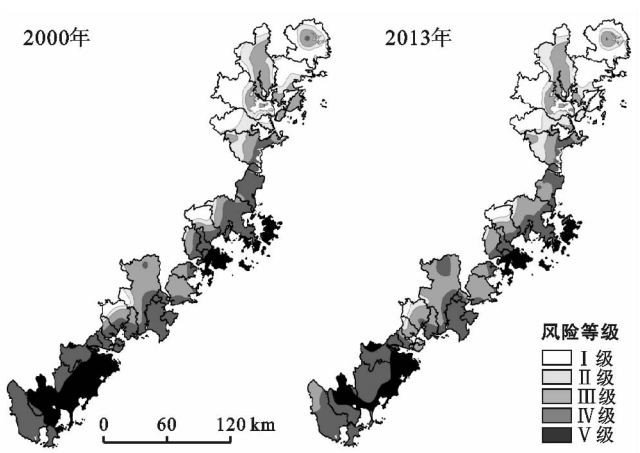


图 1 研究区 2000，2013 年生态风险空间分布

表 2　研究区 2000—2013 年各风险等级面积　　hm^2

生态风险等级	2000 年	2013 年	变化量
低生态风险	4.24×10^5	4.30×10^5	5 813.85
较低生态风险	2.67×10^5	2.78×10^5	1.04×10^4
中生态风险	5.50×10^5	6.79×10^5	1.29×10^5
较高生态风险	7.53×10^5	7.38×10^5	-1.50×10^4
高生态风险	4.02×10^5	2.72×10^5	-1.30×10^5

3.3　福建沿海生态风险的空间关联分析

在 ArcGIS 10.2 中计算福建沿海地区 2000 和 2013 年生态风险指数的全局 Moran I 值,分别为 0.798 6 和0.660 8,表明福建沿海地区生态风险指数在空间上具有较强的集聚效应,生态风险高的区域周围生态风险也高,生态风险低的区域生态风险也低。2000—2013 年 Moran I 值呈下降趋势,表明福建沿海地区生态风险的空间自相关性有所下降,空间趋同性有所下降。从局部空间自相关的集聚程度可以看出,福建沿海 2000,2013 年生态风险指数空间分布均以高—高聚集和低—低聚集为主,2000—2013 年发生变化的区域主要发生在沿海南部的漳浦县至云霄县一带,主要表现为高值聚集区的分布由聚集向分散的演变。低值集聚主要集中在沿海北部的福鼎市、蕉城区及罗源县,高值集聚区主要分布在龙海市、漳浦县及云霄县一带。

3.4　景观生态风险等级转移分析

分析表 3 可知,2000—2013 年研究区内由低等级向高等级转换的总面积为 1.28×10^5 hm^2,约占研究区总面积的 5.3%,生态风险等级由高级向低级转换的总面积为 4.08×10^5 hm^2,占研究区总面积的 17.03%,其中面积变化最大的是较高风险等级向中风险等级的转化,其次是高风险等级向较高风险等级的转换,转换量分别为 1.69×10^5 hm^2 和 1.41×10^5 hm^2,说明福建沿海地区较高风险等级和高风险等级的面积不断减小,总体生态风险呈下降趋势,生态环境逐步好转,转化区域主要集中在长乐市—城厢区以及龙海市和漳浦县,主要是这些区域城市建设用地快速增加,建设用地逐步替代了其他土地利用类型,使城市建设用地的斑块面积增加,景观破碎化程度降低,而城市建设用地自身的脆弱性较低,因而生态风险也呈现下降趋势。2013 年福建沿海区域处于高风险和较高风险等级的面积为 1.01×10^6 hm^2,占研究区总面积的 42.17%,说明 13 a 来福建沿海地区景观生态问题依然很严峻,且出现局部恶化的趋势。

