

建三江垦区景观结构动态变化及其土地利用 生态系统安全时空分异

林佳¹, 宋戈^{1,2}

(1. 东北大学 土地管理研究所, 沈阳 110819; 2. 东北农业大学 资源与环境学院, 哈尔滨 150030)

摘要:对受到强干扰下的区域景观结构动态变化及其土地利用生态系统安全时空分异特征进行研究,是区域生态安全和可持续利用研究的重要组成部分。以建三江垦区15个农场为研究区,利用遥感手段提取研究区1992年、2001年和2010年的景观类型信息,定量分析了研究区景观结构变化特征;定量计算研究区不同尺度的景观稳定性,并结合DPSIR模型构建研究区土地利用生态安全综合评价指标体系;对15个农场的土地利用生态安全等级进行评价,并分析了其时空分异变化特征。结果表明:1992—2010年,各农场的景观整体组合特征大体分为三种类型,景观空间格局特征亦有显著变化。在时间分异上,创业农场、二道河农场和浓江农场的土地利用生态安全评价值和等级呈先下降后上升的态势,其他农场的土地利用生态系统安全值和等级都呈逐年上升态势。在空间分布上,1992年,等级相对较高的地区集中在中西部、西北部和东部;2001年,呈现两个带状分布;2010年,土地利用生态安全等级均提升,等级低的地区镶嵌其中。这种等级变化和时空分异特征体现了不同土地利用生态系统的稳定状态,即结构和功能对干扰的抗性和恢复性水平,并体现人类的土地利用行为对保障土地的可持续利用能力起到关键作用。

关键词:景观结构;土地利用生态系统安全;景观稳定性;DPSIR模型;时空分异

中图分类号:F301.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)04-0048-07

Research on Dynamic Changes of Landscape Structure and Land Use Eco-security Spatiotemporal Variation in Jian Sanjiang Land Reclamation Area

LIN Jia¹, SONG Ge^{1,2}

(1. Institute of Land Management, Northeast University, Shenyang 110819, China;

2. College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Research for the dynamically strong disturbance regional landscape structure and the spatiotemporal variation of land use ecological security is one of very important parts of regional ecological security and sustainable utilization study. We selected Jian Sanjiang land reclamation area which includes 15 farms as the study area. We used the remote sensing (RS) tools to get the types of landscape in 1992, 2001 and 2010. We quantitatively analyzed the landscape structure characteristics changed of the study area and quantitatively calculated the landscape structure stability of each farms. We established the comprehensive evaluation indicator system based on the DPSIR model, evaluated and analyzed the eco-security level of land-use in each farm with the eco-security of land-use data. We analyzed the spatiotemporal variation of each farm. The results showed that three characters changed in the landscape components from 1992 to 2010. The landscape spatio-temporal characteristics of the study area changed dramatically. Land use ecological security evaluation values and ratings were dropped after the first upward trend in Chuang ye farm, Er daohe farm and Nong jiang farm over the time. And the values and ratings of the other farms showed the increasing trend. With respect to the spatial distribution, the distribution of high level farms concentrated in the mid-west region, northwestern and eastern in 1992; it was shown that two zonal distribution zones in 2001; the land-use ecological security levels of most areas have raised and the low-grade regional inserted in them in 2010. This

level of changes and spatial differentiation reflects the different land use ecosystem steady state (the structure and function of the level resistance to the interference). It is reflected that the land use and human behavior play a key role in securing the ability of the sustainable land use.

