

基于 GIS 的新和县土地利用生态风险分析

李玉珍^{1,2}, 张永福^{1,2}, 安放舟^{1,2}

(1. 新疆大学 资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046; 2. 新疆大学 绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046)

摘要:利用新和县 2008 年、2013 年的遥感影像数据, 分析了 2008—2013 年新和县土地利用结构变化规律, 并讨论了由此引发的生态风险。对研究区来说, 以 2008—2013 年间的两幅遥感解译图为基础信息, 根据不同时间段土地要素的结构特征, 构造生态风险指数。利用系统空间采样方法对生态风险指数进行变量的空间化。通过对生态风险指数采样结果进行半变异函数分析和空间插值, 从而揭示研究区生态风险的空间特征和内在形成机制。结果发现: 在 2008—2013 年间, 研究区林地面积和其他用地面积在减少, 其中其他用地面积减少最明显, 其次是林地面积。耕地面积、水域面积几乎未发生改变; 草地面积和建设用地面积都在增加; 在整个研究期内, 研究区生态系统生态风险值出现变化。总体来说, 研究区生态环境状况在 2008—2013 年趋于恶化状态。

关键词:土地利用; 遥感影像; 生态风险

中图分类号: X826

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2015)01-0172-04

Analysis on Ecological Risk of Land Use in Xinhe County Based on GIS

LI Yuzhen^{1,2}, ZHANG Yongfu^{1,2}, AN Fangzhou^{1,2}

(1. College of Resources and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

2. Key Lab of Oasis Ecology, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

Abstract: Remote sensing image data of Xinhe's from 2008 to 2013 were used to explore the rule of changes of land structure, and discussed the resulting ecological risk. For the study area, in 2008—2013 the two landscape remote sensing showed the basic information, and according to the structure characteristics of different periods of landscape elements ecological risk index was constructed. System space sampling method was used to analyse the ecological risk index variable space. The sampling results of ecological risk index were analyzed by using half variant function and spatial interpolation, thus the space of the ecological risk in the study area and internal mechanism were revealed. The results showed that from 2008 to 2013, forestland area in the study region and other land area were decreasing, whereas other land area reduced, the most obvious change was followed by woodland area. Arable land and water area were almost the same; grassland area and construction land area were increasing; during the whole research period, the ecosystem risk value in of the study area changed. Overall, the ecological environment in the study area was deteriorating from 2008 to 2013.

Keywords: land use; remote sensing image; ecological risk

生态风险表示在指定的研究区内, 不确定的一些事故或灾害对生态系统及其各组成成分可能产生的作用, 这些作用的结果可能会导致区域生态系统失去原有的平衡, 进而对区域生态系统的安全与健康构成威胁^[1-7]。生态风险评价是以为区域生态管理提供理论依据和技术支持为目的的研究^[8-9]。土地利用生态风险主要用于描述和评价人为活动、自然灾害或者环境污染对生态系统的结构和功能所产生的影响程度, 其影响的范围、时

间以及产生的后果也是较难预测的^[10]。

由于土地利用的方式及其强度不同, 导致土地利用生态影响具有空间性和累加性的效果, 并且这种影响以较为直观的形式反映到土地利用生态系统的结构和功能上^[11]。本文选择新和县为研究区, 在特定的研究区内, 通过遥感解译方法获得土地利用图, 将此图做为基本的信息源, 然后进行土地利用的生态风险分析。

收稿日期: 2014-03-24

修回日期: 2014-05-09

第一作者: 李玉珍(1989—), 女, 新疆新源县人, 硕士研究生, 主要从事地图学与地理信息系统方面的研究。E-mail: liyuzhenkuaile@126.com

通信作者: 张永福(1964—), 男, 新疆乌鲁木齐人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事土地资源评价及土地利用规划等方面科研工作。E-mail: 280481945@qq.com

1 试验材料与方法

1.1 研究区概况

新和县地处亚欧大陆腹地,新疆维吾尔自治区西南部,塔里木盆地北缘的天山南麓洪积、冲积平原带,东经 $81^{\circ}03'22''$ — $82^{\circ}42'15''$,北纬 $40^{\circ}56'24''$ — $41^{\circ}44'45''$,北起天山支脉却勒塔格山,山麓南缘为冲积平原,整个地形北高南低,地势由东北向西南倾斜,县境东西长 137.5 km,南北宽 90.4 km,东邻库车,南接沙雅,北倚拜城,西连温宿和阿克苏市。由于东南季风及北大西洋暖湿气流很难影响本区,故本区属于典型的暖温带大陆性气候。全区土地总面积为 582 046.08 hm^2 ,2013 年全县总人口达 173 109 人。

