

# 松嫩平原西部景观自然性评价及动态变化

林奕伶, 马长迪, 刘吉平

(吉林师范大学 资源保护与利用研究所, 吉林 四平 136000)

**摘 要:**为探究松嫩平原西部未受人类干扰的程度,以松嫩平原西部为研究区域,基于“3S”技术,在 PSR 模型的基础上构建了包括 13 个指标的评价体系,结合层次分析法和信息熵模型定量评价了松嫩平原西部 1985—2015 年的景观自然性特征,并分析其动态变化规律及空间聚集性特征。结果表明:1985—2015 年,松嫩平原西部整体的景观自然性下降了 14%,呈先快后慢的下降趋势,造成景观自然性下降的主要原因是压力指标上升了 56%和响应指标下降了 9.07%。自然景观比例是对景观自然性影响最大的因子,其权重为 0.176。自然保护区的景观自然性高于城市地区,且以扎龙国家级保护区为代表的部分保护区景观自然性呈不断上升状态。松嫩平原西部景观自然性的空间自相关结果南北差异较大,高一高自相关类型主要集中在研究区北部,低—低自相关类型主要集中在研究区南部。

**关键词:**景观自然性;综合评价法;松嫩平原西部

中图分类号:P901

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)01-0227-06

## Landscape Naturality and Dynamic Change in the Western Songnen Plain

LIN Yiling, MA Changdi, LIU Jiping

(Institute of Resource Conservation and Utilization, Jilin Normal University, Siping, Jilin 136000, China)

**Abstract:** In order to explore the extent undisturbed by human in the Western Songnen Plain, this paper took the Western Songnen Plain as research area, and constructed an evaluation system of including 13 indexes on the basis of the PSR model based on 3S technology, combined with AHP and Shannon's Entropy model to quantitatively evaluate the feature of landscape naturality in the Western Songnen Plain from 1985 to 2015, and analyzed the dynamic change and feature of spatial aggregation. The results showed that from 1985 to 2015, the landscape naturality in the Western Songnen Plain decreased by 14% and presented the tendency of fast decline at first and then slow decrease, the two main reasons for the decline of landscape naturality were that pressure indicators increased by 56% and response indicator decreased by 9.07%. The proportion of nature landscape was the most important factor on landscape naturality and its weight was 0.176. The landscape naturality of the nature reserve was higher than urban area. Moreover, the landscape naturality in some natural reserves represented by Zhalong National Natural Reserve presented the constant increasing tendency. The spatial autocorrelation of landscape naturality in research area had a big difference between north and south, that is, the high-high autocorrelation mainly concentrated in the north of the research area, while the low-low autocorrelation mainly concentrated in the south of the research area.

**Keywords:** landscape naturalness; comprehensive evaluation method; the Western Songnen Plain

目前,对“自然性”这一概念还没有明确的定义,可将其理解为未受人类干扰的生态系统状态,也可理解为当前状态与原始状态的差异<sup>[1]</sup>。国内外针对“自然性”这一特性已开展了部分研究,如冯泽深<sup>[2]</sup>、张

栋<sup>[3]</sup>、张敏<sup>[4]</sup>、占昕<sup>[5]</sup>等利用层次分析法,分别对雁栖河、潮河、河北山区森林、闽江河口湿地保护区等地的自然性进行定量研究。前人的研究方法主要为层次分析法,研究对象多数为河流和森林等生态系统,而

收稿日期:2019-01-25

修回日期:2019-04-04

资助项目:吉林省科技发展计划项目(20180101085JC);吉林省社会科学资助项目(2018B175);吉林师范大学研究生科研创新计划项目(研创新 201924)

第一作者:林奕伶(1996—),女,吉林双辽人,硕士研究生,主要研究方向为资源环境信息系统。E-mail:xdldg010@163.com

通信作者:刘吉平(1972—),男,山东省菏泽市人,教授,硕士生导师,主要研究方向为资源环境信息系统。E-mail:ljp@jlnu.edu.cn

对景观自然性的研究较少。景观的自然性及其评价是景观管理和自然保护的重要课题<sup>[6]</sup>,也可作为生态系统恢复和景观规划的参考<sup>[7-10]</sup>。如何选择科学的研究方法、构建合理的评价指标体系对景观自然性进行评价是目前需要解决的问题。

层次分析法是一种定性与定量结合的赋权方法,但存在主观性过强的缺点。为了兼顾主观赋权与客观赋权,本文在层次分析法的基础上引用了信息熵模型,利用综合评价法进行权重赋值,可以在一定程度上减少因主观成分过强或数据差异过大而产生的误差。松嫩平原地区生态环境脆弱,抗干扰能力差。近年来人类对自然环境的影响逐渐加强,导致松嫩平原生态环境的进一步恶化,主要表现为土地沙化和湿地盐渍化<sup>[11]</sup>。本文以松嫩平原西部为研究区域,对松嫩平原西部的景观自然性及其动态变化进行研究,探究松嫩平原的景观自然性可以作为人类开发、改造自然环境的依据和诊断,从而引导人类更加科学、有效地保护自然。