Keywords: landscape structure; land-use ecological system security; landscape stability; DPSIR model; spatiotemporal variation

对受到强干扰下的区域景观结构动态变化及其土地利用生态系统安全时空分异特征进行研究,是保障区域土地利用生态系统结构和功能合理健康发展的重要前提,是区域生态安全和可持续利用研究的重要组成部分^[1]。景观是由不同生态系统组合和镶嵌而成的地表综合体,这些生态系统经常以土地利用类型为表现形式^[2-3],从这一角度来看,景观等同于土地利用生态系统。在人为作用强烈的地区,土地利用生态系统结构和功能都发生了巨大变化,而土地利用生态系统是一个复杂巨系统,对其结构和功能进行研究无疑存在一定的难度。将景观生态学原理与方法应用到区域土地利用生态系统安全研究中,不必像传统的研究方法一样,将土地利用系统视为自然、社会、经济、技术、政策等子系统的综合^[4-5],而是将其视为若干个具有相对独立功能的综合性的子系统在地域空间上的组合,并以系统整体稳定性为表征^[6],对这种组合下形成的土地利用生态系统安全状态进行综合评价,能为土地利用生态系统安全研究提供了新的思路和方法。同时,对不同区域的景观结构动态变化及其土地利用生态系统安全进行动态观察和对比研究,可以体现具有不同的结构和功能的土地利用生态系统间的时空分异规律,对进一步进行区域土地利用生态系统安全格局的优化,实现生态经济社会的可持续具有重要意义。

目前,相关研究主要集中在土地利用变化及其生态安全^[5,7-8]、生态安全格局^[9-10]、景观生态安全^[11-12]等方面,多采用GIS手段和数学模型方法。但将二者相结合,并应用到土地利用生态系统安全的研究中并不多见。本文以经过40 a连续开发利用的建三江垦区所辖的15个农场为研究区,利用“3S”手段分别对15个农场的景观结构变化进行定量分析;基于景观结构变化下的研究区土地利用生态安全形成机制,从生态系统稳定的角度对不同尺度的景观稳定性进行量化研究;同时结合DPSIR模型构建景观结构动态变化下的研究区土地利用生态系统安全评价指标体系,并进行定量评价,揭示15个农场景观结构动态变化过程中的土地利用生态系统安全时空分异特征规律,可为保障区域土地利用生态系统结构和功能稳定、健康发展,实现该区域合理规划和土地资源可持续利用提供依据。

1 研究区及数据获取

本研究以黑龙江省建三江垦区所辖的15个农场为研究区域,即七星、创业、前进、洪河、前锋、胜利、勤得利、青龙山、红卫、前哨、二道河、鸭绿河、大兴、八五九和浓江农场,不包括洪河自然保护区。

本研究以1992年、2001年和2010年的三时相TM,ETM遥感影像为基础数据,以建三江垦区土地利用现状图、规划图和研究区1:5万地形图等图件为辅助图件数据。本研究其他相关数据参考来源于《黑龙江省垦区统计年鉴》(1992—2011年)和黑龙江省垦区统计部门的相关统计资料。

根据影像解译过程中对研究区主要景观类型的分析以及研究的需要,本研究共分了7种景观类型,分别为沼泽湿地、旱地、水田、林地、草地、水域、建设用地七大类;其中,沼泽湿地包括沼泽、滩涂以及水深不足6 m的水域,水域为水深大于6 m的水体。在ENVI 4.7软件的支撑下对研究区景观类型进行了提取,分类结果经过验证,分类精度符合要求。

2 研究区景观动态变化特征

传统景观生态学的景观结构是指景观的组分构成及其空间分布形式,包括景观的空间特征和非空间特征,景观格局包括景观组分的空间分布和组合特征^[6,13]。本文的景观结构变化研究包括景观组成变化和景观空间格局变化。目前有许多景观指标用来分析景观结构特征^[11-13],本文分别从各农场的景观组成特征和空间格局变化特征两方面,选取具有代表性的7个景观指数进行计算。

2.1 研究区景观组成特征变化

2.1.1 研究区景观组成特征变化研究方法 基于Fragstats 3.5软件的指数计算功能,分别对1992年、2001年和2010年研究区所辖的15个农场的斑块数量(NP)、斑块周长(PERIM)和景观形状指数(LSI)景观类型组成特征指数进行计算。

2.1.2 研究区景观组成特征计算结果 计算结果表明(表1):1992—2010年,各农场辖区(除八五九农场和大兴农场)的斑块数量随时间变化呈现先增加后减少的变化特征,1992—2000年各农场斑块数量大幅