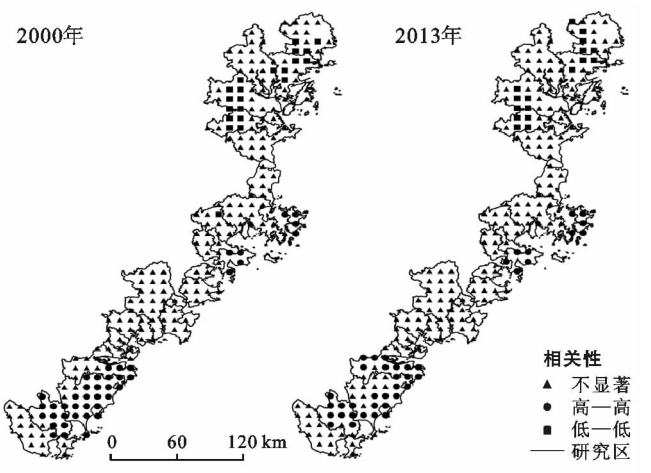


图 2　2000,2013 年研究区生态风险的局部空间相关性

表 3　研究区 2000—2013 年各生态风险等级的转移矩阵　　hm^2

生态风险等级	低风险等级	较低风险等级	中风险等级	较高风险等级	高风险等级	合 计
低风险等级	3.75×10^5	4.30×10^4	6 597.61	0	0	4.24×10^5
较低风险等级	3.50×10^4	1.91×10^5	4.04×10^4	0	0	2.67×10^5
中分险等级	2.05×10^4	4.00×10^4	4.62×10^5	2.67×10^4	0	5.50×10^5
较高风险等级	0	2 687.45	1.69×10^5	5.70×10^5	1.10×10^4	7.53×10^5
高风险等级	0	0	0	1.41×10^5	2.61×10^5	4.02×10^5
合 计	4.30×10^5	2.77×10^5	6.79×10^5	7.38×10^5	2.72×10^5	2.40×10^6

4　结 论

(1) 2000—2013 年研究区内景观格局发生了较大变化,其中建设用地、林地和水域的面积呈上升趋势,灌丛、草地、耕地、滩涂和未利用地的面积均呈现下降趋势,且斑块数目减少,破碎化程度加深,而建设用地的破碎度和分离度逐渐下降,地域分布逐渐趋于集中,损失度下降。

(2) 研究区 2000 和 2013 年的的生态风险空间分布均大致呈带状分布,2000 年研究区内各风险等级面积相对均衡,中等和较高风险等级最多分别占总面积的 22.9%和 31.4%. 2013 年较高生态风险等级和高生态风等级的面积。总体生态风险呈下降趋势,生态环境逐步好转。

(3) 2000 和 2013 年研究区内生态风险指数在空间上具有较强的集聚效应,均以高—高聚集和低—低

聚集为主，2000—2013年集聚发生变化的区域主要发生在沿海南部的漳浦县至云霄县一带，主要表现为高值聚集区的分布由聚集向分散的演变。低值集聚主要集中在沿海北部的福鼎市、蕉城区及罗源县，高值集聚区主要分布在龙海市、漳浦县及云霄县一带。

[参 考 文 献]

[1] 许妍，高俊峰，郭建科. 太湖流域生态风险评价[J]. 生态学报，2013，33(9)：2896-2906.

[2] 石浩朋. 基于景观结构的城乡结合部区域生态风险分析：以泰安市岱岳区为例[D]. 山东 泰安：山东农业大学，2013.

[3] 张小飞，王如松，李正国，等. 城市综合生态风险评价：以淮北市城区为例[J]. 生态学报，2011，31(20)：6204-6214.

[4] 徐羽，钟业喜，冯兴华，等. 鄱阳湖流域土地利用生态风险格局[J]. 生态学报，2016，36(23)：7850-7857.

[5] Harwell M A, Gentile J H, Bartuska A, et al. A science-based strategy for ecological restoration in South Florida[J]. Urban Ecosystems, 1999, 3(3/4): 201-222.

[6] 颜磊，许学工. 区域生态风险评价研究进展[J]. 地域研究与开发，2010，29(1)：113-118.

[7] Iroumé A, Huber A, Schulz K. Summer flows in experimental catchments with different forest covers, Chile [J]. Journal of Hydrology, 2005, 300(1): 300-313.

[8] 王娟，崔保山，刘杰，等. 云南澜沧江流域土地利用及其变化对景观生态风险的影响[J]. 环境科学学报，2008，28(2)：269-277.