# 1 研究区域与方法

## 1.1 研究区概况

松嫩平原西部坐标为 43°59′—48°33′E,121°37′—126°39′N(图 1),总面积为  $1.01\times10^5\text{ km}^2$ ,气候为中温带大陆性半湿润半干旱季风气候,地貌类型以山前倾斜平原、低平原以及部分河谷平原为主<sup>[12]</sup>。主要土地利用类型为森林、草地、湿地、农田,优势景观为农田景观。土壤类型主要为黑土、黑钙土、栗钙土、草甸土、盐碱土、风沙土以及沼泽土<sup>[13]</sup>。主要植被类型为虎尾草群落、碱茅群落、芦苇群落以及羊草群落<sup>[14]</sup>,植被覆盖率较高。主要城市包括白城市、松原市、大庆市、齐齐哈尔市。人口总数为 1 731 万人(2015 年),人口密度较大。经济发展水平较高,GDP 总量为 8 155 亿元(2015 年)。产业以农业、制造业为主,是我国重要的商品粮基地。1981 年至今依次设立了莫莫格、向海、扎龙、大布苏狼牙坝、查干湖 5 个国家级自然保护区。

## 1.2 数据来源及处理过程

本文以探究松嫩平原西部不同区域景观自然性状态为目的,采用网格分析法,考虑到网格划分过小时,会导致数据量过大,而网格划分较大时会导致计算结果粗略。景观尺度一般划分为 4 个尺度等级,即 1~106 km<sup>2</sup> 为小尺度,106~1 010 km<sup>2</sup> 为中尺度,1 010~1 012 km<sup>2</sup> 为大尺度,大于 1 012 km<sup>2</sup> 为巨尺度。为兼顾科学性和可操作性,参考相关文献<sup>[15]</sup>,利用 ArcGIS 10.2 软件将研究区划分为 155 个网格单

元。网格大小为 625 km<sup>2</sup>,研究区边界地区的网格面积略大或略小于 625 km<sup>2</sup>。本文的景观尺度处于中尺度,能表示具体区域的变化,是松嫩平原西部较为适宜的景观自然性评价尺度。

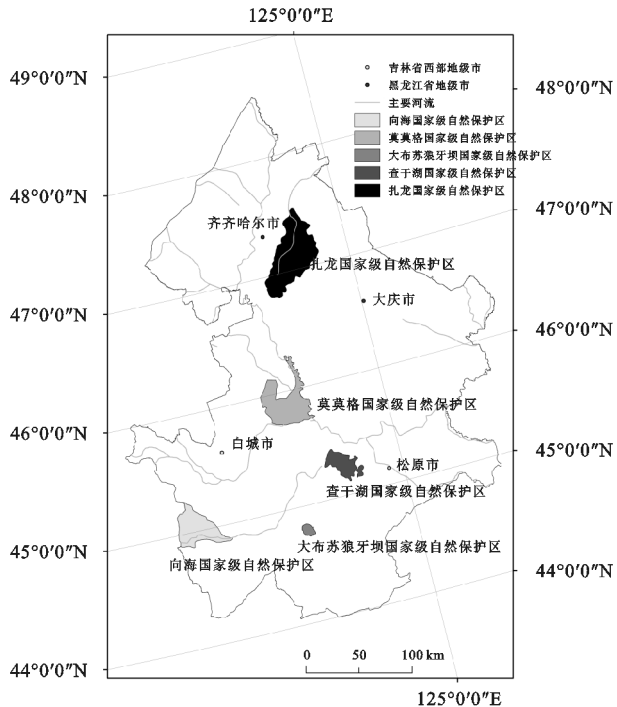


图 1 研究区位置

土地利用数据来源于 1985 年、2000 年、2015 年的 Landsat TM/OLI 遥感数据。首先利用 ENVI 软件对遥感影像的 5,4,3 波段进行标准假彩色合成,并对合成的遥感影像进行前期处理。然后用 1:10 万地形图对其进行纠正。最后对其进行目视解译并提取耕地、林地、草地、湿地等土地利用类型。采用抽样统计精度验证法,在野外设立验证点,并结合高分辨率遥感影像对解译结果进行检验,最终解译精度达到 90.7% 以上,基本可以满足本文的研究需求。

道路数据来源于 1:50 万黑龙江省、吉林省公路基础数据库的道路要素图。人口、GDP 数据来源于各地区统计年鉴。利用 SPSS 软件对各县、市的人口、GDP 数据进行统计,在 ArcGIS 10.2 中将其与划分的 155 个网格进行叠加、计算,最终得到 1985—2015 年松嫩平原西部各网格的人口密度与 GDP 数据。