增加,2001—2010 年斑块数量大幅减低;八五九农场和大兴农场随时间变化斑块数量减低;总体上,研究区各农场辖区的斑块数量变化十分显著。

1992—2010 年,研究区各农场辖区的斑块周长

和景观形状指数随时间变化呈现相同的变化特征。除八五九农场外,其余 14 个农场的斑块周长和景观形状指数均随时间变化而呈现先升高后降低的变化特征,各农场辖区的斑块形状总体呈复杂变化趋势。

表 1 不同时期研究区各农场辖区景观组成变化特征

农场 名称	斑块数量/个			斑块周长/万 m			景观形状指数		
	1992 年	2001 年	2010 年	1992 年	2001 年	2010 年	1992 年	2001 年	2010 年
七星	10683	13338	6310	6041550	7883400	5493630	44.1828	57.6525	40.1934
二道河	3416	7677	3942	2072700	5171280	3293070	22.3591	55.7851	35.5239
八五九	16367	11691	6616	8381970	8313210	6346080	58.0871	57.6106	43.9967
创业	3541	8380	3533	2263980	5266290	2718750	24.3911	56.7366	29.2906
前哨	5604	11477	3669	3188580	6423120	3169410	30.9872	62.4210	30.8009
前进	4719	14090	4013	2933580	9310830	3913230	26.3859	83.7455	35.1972
前锋	9544	11799	5698	5478240	7807140	5122200	42.5065	60.5768	39.7439
勤得利	14047	17993	6885	7393200	11284110	7275960	19.2098	77.0457	49.6788
大兴	9746	8920	3730	5268030	5914110	3739890	45.8728	51.4987	32.5831
洪河	3264	9392	3796	1969320	6392520	3316260	19.5486	63.4556	32.9190
浓江	5833	9866	4059	3267280	7118700	3070080	34.9119	76.2990	32.9055
红卫	5527	9056	3367	3158910	5628630	2890350	31.0062	55.2476	28.3869
胜利	6380	11809	4752	3616980	7393680	4089270	30.2019	61.7375	34.1627
青龙山	2757	8454	3575	1799160	5018790	3167400	10.2019	53.5852	33.8181
鸭绿江	4445	7544	4802	2724000	4796370	3478650	30.1061	53.0103	38.4977

2.2 研究区景观空间格局特征变化

2.2.1 研究区景观空间格局特征变化研究方法 本文基于 Fragstats 3.5 软件的指数计算功能,分别对 1992 年、2001 年和 2010 年研究区所辖的 15 个农场的斑块密度(PD)、边缘密度(ED)、平均斑块分维数(FRAC-MN)、聚合度(AI)景观类型空间格局特征指数进行计算。

2.2.2 研究区景观空间格局特征变化计算结果 计算结果表明(图 1):1992—2010 年,研究区内的八五九农场和大兴农场的斑块密度随时间变化逐渐降低,其余 13 个农场的斑块密度随时间变化呈现先升高后降低的变化特征;研究区内除八五九农场的斑块边缘密度随时间变化逐渐降低外,其余 14 个农场的斑块边缘密度均随时间变化呈现先升高后降低的变化特征;研究区所辖的 15 个农场的平均分维数均随时间变化呈现先升高后降低的变化特征;研究区内除八五九农场的聚合度指数随时间变化呈现逐级升高的变化特征外,其余 14 个农场的聚合度指数均随时间变化呈现先降低后升高的变化特征。

3 研究区土地利用生态系统安全综合评价

3.1 研究区景观格局稳定性指数测算

在以往的研究中作者已经对景观稳定性的内涵及景观结构变化下研究区土地利用生态系统安全形成机制进行了研究^[6]。相关研究表明,景观稳定性是景观面对干扰时的抗性和恢复性,具有动态性、相对

平衡性和时空尺度限制性。研究区景观结构稳定性与其土地利用生态系统安全等级呈正相关关系。

本文以 1992—2010 年为时间尺度,以研究区 30 m 分辨率影像为空间尺度,对研究区的景观格局稳定性进行研究。体现景观稳定性的指数有很多^[14-17],本文从景观多样性、镶嵌结构的复杂性和景观基质的稳定性三方面,对研究区景观整体的稳定性指数进行测算。