由于其干旱的气候特点和特殊的地貌地形条件使得该研究区生态环境极其脆弱,因此形成森林边缘带等多种生态环境脆弱带。近几十年来,新和县人口增加、社会经济发展和水土资源的大规模开发利用引起一系列的生态环境的变化,如土壤盐渍化加剧、土地荒漠化加剧等严重的生态问题。这些变化已经严重制约着新和县经济的可持续发展和人居环境的可持续改善。为防止本区生态环境进一步遭受迫害,对新和县进行土地利用生态风险的分析势在必行。

1.2 数据来源

使用新和县 2008 年 7 月 ETM+ 遥感影像数据(分辨率为 30 m),以及 2013 年 7 月 ETM+ 遥感影像数据(分辨率为 30 m)。其它相关数据包括研究区 1:10 万、1:5 万地形图,研究区土地利用现状图,及研究区统计年鉴。

1.3 遥感影像处理

以新和县 2008 年、2013 年的遥感影像图为数据源,通过在 ENVI 4.5 中进行边界提取、投影转换等数据处理,依据国土资源部 2001 年公布的《土地分类》及新和县的土地利用/土地覆盖特征,将研究区土地类型划分为:耕地、林地、草地、水域、建设用地、其他用地这六种类型。

在遥感影像处理上具体采用 ENVI 4.5 遥感影像处理系统对研究区两个时期的数据进行波段合成、几何校正、图像增强、切割等处理;根据建立的解译标志,对处理过的影像进行监督分类,分类后采用合并类、上下文分析、聚类处理等手段获得符合精度要求的监督分类影像。经过检验,两期的遥感影像解译总体精度值都达到了 85% 以上,可以满足研究需要。通过对分类影像进行矢量化后导入地理信息系统软件 ArcGIS 中,经过统计分析和计算,最终得到土地利用结构变化数据。

1.4 生态风险指数

利用新和县各土地要素的面积及比重,建立生态风险与 LUCC 之间的关系,从而构造各土地要素的生态风险指数^[9]。其表达式为^[4,9]:

$$\text{ERI} = \sum_{i=1}^N \frac{A_i}{A} R_i \quad (1)$$

式中:ERI——生态风险指数; N ——土地要素的数量; A ——土地总面积; A_i ——第 i 类土地要素的面积; R_i ——第 i 种土地要素所反映的损失指数。脆弱度指数 F_i 、干扰度指数 S_i 的综合来表示某一种土地要素 R_i 。

1.4.1 干扰度指数 在促进土地利用结构的自然演替、抵抗外界干扰的能力、维护生物多样性和完善整体结构与功能等方面,不同的土地要素的作用是有较大差别的^[12-14]。以新和县 LUCC 研究为基础,构建一个干扰度指数 S_i 。干扰度指数 S_i 可表示为: $S_i = aC_i + bN_i + cD_i$ 。式中 C_i 表示景观破碎度, N_i 表示景观分离度, D_i 表示景观优势度,其具体算法见参考文献^[1,2,4,9]。

由于不同土地要素所采用的量纲存在差异,所以需要计算得出的 C_i , N_i , D_i 指标进行归一化处理。用 a, b, c 表示土地要素各指标的权重,并且要求 $a + b + c = 1$ 。通过专家咨询与分析权衡,认为破碎度指数最为重要,其次为分离度指数和优势度指数。最终将 0.5, 0.3, 0.2 这三个权值分别赋予指数 C_i , N_i 与 D_i 。

1.4.2 脆弱度 表示土地要素不同从而导致各个要素在对抵抗外界干扰时表现出来的能力有所差异,这种差异与自然演替过程所处的阶段息息相关^[10]。针对新和县 LUCC 特点,得出在本区内的六类土地要素中脆弱度程度由高到低依次为:其他用地、水域、耕地、草地、林地、建设用地。各土地要素的脆弱度指数由归一化处理后得到。将归一化的值域范围设定为 $[0.1, 0.9]$ ^[2,14],其主要原因是为了便于分析与计算。