[9] 许妍，高俊峰，郭建科. 太湖流域生态风险评价[J]. 生态学报，2013，33(9)：2896-2906.

[10] 卿凤婷，彭羽. 基于景观结构的北京市顺义区生态风险时空特征[J]. 应用生态学报，2016，27(5)：1585-1593.

[11] 张莹，雷国平，林佳，等. 扎龙自然保护区不同空间尺度景观格局时空变化及其生态风险[J]. 生态学杂志，2012，31(5)：1250-1256.

[12] 吴莉，侯西勇，邸向红. 山东省沿海区域景观生态风险评价[J]. 生态学杂志，2014，33(1)：214-220.

[13] 李景宜. 基于GIS的区域景观生态风险分析：以渭河下游河流沿线区域为例[C]//北京：中国灾害防御协会风险分析专委会年会，2008：899-903.

[14] 蒙晓，任志远，张翀. 咸阳市土地利用变化及生态风险[J]. 干旱区研究，2012，29(1)：137-142.

[15] 高宾，李小玉，李志刚，等. 基于景观格局的锦州湾沿海经济开发区生态风险分析[J]. 生态学报，2011，31(12)：3441-3450.

[16] 王云，周忠学，郭钟哲. 都市农业景观破碎化过程对生态系统服务价值的影响：以西安市为例[J]. 地理研究，2014，33(6)：1097-1105.

[17] 李加林，徐谅慧，杨磊，等. 浙江省海岸带景观生态风险格局演变研究[J]. 水土保持学报，2016，30(1)：293-299.

[18] 张月，张飞，周梅，等. 干旱区内陆艾比湖区域景观生态风险评价及时空分异[J]. 应用生态学报，2016，27(1)：233-242.

[19] 巩杰，谢余初，赵彩霞，等. 甘肃白龙江流域景观生态风险评价及其时空分异[J]. 中国环境科学，2014，34(8)：2153-2160.

[20] 卢远，苏文静，华璀，等. 左江上游流域景观生态风险评价[J]. 热带地理，2010，30(5)：496-502.

(上接第240页)

[13] 卢俊宇，黄贤金，陈逸，等. 基于能源消费的中国省级区域碳足迹时空演变分析[J]. 地理研究，2013，32(2)：326-336.

[14] 韦良焕，林宁，鞠美庭. 基于碳足迹和碳承载力的新疆碳安全评价[J]. 水土保持通报，2017，37(1)：281-285，291.

[15] 马彩虹. 中国能源碳足迹与植被碳承载力的对比分析[J]. 生态经济，2012(6)：53-55.

[16] 吴庆标，王效科，段晓男，等. 中国森林生态系统植被固碳现状和潜力[J]. 生态学报，2008，28(2)：517-524.

[17] 周国模，姜培坤. 毛竹林的碳密度和碳贮量及其空间分布[J]. 林业科学，2004，40(6)：20-24.

[18] 曹先磊，吴伟光. 不同地区毛竹林经营的经济效益与固碳能力分析：基于福建、浙江与江西的对比[J]. 林业资源管理，2015(1)：64-70.

[19] Min Zhao, Kong Zhenghong, Francisco J, et al. Impacts of urban forests on offsetting carbon emissions from industrial energy use in Hangzhou, China[J]. Journal of Environmental Management, 2009, 91(4): 807-813.

[20] 佘玮，黄璜，官春云，等. 我国典型农作区作物生产碳汇功能研究[J]. 中国工程科学，2016，18(1)：106-113.

[21] 宋博，穆月英. 碳汇功能的设施蔬菜生态补偿机制[J]. 西北农林科技大学学报：社会科学版，2016，16(2)：79-86.

[22] 阮建云. 茶园生态系统固碳潜力及低碳茶叶生产技术[J]. 中国茶叶，2010，32(7)：6-9.

[23] 谷家川，查良松. 皖江城市带农作物碳储量动态变化研究[J]. 长江流域资源与环境，2012，21(12)：1507-1513.

[24] Richard Y, Eugene A R, Thomas D. STIRPAT, IPAT and ImPACT: Analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts[J]. Ecological Economics, 2003, 46(3): 351-365.