采用 Shannon 多样性指数表现景观的多样性,该指标计算方法同上,其值越大表示景观异质性水平越高;基于分形理论,采用结构稳定性指数(SI)表现镶嵌结构的复杂性,计算方法^[18]: $SI = |1.5 - D|$,其中, D 为分维数,其值越高说明镶嵌结构越稳定;采用基质比例稳定性指数(SM)表现景观基质的稳定性,计算方法^[14]: $SM = 1 - (0.5 - m)$,其中, m 为基质的比例,其值越高表明基质稳定性越高。

3.2 评价指标体系的构建

将 15 个农场分别看成相对独立的土地利用生态安全系统,以“驱动力—压力—状态—影响—响应(DPSIR)”的系统模型结构结合层次分析法的思想^[19-20],构建评价指标体系。由于这 15 个农场间经纬度差异较小,受到自然光热影响的差异不大,结合研究区的实际特点、景观结构稳定性指数和数据获取的难易程度,选取 25 个具有代表性的指标构建基于景观结构变化的研究区土地利用生态系统安全状态评价指标体系(表 2),其中“结构稳定性指数(S4)”和“基质稳定性指数(S5)”采用各农场范围景观稳定性计算结果。

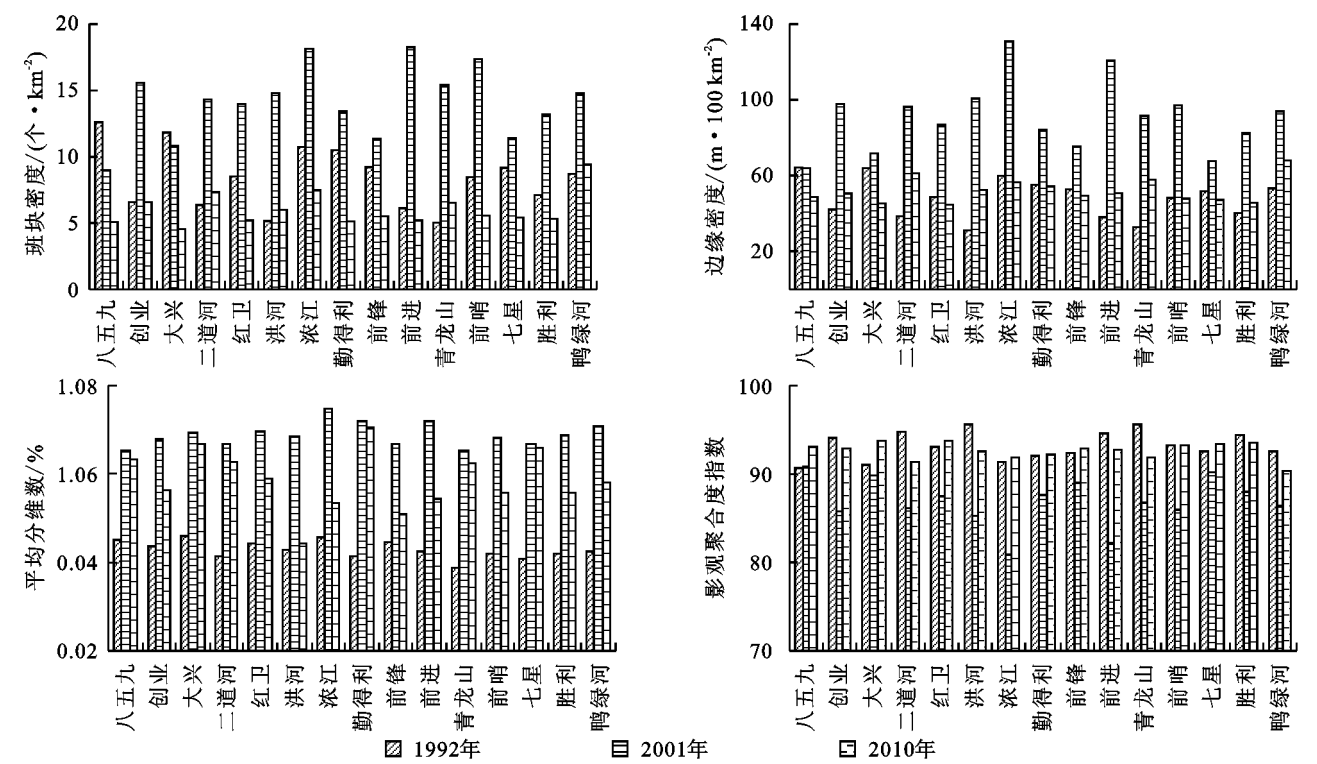


图 1 研究区景观空间格局特征指数变化

表 2 基于景观结构变化的研究区土地利用生态系统安全评价指标体系

目标层	准则层	指标层	指标说明	单位	正负性
建三江垦区土地利用生态系统安全评价	驱动力 (D)	土地垦殖指数(D_1)	已垦殖的土地面积占总面积比	%	—
		人口增长率(D_2)	人口较上年增长比例	%	—
		农业机械总动力(D_3)	机械自动化水平	万 kW	+
		区域生产总值(D_4)	经济生产动力	%	+
		建设用地占总用地面积比(D_5)	土地人为建设情况	%	—
	压力 (P)	耕地人口密度(P_1)	单位面积人口压力	人/m ²	—
		化肥实用量(P_2)	研究区当年施用化肥数量总和	t	—
		可垦荒地占总面积比(P_3)	潜在开发土地面积	%	+
		单位 GDP 能耗(P_4)	单位 GDP 增长所需要的电量	度/万元	—
	状态 (S)	景观斑块密度(S_1)	景观的破碎化程度	个/100 km ²	—
		Shannon 多样性指数(S_2)	景观多样性/异质性状态	—	+