1.5 采样方法

本研究区采用 $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$ 的正方形样地对综合指数进行空间化,采样方式为等间距系统采样法,共有样区 415 个。计算每一样区内各土地类型的综合生态风险指数,以此作为样地中心点的生态风险水平。

1.6 空间分析方法

综合生态风险的空间分析是利用地统计学方法完成的。地统计学是一系列检测、模拟和估计变量在空间上的相关关系和格局的统计方法。该方法是在生态风险系统采样的基础上,计算得出试验半变异函数,然后进行理论半变异函数的拟合。半方差分析是地统计学中的一个重要组成部分,半方差定义为:

$$r(h)=\frac{1}{2n(h)}\sum_{i=1}^{n(h)}[z(x_i+h)-z(x_i)]^2 \tag{2}$$

式中： h ——样本间隔距离； $n(h)$ ——抽样间距为 h 的样点对总数； z ——某一系统属性的随机变量； x ——空间位置； $z(x_i)$ ， $z(x_i+h)$ ——在 x_i 和 x_i+h 的取值^[15-16]。以半方差 $r(h)$ 的纵坐标，样本间距 h 为横坐标，获得半方差图。利用 ArcGIS 的空间分析和地统计功能，通过求和、采样、克里格插值，将所得的实际半方差图用球状模型拟合，进而得到生态风险指数空间分布图。

2 结果与分析

2.1 土地利用结构动态变化

利用 Excel 2003 的统计分析功能计算不同土地类型的面积及其在研究区所占的百分比。由表 1 可知：在 2008—2013 年新和县各类景观面积发生变化，其中建设用地、草地面积显著增加，而林地面积、其他

用地面积明显减少，耕地面积和水域面积几乎未发生变化。

表 1 不同土地要素的面积百分比

景观 类型	2008 年		2013 年	
	面积/hm ²	比例/%	面积/hm ²	比例/%
耕地	50196.18	8.62	50193.66	8.62
林地	111748.81	19.20	111295.00	19.12
草地	45268.85	7.78	79253.73	13.62
建设用地	7874.46	1.35	9374.01	1.61
水域	636.08	0.11	635.64	0.11
其他用地	366321.70	62.94	331294.04	56.92

2.2 土地利用生态风险评价

利用景观指数计算软件 Fragstats 3.3 和 Excel 2003 的统计分析功能，以研究区整体作为研究对象，对该研究区土地利用生态风险指数进行计算，其结果见表 2。

表 2 2008 年、2013 年土地结构指数

年份	土地类型	斑块数	面积	C_i	N_i	D_i	S_i	F_i	R_i	生态风险指数
2008 年	耕地	14961	50196.18	0.298	0.024	0.064	0.161	0.625	0.101	0.079
	林地	88611	111748.81	0.796	0.085	0.220	0.441	0.037	0.016	
	草地	38548	45268.85	0.486	0.047	0.122	0.267	0.075	0.020	
	建设用地	14377	7874.46	1.534	0.010	0.028	0.772	0.103	0.080	
	水域	428	636.08	0.673	0.000	0.001	0.337	0.219	0.074	
	其他用地	197906	366321.70	0.597	0.220	0.563	0.409	0.272	0.111	
2013 年	耕地	11749	50193.66	0.234	0.021	0.055	0.134	0.638	0.085	0.121
	林地	108053	111295.00	0.971	0.094	0.209	0.555	0.045	0.025	
	草地	58147	79253.73	0.734	0.058	0.129	0.410	0.068	0.028	
	建设用地	14399	9374.01	1.536	0.010	0.023	0.776	0.075	0.058	
	水域	389	635.64	0.612	0.000	0.001	0.306	0.021	0.006	
	其他用地	285233	331294.04	0.860	0.264	0.584	0.626	0.293	0.183	

2008—2013 年研究区整体土地利用生态风险指数呈现增加的变化趋势，土地利用生态风险指数由 2008 年的 0.079 增加到 2013 年的 0.121。这种变化趋势和研究区实际情况是一致的。21 世纪以来，随着研究区人口增多，建设用地面积的扩大及其社会经济的增长，研究区的林地面积减少，引发了一系列的生态问题并造成严重的危害，因此研究区生态风险指数从 0.079 增长至 0.121。