## 1.3 研究方法

1.3.1 构建评价指标体系 在参考国内外自然性评价的基础上,以科学性、整体性、代表性、可量化性、层次性为主要原则,构建了以景观指数、土地利用类型、人类干扰为主体的综合评价体系。景观指数是对景观格局进行定量分析的重要工具,研究景观变化必然要用到相应的景观指数。土地利用类型也是衡量景观自然状态的重要依据,土地利用和土地覆盖变化是影

响景观结构、功能及动态的最普遍的主导因素之一,同时也是景观生态学和全球生态学中极重要和颇具挑战性的研究领域之一<sup>[16-17]</sup>。由于人类活动对景观影响的普遍性与深刻性,在作为人类生存环境的各种景观中,人类活动对景观演化起着主导作用<sup>[18]</sup>,因此在评价指标中加入了人类干扰相关因素,如人口、GDP 等。

评价体系包括目标层(A)、准则层(B)、指标层(C)3 个层次。

其中目标层为景观自然性评价(A),准则层包括压力指标(B<sub>1</sub>)、状态指标(B<sub>2</sub>)、响应指标(B<sub>3</sub>)。在 PSR 模型的基础上,向下划分出 13 个指标。指标层包括人口(C<sub>1</sub>)、GDP(C<sub>2</sub>)、道路密度(C<sub>3</sub>)、人为干扰度(C<sub>4</sub>)、景观多样性(C<sub>5</sub>)、景观均匀度(C<sub>6</sub>)、破碎化程度(C<sub>7</sub>)、景观优势度(C<sub>8</sub>)、景观形状指数(C<sub>9</sub>)、景观结构稳定性<sup>[19]</sup>(C<sub>10</sub>)、连通性(C<sub>11</sub>)、NDVI 指数(C<sub>12</sub>)、自然景观比例(C<sub>13</sub>)。

1.3.2 评价指标权重的确定及评价模型的构建 本文采用主观赋权法与客观赋权法结合的综合评价法。

在主客观权重的确定上,使用的方法是层次分析法(AHP),本文利用 yaahp 0.5.3 软件进行赋值,首先,构建层次结构模型。结构模型确立后构建判断矩阵,采用专家打分法,对各指标的相对重要程度进行对比赋值,赋值方法为 1~9 标度法。通过层次单排序与层次总排序进行一致性检验,4 个判断矩阵 CR 均小于 0.1,通过一致性检验。

同时,本文利用信息熵模型计算客观权重。1948 年,香农在热力学研究的基础上提出了信息熵公式,他认为,任何信息都存在冗余,冗余大小与信息中每个符号(数字、字母或单词)的出现概率或者说不确定性有关。信息熵模型的基本思想为:评价因子差异程度的大小能够反映该因子在整个综合评价体系中的地位,而评价因子差异程度的大小可以利用信息熵进行度量<sup>[20]</sup>。

分别利用层次分析法和信息熵模型计算出评价指标的主观权重、客观权重。最后利用综合评价法将二者进行结合,公式为

$$W = \alpha w_{\text{主观权重}} + (1 - \alpha) w_{\text{客观权重}}$$

式中:W 为综合权重值。其中; $0 \leq \alpha \leq 1$ ,本文中取  $\alpha = 0.7$ 。

计算后得到的综合权重见表 1,其中权重值较高的指标有破碎化程度、景观优势度、自然景观比例、GDP。

确定综合权重后,利用多因子加权评价模型对松嫩平原西部景观自然性进行分析,计算公式为:

$$N = \sum_{i=1}^n W_i \times P_i$$

式中:N 为景观自然性值;W<sub>i</sub> 为因子 i 的综合权重值;P<sub>i</sub> 为标准化处理后第 i 项指标的评价值。

表 1 综合评价法所得权重值

目标层	准则层	指标层	权重
景观自然性评价	状态指标	景观多样性	0.0442
		景观均匀度	0.0311
		破碎化程度	0.1320
		景观形状指数	0.0373
		景观优势度	0.1173
	响应指标	连通性	0.0430
		景观结构稳定性	0.0950
		NDVI	0.0698
		自然景观比例	0.1769
		人口数量	0.0376
	压力指标	GDP	0.1108
		道路密度	0.0202
		人为干扰度	0.0832

2 结果与分析

2.1 松嫩平原西部景观自然性评价

从整体上看,1985 年、2000 年、2015 年松嫩平原西部的景观自然性分别为 0.313 7、0.278 1、0.269 8,呈不断降低趋势,1985—2000 年下降率为 11%,2000—2015 年下降率为 3%(图 2)。下降的主要原因是压力指标的变化,1985—2000 年、2000—2015 年两个时期的压力指标分别上升了 47%,9%(图 2)。而压力指标中增长最快的是 GDP 指标,两个时期的 GDP 增长率分别为 749%和 368%。其次为响应指标的变化,1985—2000 年、2000—2015 年两个时期的响应指标分别下降了 7.77%,1.30%。