		景观斑块边缘密度(S_3)	表示斑块与外界物质能量的交换的水平	—	+
		结构稳定性指数 SI(S_4)	景观镶嵌结构的复杂性和稳定性	—	+
		景观基质稳定性指数 SM(S_5)	基质的稳定状态	%	+
		单位耕地面积粮食产量(S_6)	耕地的粮食生产能力	%	+
	影响 (I)	景观分离指数(I_1)	景观中不同类型分布的分离度	%	—
		聚合度指数(I_2)	景观中自相邻斑块的聚合程度	%	+
		森林覆盖率(I_3)	森林面积占总面积比例	%	+
		湿地占总用地面积比(I_4)	生态性用地利用情况	%	+
		人均纯收入(I_5)	农场居民收入的平均水平	元/人	+
	响应 (R)	人工成林面积(R_1)	人工恢复林地程度	m ²	+
		固定资产投资总额(R_2)	投资建设资金	亿元	+
		地均社会从业人数(R_3)	单位面积上人口从业情况	人/km ²	+
		农田排灌能力(R_4)	农田水利化情况	m ³ /s	+
		第三产业占总产值比(I_5)	非生产性行业发展情况	%	+

3.3 指标权重的确定

本文选择熵值法确定指标权重^[6,21], 该方法是客观赋权法的一种, 在一定程度上避免了主观因素带来

的偏差。熵值法是基于系统的理念, 以物理学概念中的熵来表现系统的结构, 指标的熵值越大说明其对系统的影响越强。由于熵值法已经是很成熟的权重计

算方法,因此本部分不详细列出其计算公式。

3.4 综合评价模型的建立

为消除不同指标间的影响,本文对指标进行标准化处理,计算模型为:

$$U(x_{ij}) = \begin{cases} U(x_{ij}) \text{ 具有正效应时} \\ (x_{ij} - b_j) / (a_j - b_j) (i=1, 2, 3; j=1, \dots, 25) \\ U(x_{ij}) \text{ 具有负效应时} \\ (b_j - x_{ij}) / (b_j - a_j) (i=1, 2, 3; j=1, \dots, 25) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $U(x_{ij})$ 指第*i*年第*j*个指标的标准化值; x_{ij} 指第*i*年第*j*个指标的具体值; a_j 指第*j*个指标的最大值; b_j 指第*j*个指标的最小值。