2.3 生态风险空间差异

计算出新和县每个样区的生态风险指数，然后对风险指数进行分级，将生态风险值小于 0.035 的区域规定为低生态风险，剩余的区域以 0.035 的区间等距划分，具体分级情况为： $ERI \leq 0.035$ （低生态风险）， $0.035 < ERI \leq 0.07$ （较低生态风险）， $0.07 < ERI \leq 0.105$ （中生态风险）， $0.105 < ERI \leq 0.14$ （较高生态风险）， $ERI > 0.14$ （高生态风险）。

利用生态风险评价方法，对研究区 2008 年、2013 年生态风险状况进行评价及分级统计，其结果如图 1 所示。由生态风险分级统计表可知，研究区土地利用生态风险状况可以分为 3 个层次：一是以水体为主的湿地景观所在区域，其生态风险程度相对较低，这充分说明了干旱区湿地的重要性——它是干旱区独特而又重要的土地要素之一，是干旱区生态风险格局的重要结点和关键区域；二是以林地及建设用地类型为主的人工区域，其生态风险程度处于中等状态；三是人工区域外围的其他用地区域，其生态风险程度相对较高，且随着人工区域对人工区域外围的日益侵蚀，这一区域正逐渐直接与人工区域相邻，成为人工区域生态风险的外在隐患。

研究区内生态风险指数 2008 年、2013 年的各级生态风险指数面积比例均存在一定的差异。2008 年时研究区内生态风险指数在 $0 < \text{生态风险指数}$

≤ 0.035 的面积占研究区面积的 19.20%, $0.035 < \text{生态风险指数} \leq 0.07$ 的面积占研究区面积的 37.78%, $0.07 < \text{生态风险指数} \leq 0.105$ 的面积占研究区面积的 19.05%, $0.105 < \text{生态风险指数} \leq 0.14$ 的面积占研究区面积的 15.35%, 生态风险指数 ≥ 0.14 的面积占研究区面积的 8.62%。到 2013 年时, 研究区内上述几个级别的面积均呈现变化趋势, $0 < \text{生态风险指数} \leq 0.035$ 的面积占研究区面积的 17.28%, $0.035 < \text{生态风险指数} \leq 0.07$ 的面积占研究区面积的 25.35%, $0.07 < \text{生态风险指数} \leq 0.105$ 的面积占研究区面积的 24.82%, $0.105 < \text{生态风险指数} \leq 0.14$ 的面积占研究区面积的 21.31%, 生态风险指数 ≥ 0.14 的面积占研究区面积的 11.24%。上述变化说明 2008—2013 年, 研究区生态风险指数相对较低的区域的面积总体上趋于减少的状态; 而生态风险指数相对较高的区域的面积出现增长的状态; 研究区生态环境状况在 2008—2013 年趋于恶化, 这个变化趋势是与前述以研究区整体进行评价时的结论是一致的。

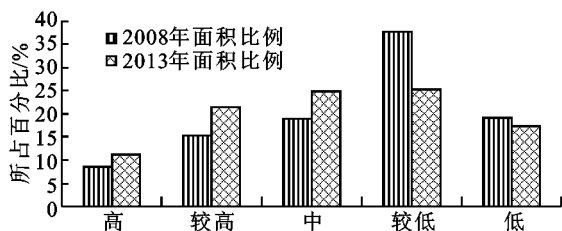


图 1 不同等级的生态风险区在各年份所占比例

3 结论

本文提出的基于土地利用的生态风险评价方法, 仅作为一种尝试, 旨在为区域生态环境质量状况评价问题的研究探索一种途径^[17-18]。土地利用生态风险分析的目的也是为区域生态环境的管理提供量化的决策依据和理论支持。结果表明, 研究区土地利用结构分析及区域生态风险指数能够较好地定量评价区域生态环境状况, 并反映局部环境的演变方向。

(1) 通过对新和县土地利用格局变化进行分析得出, 在 2008—2013 年间, 研究区内的土地要素未发生变化, 但各土地要素的面积及其所占的面积百分比变化明显。2008—2013 年, 耕地面积、水域面积几乎未发生改变, 草地面积及建设用地的面积增长较快, 而林地面积以及其他用地面积则减少明显。可见随着人口增长和社会经济的发展, 人为因素对土地利用结构的变化影响越来越显著。