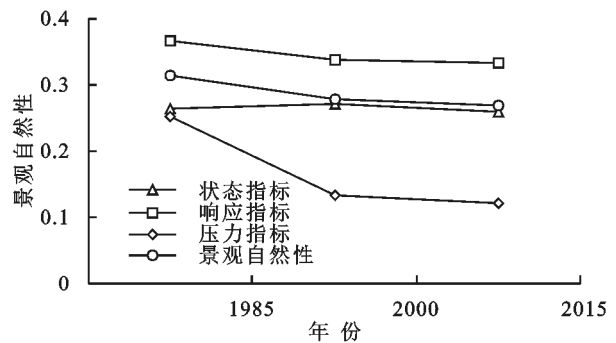


图 2 1985—2015 年各指标及景观自然性值

从地区看,以生态保护为目的的自然保护区的景观自然性整体上高于城市景观自然性。1985—2015 年,4 个城市中仅有大庆市的景观自然性呈上升状态,其余 3 个城市的景观自然性均有不同程度的下降(表 2)。在 5 个保护区中,扎龙国家级自然保护区始终是景观自然性值最高的地区,并且该保护区的景观自然性呈上升状态,1985—2015 年的上升率为 0.46%。莫莫格国家级保护区、查干湖国家级自然保护区的景观自然性呈先上升、后下降状态(表 2)。莫莫格国家级自

然保护区的景观自然性在 1985—2000 年的上升率为 9.86%，在 2000—2015 年的下降率为 27.84%。查干湖国家级自然保护区的景观自然性在 1985—2000 年的上升率为 4.17%，在 2000—2015 年的下降率为 16.21%。向海国家级自然保护区的景观自然性值下降最快，下降率为 34.32%。大布苏狼牙坝国家级自然保护区的景观自然性在 1985—2015 年的下降率为 14.73%。

为探究松嫩平原西部景观自然性的空间分异规律，利用 ArcGIS 10.2 软件，将松嫩平原西部三年各个网格的景观自然性值进行克里金插值，得到松嫩平原西部景观自然性空间分布图(图 3)。