表 3 评价等级及其标准化值

生态安全综合评价值	[0~0.30]	(0.30~0.45]	(0.45~0.6]	(0.6~0.8]	(0.8~1]
评价等级	I	II	III	IV	V
生态安全状态	不安全	临界安全	较安全	安全	理想安全

4 土地利用生态系统安全分异特征

4.1 研究区土地利用生态系统安全等级时间变化特征

各农场景观结构变化下的土地利用生态系统安全评价标准仍采用研究区范围的评价标准。各农场景观结构变化下的土地利用生态系统安全指数计算结果如下(表 4):1992—2010 年,创业农场、二道河农场和浓江农场的土地利用生态系统安全评价值和等级呈先下降后上升的态势。

除这三个农场外,其他农场的土地利用生态系统安全值和等级都呈逐年上升态势,说明人类的土地利用行为对保障景观/土地的可持续利用能力起到持续的促进作用,且作用效果明显。其中,在研究期内土地利用生态系统安全指数变化最大的是胜利农场,变化差值为 0.729 2。

1992—2001 年,勤得利农场、前进农场和洪河农场的土地利用生态系统安全等级都为临界安全状态,2001—2010 年土地利用生态系统安全等级都从临界安全状态转为安全状态,变化幅度相对较小。

青龙山农场、红卫农场和前锋农场的土地利用生态系统安全等级都从不安全状态转为较安全状态,2001—2010 年土地利用生态系统安全等级都从较安全状态转为安全状态;八五九农场、大兴农场、前哨农场和鸭绿河农场的土地利用生态系统安全等级都从不安全状态转为临界安全状态,2001—2010 年土地利用生态系统安全等级都从临界安全状态转为安全状态。

1992—2001 年,七星农场土地利用生态系统安全等级从不安全状态转为安全状态,是此时期中土地

并根据多目标综合评价法模型,求得研究区土地利用生态系统安全综合评价值。评价模型为:

$$ESI = \sum_{j=1}^p W_j \times U(x_{ij}) \quad (2)$$

式中:ESI 为研究区土地利用生态系统安全综合评价值; W_j 为第*j*个指标的权重; $U(x_{ij})$ 指第*i*年第*j*个指标的标准化值。

3.5 研究区土地利用生态系统安全评价标准

根据模型计算的生态安全综合评价值处于 0~1,越趋近于 1 生态安全水平越高,越趋近于 0 生态安全水平越低。由于目前尚未形成统一的评价标准,本文参照相关研究^[13-14,20-22],针对本研究区设计 5 级评价标准(表 3)。

利用生态系统安全值变化幅度最大的农场,也是 15 个农场中最早进入安全状态的农场之一,另一个较早进入安全状态的农场是浓江。2010 年,15 个农场都处于较安全等级以上的等级状态,其中以胜利农场的土地利用生态系统安全等级最高,达到了理想安全状态,以浓江农场最低,仅达到较安全状态,其余农场都处于安全等级状态。

表 4 各农场景观结构变化下的土地利用生态系统安全指数计算结果

农场名称	评价结果	1992 年	2001 年	2010 年
八五九	评价值	0.2329	0.4044	0.7530
胜利	评价值	0.1328	0.4511	0.8620
七星	评价值	0.1849	0.5962	0.6761
勤得利	评价值	0.3333	0.4212	0.6726
大兴	评价值	0.2781	0.3749	0.7361
青龙山	评价值	0.1946	0.5919	0.6147
前进	评价值	0.3017	0.4385	0.6512
创业	评价值	0.5065	0.4307	0.5005
红卫	评价值	0.2879	0.4540	0.6961
前哨	评价值	0.2954	0.3570	0.7518
前锋	评价值	0.2633	0.5186	0.6808
洪河	评价值	0.3748	0.4429	0.6490
鸭绿河	评价值	0.2357	0.3968	0.7565
二道河	评价值	0.3826	0.2796	0.6988
浓江	评价值	0.4487	0.4744	0.5671