(2) 由于土地利用结构的改变导致了研究区生态风险指数的差异。从总体变化分析来看, 2008—2013 年间, 研究区生态风险呈上升趋势。随着研究

区人口数量的增多, 建设用地面积的扩大, 致使研究区面临一系列的生态问题并带来严重的危害^[19], 因此研究区生态风险指数由 2008 年的 0.079 上升到 2013 年的 0.121。随着研究区生态风险的加剧, 研究区生态问题也会得到了人们越来越多的关注。

(3) 2008—2013 年, 研究区生态风险指数相对较低的区域面积总体上趋于减少的状态; 而生态风险指数相对较高的区域的面积总体上趋于增加的状态; 在 2008—2013 年, 研究区生态环境状况总体上呈现出恶化的趋势。

土地利用生态风险分析是在土地利用变化的格局上建立起生态风险的评价方法、评价指标体系与评价模型, 并对研究区的生态系统进行风险评价的过程与现代科技相结合, 与基础理论相结合, 从静态的现状评价转为动态的预测、预警, 是当前生态风险评价研究的发展方向和发展趋势。利用不同时期的土地利用分类图, 借助土地利用结构指数, 利用地统计学中的空间分析方法可以量化地揭示生态风险的空间分布特征, 进一步建立在人类干扰下土地利用与区域生态风险的有机联系, 为区域环境管理提供决策的依据和理论支持。区域生态风险指数能够较好地评价环境状况, 通过对生态风险指数的分类区划, 对高和较高生态风险区应高度重视, 探求原因, 从而提高土地的生产能力; 对中等和低生态风险区要加强建设, 力求结构更加合理。土地系统是经过改造重建, 富有再生产性和更有价值的生态系统, 应按照生态学原理和生态经济规律运作, 使得土地资源、环境和人口协调发展。

参考文献:

- [1] 李新琪, 金海龙, 朱海涌. 干旱区内陆艾比湖流域平原区景观生态安全评价研究[J]. 干旱环境监测, 2010, 24(2): 84-93.
- [2] 陈鹏, 潘晓玲. 干旱区内陆流域区域景观生态风险分析: 以阜康三工河流域为例[J]. 生态学杂志, 2003, 22(4): 116-120.
- [3] 李谢辉, 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[J]. 干旱区研究, 2008, 25(6): 899-903.
- [4] 曾辉, 刘国军. 基于景观结构的区域生态风险分析[J]. 中国环境科学, 1999, 19(5): 454-457.
- [5] 谢花林. 基于景观结构和空间统计学的区域生态风险分析[J]. 生态学报, 2008, 28(10): 5020-5026.
- [6] 蒙古军, 周婷, 刘洋. 区域生态风险评价: 以鄂尔多斯市为例[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2011, 47(5): 935-943.

1980s 以前,南通、盐城地区更为明显。总体上,2000 年以来的旱涝波动更为频发,且以涝为主。

(3) 近 50 a 变化趋势上,南通、盐城地区的年降水量呈较弱的减小趋势,连云港则呈增加趋势,而汛期降水量的变化趋势则与年降水量相反。而未来变化趋势上,南通、盐城、连云港年降水量仍将分别呈现出减少、减少、增加的趋势,汛期降水量也仍将分别表现为增加、增加、减少的趋势。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2007: The physical science basis: summary for policy makers [M]. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2007.
- [2] 丁一汇,任国玉,石广玉,等. 气候变化国家评估报告 (I): 中国气候变化的历史和未来趋势[J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(1): 3-8.
- [3] 张强,孙鹏,陈喜,等 1956—2000 年中国地表水资源状况: 变化特征、成因及影响[J]. 地理科学, 2011, 31(12): 1430-1436.
- [4] 胡娅敏,丁一汇. 2000 年以来江淮梅雨带北移的可能成因分析[J]. 气象, 2009, 35(12): 37-43.
- [5] 单树模,王庭槐,金其铭. 江苏省地理[M]. 南京: 江苏教育出版社, 1986.
- [6] 杨山,潘婧,季增民. 耗散结构视角下连云港城系统演进机理及规律研究[J]. 地理科学, 2011, 31(9): 781-787.
- [7] 王千,金晓斌,周寅康. 江苏沿海地区耕地景观生态安全格局变化与驱动机制[J]. 生态学报, 2011, 31(20): 5903-5909.
- [8] 周生路,李如海,王黎明. 江苏省农用地资源分等研究

[M]. 南京: 东南大学出版社, 2004.