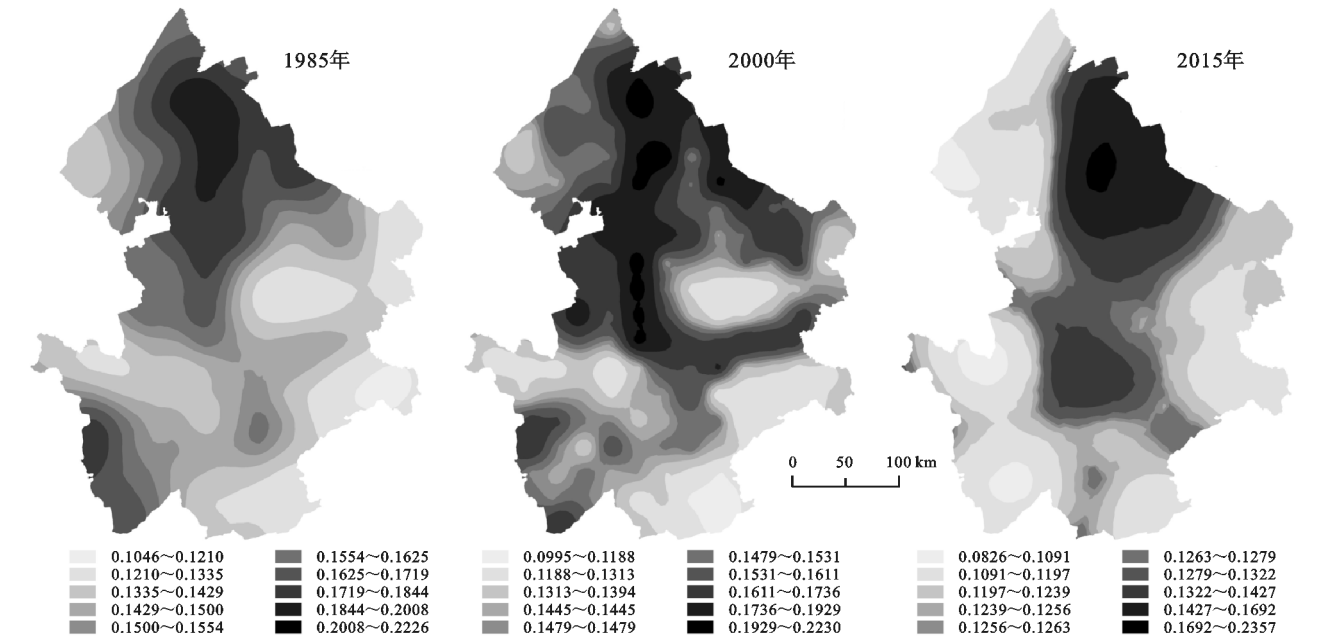


图 3 松嫩平原西部景观自然性空间分布

由图 3 可知，松嫩平原西部景观自然性值较高的区域集中在研究区南部，以扎龙国家级自然保护区为中心向四周递减。

1985 年景观自然性值最高的地区为扎龙国家级自然保护区及其北部，为 0.197 5。这一区域自然景观比例较高，为 60.35%，植被覆盖率较高，NDVI 值为 0.40，湿地是这一区域的优势景观，湿地率为 28.29%。其次为向海国家级自然保护区及其南部，为 0.188 8，这一区域人口密度为 15.6 人/km<sup>2</sup>，人口稀少，经济发展水平较低，NDVI 值为 0.29，自然景观比例为 66.12%。1985 年景观自然性最低值出现在松原市扶余县，为 0.117 0，这一区域的优势景观为耕作景观，耕地率为 76.00%。

2000 年景观自然性值最高的地区为莫莫格国家级自然保护区中部及其北部，为 0.211 6。这一区域自然景观比例为 58.27%，其中湿地率为 20.80%、草地率为 13.25%。2000 年松嫩平原西部整体人为干扰值为 0.591 7，而该区域人为干扰值为 0.439 4，说

表 2 松嫩平原西部主要城市及自然保护区景观自然性值

地区	1985 年	2000 年	2015 年
齐齐哈尔市区	0.1559	0.1495	0.0969
大庆市市区	0.1366	0.1439	0.1484
白城市市区	0.1130	0.1202	0.0942
松原市市区	0.1242	0.1169	0.1098
扎龙国家级自然保护区	0.1925	0.1929	0.1934
向海国家级自然保护区	0.1830	0.1661	0.1202
莫莫格国家级自然保护区	0.1674	0.1839	0.1327
查干湖国家级自然保护区	0.1581	0.1647	0.1380
大布苏狼牙坝国家级自然保护区	0.1487	0.1476	0.1268

明该区域受人为干扰程度较低。其次为扎龙国家级自然保护区中部及其北部，为 0.171 6，这一区域自然景观比例为 65.79%，连通性为 2.55，但该区域人口密度和 GDP 都高于松嫩平原西部整体平均值，导致自然性下降。2000 年景观自然性最低值出现在松原市长岭县附近，为 0.109 4。这一区域自然景观比例为 11.64%，NDVI 指数较小，为 0.101 3，耕地率为 76.67%。

2015 年景观自然性值最高的地区为扎龙国家级自然保护区东部，为 0.222 5。该区域自然景观比例为 76.60%，其中湿地率为 44.73%，草地率为 28.69%，NDVI 值为 0.336 5，高于平均值 0.263 7。2015 年景观自然性最低值出现在白城市、齐齐哈尔西部及白城南部，分别为 0.090 0、0.100 0、0.103 0，这些区域均为人类活动强度较高的地区，优势景观为城市景观、农业景观，耕地率分别为 79.28%、84.71%、77.00%。