4.2 研究区土地利用生态系统安全等级空间变化特征

从各农场等级的空间分布特征来看(图 2),1992 年各农场土地利用生态系统安全水平都不高,“不安全”等级的农场占近研究区面积近一半,等级相对较高的地区集中在中西部、西北部和东部。勤得利农场、浓江农场、前进农场、洪河农场和创业农场形成西

北部—中西部的相对高安全团聚区域,东部地区只有二道河农场处于临界安全等级,其他农场都处于不安全等级状态。

2001年各农场的土地利用生态系统安全等级总体呈现上升趋势,“临界安全”等级和“较安全”等级状态成为研究区土地利用生态系统安全等级图的背景,相对较高等级的地区向西移动,形成浓江农场—青龙

山农场—七星农场和前锋农场—胜利农场—红卫农场的两个带状分布。

2010年各农场的土地利用生态系统安全等级总体呈现继续上升趋势,土地利用生态系统安全等级均匀扩散,“安全等级”状态成为研究区土地利用生态系统安全等级图的背景,并占研究区总面积的近70%,处于其他等级的农场镶嵌其中。

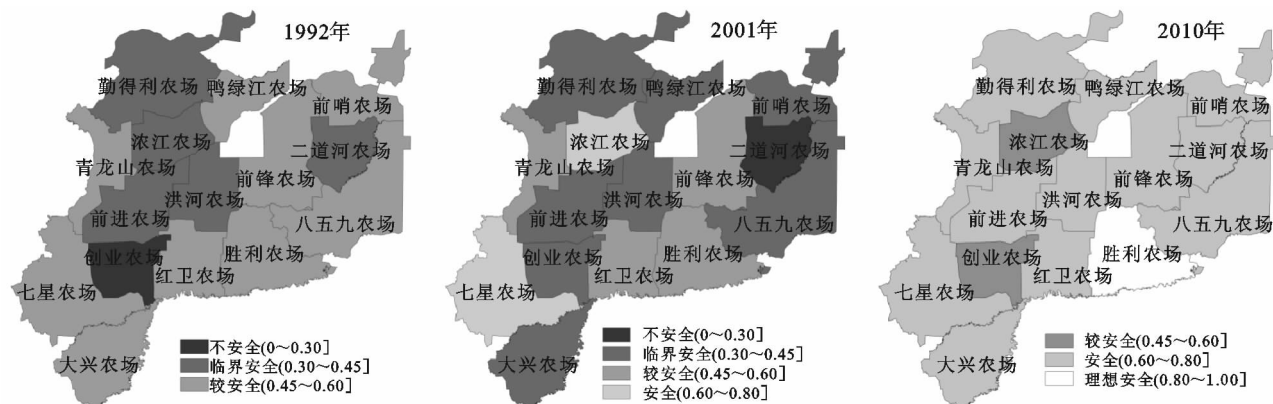


图2 不同年份各农场土地利用生态系统安全等级分布状况

5 结论与讨论

本文基于景观研究尺度和系统思想,对建三江垦区的15个农场景观结构动态变化及其土地利用生态系统安全时空分异特征进行了研究。对各农场景观结构动态变化特征研究表明,1992—2010年,各农场组合和景观空间格局都有显著的变化特征。各指数变化特征均说明,研究区景观受到人类活动的严重干扰,研究区各农场景观结构普遍经历着由简单变复杂,再由复杂变简单的演变过程。同时,这也与景观稳定性的计算结果相符合,说明人类活动对系统变化起关键作用。