- [9] 戴亚南,张鹰. 江苏沿海地区海洋灾害类型及其防治探讨[J]. 生态环境, 2006, 15(6): 1417-1420.
- [10] 谭丽荣,陈珂,王军,等. 近 20 a 来沿海地区风暴潮灾害脆弱性评价[J]. 地理科学, 2011, 31(9): 1111-1117.
- [11] 石勇,许世远,石纯,等. 沿海区域水灾脆弱性及风险的初步分析[J]. 地理科学, 2009, 29(6): 853-857.
- [12] 张忍顺,陆丽云,王艳红. 江苏海岸侵蚀过程及其趋势[J]. 地理研究, 2002, 21(4): 469-479.
- [13] 杨桂山,施雅风,季子修,等. 江苏沿海地区的相对海平面上升及其灾害性影响研究[J]. 自然灾害学报, 1997, 6(1): 88-97.
- [14] 叶正伟,许有鹏,徐金涛. 江苏里下河地区洪涝灾害演变趋势与成灾机理分析[J]. 地理科学, 2009, 29(6): 880-885.
- [15] Mann H B. Nonparametric tests against trend[J]. Econometrica, 1945, 13(3): 245-259.
- [16] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999.
- [17] Lloyd-Hughes B, Saunders M A. A drought climatology for Europe[J]. Int. J. Climatol., 2002, 22(13): 1571-1592.
- [18] Hurst H E. Long-term storage capacity of reservoirs[J]. Transactions of the American Society of Civil, 1951, 116: 770-808.
- [19] Mandelbr B B, Wallis J R. Robustness of rescaled range R/S in measurement of noncyclic long run statistical dependence[J]. Water Resources Research, 1969, 5(5): 967-988.

(上接第 175 页)

- [7] 钱云,郝毓灵. 新疆绿洲[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 2000.
- [8] 满苏尔·沙比提,阿里木江·卡斯木,帕尔哈提. 渭干河—库车河三角洲绿洲人口动态变化及其带来的问题[J]. 干旱区资源与环境, 2005, 19(3): 71-76.
- [9] 臧淑英,梁欣,张思冲. 基于 GIS 的大庆市土地利用生态风险分析[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(4): 141-145.
- [10] 许学工,林辉平,付在毅,等. 黄河三角洲湿地区域生态风险评价[J]. 北京大学学报, 2001, 37(1): 111-120.
- [11] 孙奇奇,宋戈,齐美玲. 基于主成分分析的哈尔滨市土地生态安全评价[J]. 水土保持研究, 2012, 19(2): 234-238.
- [11] 吴莉,侯西勇,徐新良,等. 山东沿海地区土地利用和景观格局变化[J]. 农业工程学报, 2013, 29(5): 207-216.
- [13] 吴文婕,石培基,胡巍. 基于土地利用/覆被变化的绿洲城市土地生态风险综合评价: 以甘州区为例[J]. 干旱

区研究, 2012, 29(1): 122-128.

- [14] 高宾,李小明,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.
- [15] 王介勇,赵庚星,杜春先. 基于景观空间结构信息的区域生态脆弱性分析[J]. 干旱区研究, 2005, 22(3): 317-321.
- [16] 巫丽芸,黄义雄. 东山岛景观生态风险评价[J]. 干旱区研究, 2005, 24(1): 35-42.
- [17] 李晓燕,张树文. 基于景观结构的吉林西部生态安全动态分析[J]. 干旱区研究, 2005, 2(1): 57-62.
- [18] 黄海,刘长城,陈春. 基于生态足迹的土地生态安全评价研究[J]. 水土保持研究, 2013, 20(1): 193-201.
- [19] 杨春红,张正栋,田楠楠,等. 基于 P-R-S 模型的汕头市土地生态安全评价[J]. 水土保持研究, 2012, 19(3): 209-214.