## 2.2 松嫩平原西部景观自然性的动态变化

利用 ArcGIS 10.2 软件，将 1985—2000 年、2000—2015 年、1985—2015 年 3 个时段的景观自然



性变化值进行克里金插值,得到松嫩平原西部景观自然性动态变化图(图 4)。

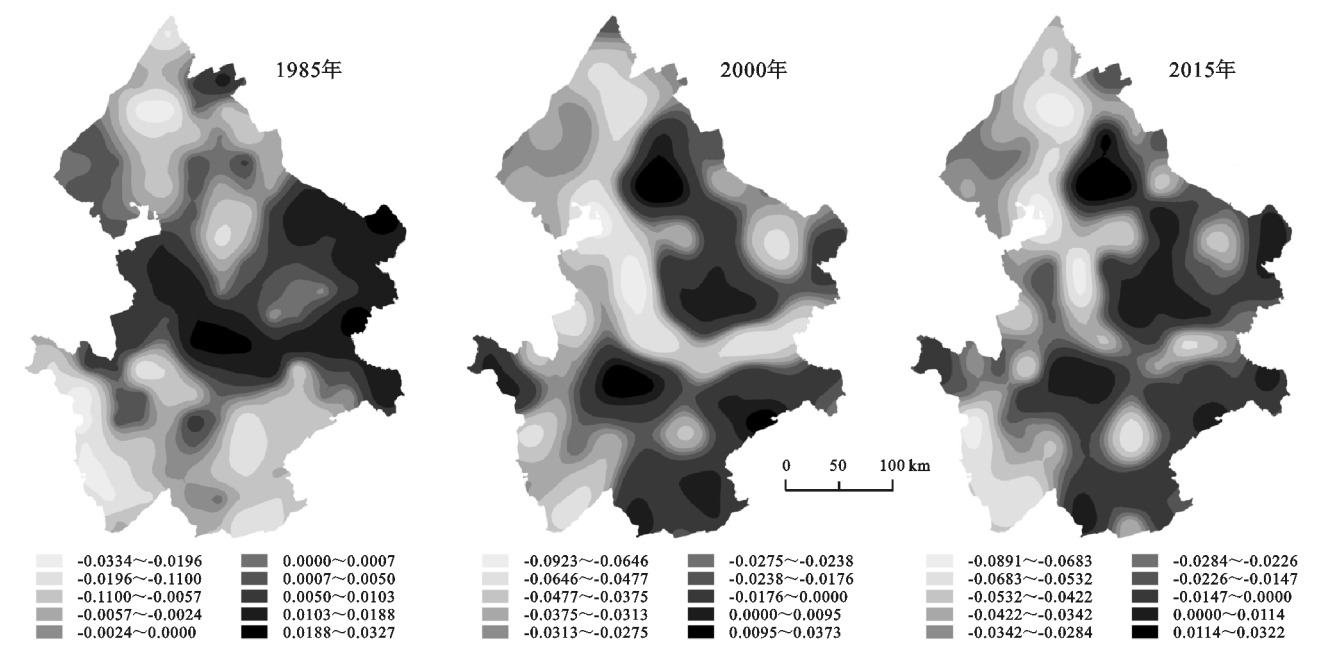


图 4 1985—2015 年松嫩平原西部景观自然性动态变化

研究区大部分区域景观自然性呈下降状态,仅少数区域景观自然性呈上升状态,这些区域集中在自然保护区及保护区附近地区。1985—2000 年,景观自然性上升的地区主要集中在研究区中部的莫莫格国家级自然保护区,而景观自然性下降的地区主要有向海国家级自然保护区和齐齐哈尔中部地区。2000—2015 年,景观自然性上升的地区主要为扎龙国家级自然保护区、莫莫格国家级自然保护区和松原部分地区,景观自然性下降的地区主要为齐齐哈尔南部地区。

1985—2015 年,景观自然性上升的地区仅有扎龙国家级保护区及保护区以东、莫莫格国家级保护区、大庆南部地区、松原少数地区,其余地区均呈下降趋势,尤以齐齐哈尔中部及南部、白城西部及南部下

降最快。

2.3 松嫩平原西部景观自然性的空间聚集性分析

利用 Geoda 软件,距离阈值设为 26 km,对 1985 年、2000 年、2015 年的景观自然性值进行全局 Moran's *I* 和局部空间自相关分析。3 个时期的全局 Moran's *I* 指数分别为 0.036 9,0.052 1,0.011 4,呈先上升后下降趋势。从空间分布上看,松嫩平原西部空间自相关结果的南北差距较大(图 5)。高一高自相关类型主要集中在研究区北部,特别是扎龙国家级保护区及其周边区域,表明该保护区自然性值与周围区域自然性值都较高,空间差异性小,呈空间正相关。低—低自相关类型主要集中在研究区南部,表明研究区南部自然性值较低,空间差异性小,呈空间正相关。

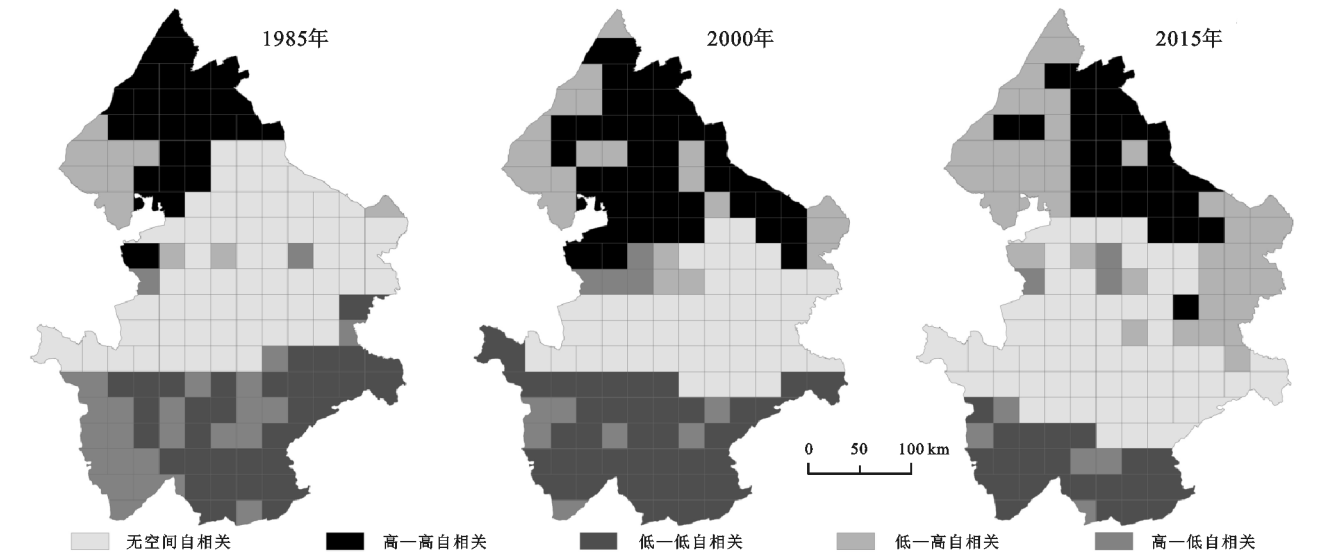


图 5 松嫩平原西部景观自然性空间分布

从数量上看,高一高自相关类型、低—低自相关类型均呈先增加,后减少的变化趋势(表 3)。结合 3 个时期的克里金插值图可知,1985 年景观自然性最高值出现在扎龙国家级自然保护区,随着莫莫格国家级自然保护区自然性的上升,2000 年景观自然性最高值出现在莫莫格国家级自然保护区和扎龙国家级自然保护区两个区域,故这一时期高一高自相关类型的数量达到最高值,2015 年景观自然性最高值仅出现在扎龙国家级自然保护区,故高一高自相关类型的数量相应降低。1985—2000 年期间,研究区北部大部分地区景观自然性均呈下降状态,低—低自相关类型的数量随之上升,而 2000—2015 年期间,随着松原市长岭县等地景观自然性值的上升,低—低自关类型数量也随之减少。低—高自相关类型呈逐年增加趋势,高一低自相关类型呈逐年减少趋势。无空间自相关类型呈先减少、后增加趋势。

表 3 1985—2015 年研究区局部空间自相关类型统计

空间自相关类型	1985 年	2000 年	2015 年
无空间自相关	62	45	58
高一高自相关	25	40	28
低—低自相关	34	39	21
低—高自相关	10	20	40
高一低自相关	24	11	8

3 结 论

(1) 景观自然性受景观破碎度、景观优势度、自然景观比例、GDP 这 4 个因子的影响较大,其中自然景观比例所占的权重值最高,增加自然景观的占比是提高景观自然性的关键。

(2) 松嫩平原西部景观自然性呈逐年下降趋势,其中 1985—2000 年下降速率最快,2000—2015 年下降率减慢,说明 21 世纪后推出的盐碱地生态改良、禁牧休牧等措施产生了一系列成效。景观自然性下降的原因主要是压力指标的上升和响应指标的下降,日后的工作重点应以降低人类干扰为主。

(3) 景观自然性值较高且呈上升状态的地区主要为自然保护区及保护区周边地区,如扎龙国家级保护区及保护区以东,莫莫格国家级保护区等。而人类活动密集的城市景观自然性较低。造成这种差异的原因主要是自然保护区景观的响应指标较高,而城市景观的压力指标较高。

(4) 松嫩平原西部景观自然性的空间自相关结果南北差异较大,高一高自相关类型、低—低自相关类型均呈先增加,后减少的变化趋势。

本文从景观指数、土地利用类型、人类干扰三方

面探讨松嫩平原西部景观自然性变化。影响一个地区景观自然性的因素还有很多,如生物因素、致灾因子等,这些因素的数据目前难以获取而不能准确量化,如何将这些因素量化、探究这些因素对景观自然性的影响可作为未来研究的重点。同时,本文仅对松嫩平原西部景观自然性及其动态变化进行评价,未对评价结果进行验证,如何科学、有效地验证评价结果也是未来研究的重点之一。

参考文献:

[1] Winter S. Forest naturalness assessment as a component of biodiversity monitoring and conservation management [J]. *Forestry*, 2012,85(2):293-304.

[2] 冯泽深,高甲荣.北京郊区雁栖河自然性定量评价[J].*中国农村水利水电*,2008(10):14-17.

[3] 张栋,张洪江,马岚,等.基于层次—灰色关联分析的河流自然性评价:以潮河为例[J].*中国水土保持科学*,2018,16(3):95-102.

[4] 张敏,黄国胜,王雪军.应用层次分析方法进行森林自然性评价的探讨[J].*林业资源管理*,2004(3):25-28.

[5] 占昕,潘文斌,郑鹏,等.闽江河口湿地自然保护区及其周边区域景观自然性评价[J].*生态学报*,2017,37(20):6895-6904.

[6] Ridder B. An Exploration of the Value of Naturalness and Wild Nature[J]. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 2007,20(2):195-213.

[7] Siipi H. Naturalness in biological conservation[J]. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 2004,17(6):457-477.

[8] SER N. Society for ecological restoration international Science & Policy Working Group[R]. the Ser International Primer on Ecological Restoration, 2004.

[9] Aronson J, Clewell A F, Blignaut J N, et al. Ecological restoration: A new frontier for nature conservation and economics[J]. *Journal for Nature Conservation*, 2006,14(3/4):135-139.

[10] Laufs P, Gallenkemper B, Pretz T, et al. Einführung in die Abfallwirtschaft[M]. Springer-Verlag, 2010.

[11] 罗新正,朱坦,孙广友.人类活动对松嫩平原生态环境的影响[J].*中国人口·资源与环境*,2002,12(4):94-99.

[12] 田艳林,刘贤赵,毛德华,等.基于 MODIS 数据的松嫩平原西部芦苇湿地地上生物量遥感估算[J].*生态学报*,2016,36(24):8071-8080.

[13] 黄方,王平,刘权.松嫩平原西部植被覆盖动态变化研究[J].*东北师大学报:自然科学版*,2008,40(4):115-120.

[14] 王铭,刘兴土,李秀军,等.松嫩平原西部草甸草原典型植物群落土壤呼吸动态及影响因素[J].*应用生态学报*,2014,25(1):45-52.

[16] 付在毅,许学工,林辉平,等.辽河三角洲湿地区域生态风险评价[J].生态学报,2001,21(3):365-373.

[17] 陈晔倩,李杨帆,祁新华,等.基于栖息地风险评价模型的海岸带滩涂湿地风险评价:闽三角为例[J].生态学报,2018,38(12):4214-4225.

[18] 刘春艳,张科,刘吉平.1976—2013 年三江平原景观生态风险变化及驱动力[J].生态学报,2018,38(11):3729-3740.

[19] 张春鹏,李富祥.鸭绿江口湿地滩涂表层沉积物重金属空间分布特征及生态风险评价[J].应用生态学报,2016,27(9):2884-2890.

[20] 胡金龙,周志翔,滕明君,等.基于土地利用变化的典型喀斯特流域生态风险评估:以漓江流域为例[J].应用生态学报,2017,28(6):2003-2012.

[21] 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.

[22] 张月,张飞,王娟,等.基于 LUCC 的艾比湖区域生态风险评价及预测研究[J].中国环境科学,2016,36(11):3465-3474.

[23] 巩杰,赵彩霞,谢余初,等.基于景观格局的甘肃白龙江流域生态风险评价与管理[J].应用生态学报,2014,25(7):2041-2048.

[24] 肖琳,田光进.天津市土地利用生态风险评价[J].生态学杂志,2014,33(2):469-476.

[25] 邱彭华,徐颂军,谢跟踪,等.基于景观格局和生态敏感性的海南西部地区生态脆弱性分析[J].生态学报,2007,27(4):1257-1264.

[26] 张雅杰,方媛,贺法法,等.基于土地利用变化模拟的生态风险动态评价[J].测绘空间地理信息,2016,39(1):5-8,12.

[27] 苏海民,何爱霞.基于 RS 和地统计学的福州市土地利用分析[J].自然资源学报,2010,25(1):91-99.

[28] 谢小平,陈芝聪,王芳,等.基于景观格局的太湖流域生态风险评估[J].应用生态学报,2017,28(10):3369-3377.

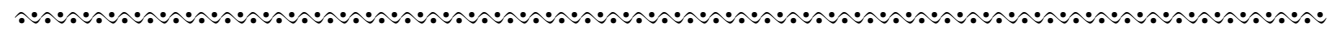
[29] 谢花林.基于景观结构和空间统计学的区域生态风险分析[J].生态学报,2008,28(10):5020-5026.

[30] 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.

[31] Anselin L. Spatial processes: Models and applications [J]. Journal of the Royal Statistical Society, 1981,147(3):59-60.

[32] 王祺,蒙古,孙宁.基于 RRM 模型和不确定性分析的喀斯特地区生态风险管理:贵阳市案例研究[J].山地学报,2016,34(4):476-484.

[33] 方广玲,香宝,王宝良,等.苏南经济快速发展地区人类活动生态风险评价:以镇江市丹徒区为例[J].应用生态学报,2014,25(4):1076-1084.



(上接第 232 页)

[15] 刘雁,刘吉平,盛连喜.松嫩平原半干旱区湿地变化与局地气候关系[J].中国科学技术大学学报,2015,45(8):655-664.

[16] Antrop M. The preoccupation of landscape research with landuse and land cover[C]// Key topics on landscape ecology. Cambridge, UK:Cambridge University Press, 2007.

[17] Verburg P H. Simulating feedbacks in land use and land cover change models[J]. Landscape Ecology, 2006,21(8):1171-1183.

[18] 郑新奇,付梅臣.景观格局空间分析技术及其应用[M]. 北京:科学出版社,2010.

[19] 樊凯,张建生,裴文娟,等.云南省三大高原湖泊流域土地利用景观格局及其稳定性分析[J].西南农业学报,2018,31(8):1706-1711.

[20] 路春燕,王宗明,刘明月,等.松嫩平原西部湿地自然保护区保护有效性遥感分析[J].中国环境科学,2015,35(2):599-609.