对研究区1992—2010年的各农场范围景观结构变化及其土地利用生态系统安全评价结果的时空分异特征分析表明,创业农场、二道河农场和浓江农场的土地利用生态系统安全评价价值和等级呈先下降后上升的态势,说明人类的土地利用行为对研究区景观结构先起到了破坏作用,后又起到了恢复和保障作用,使景观结构表现出对干扰有较强的抗性和恢复性,呈现稳定状态,从而对土地可持续利用起保障作用;除这三个农场外,其他农场的土地利用生态系统安全值和等级都呈逐年上升态势,说明人类的土地利用行为对保障景观/土地的可持续利用能力起到持续的促进作用,且作用效果明显。其中,在研究期内土地利用生态系统安全指数变化最大的是胜利农场,说明人为作用最强烈的就是这个地区,并且人类的土地利用行为对保障景观/土地的可持续利用能力起到持续的促进作用最明显。

在景观尺度上,可以借鉴景观生态生态学的理论

和方法以及系统理论方法,对研究区景观结构动态变化及其土地利用生态系统变化进行研究。从研究结果来看,在人—地关系作用强烈的地区,景观结构的变化导致了景观稳定性的规律性变化,与其相对应的土地利用生态系统也发生规律性的演化,从而形成了土地利用生态系统安全状态,并因为系统结构的差异呈现时空分异特征。但值得注意的是,这里的土地利用生态系统安全状态所表达的内涵是评价时点的土地利用生态系统结构是否具有较好的稳定性,即系统对干扰是否具有很好的抗性和恢复性,并不是代表该系统在该时点的生态状态。因此,存在系统当前生态状态并不理想,但是由于其具有很好的系统稳定性,而将其视为生态安全状态安全的情况。也正因为如此,才会出现处于理想安全状态下的区域,但这并不代表其生态情况为理想状态,只能说明该系统在评价时点所表现出来的系统结构和功能较为完善,利于承担更高的生态风险。这一思想可以被应用到区域规划和生态环境整治中。

无论是景观还是土地利用系统研究都是大尺度的研究,其研究理论和规律性成果都仅适用于区域及以上尺度现象的阐释,如果尺度过小,可能会呈现出其他规律和特点,因此本研究并不适用于小尺度的研究。对于土地利用系统漫长的演化历程而言,要在有限的研究期内探讨其演化规律,典型区域的选择就显得尤为重要。本文以受到人类集中利用和开发的建三江垦区为研究区,使短期内能观察和分析该地区的土地利用系统演化规律成为可能。也正是由于人为景观不断替代了自然景观,成为研究区的景观基质,景观与

土地利用系统的本质相统一,这就为本研究结果和思想的推广创造了空间。并且,本文的结论表明,在这些区域,人为作用方向和强度对土地利用生态系统结构的演化尤为重要,因此,下一步以此为基础的土地利用生态系统结构的优化及区域生态安全格局的构建研究更为重要,这将对保障区域土地利用系统健康和实现区域可持续发展具有重要意义。

参考文献:

- [1] 蒙古军,燕群,向芸芸. 鄂尔多斯土地利用生态安全格局优化及方案评价[J]. 中国沙漠, 2014, 34(2): 590-596.
- [2] Haber W. Landscape ecology as a bridge from ecosystems to human ecology[J]. Ecological Research, 2004, 19(1): 99-106.
- [3] 傅伯杰,陈利顶,王军,等. 土地利用结构与生态过程[J]. 第四季研究, 2003, 23(3): 247-255.
- [4] 刘彦随. 区域土地利用系统优化调控的机理与模式[J]. 资源科学, 1999, 21(4): 60-65.
- [5] 蒙古军,赵春红,刘明达. 基于土地利用变化的区域生态安全评价:以鄂尔多斯市为例[J]. 自然资源学报, 2011, 26(4): 578-590.
- [6] 林佳,宋戈,宋思铭. 景观结构动态变化及其土地利用生态安全:以建三江垦区为例[J]. 生态学报, 2011, 31(20): 5918-5927.
- [7] 马玉妍,马艳敏,于万辉,等. 松嫩平原土地利用生态安全评价与预测[J]. 水土保持通报, 2014, 34(2): 262-266.
- [8] 喻锋,李晓兵,王宏,等. 皇甫川流域土地利用变化与生态安全评价[J]. 地理学报, 2006, 61(6): 645-653.
- [9] 刘洋,蒙古军,朱利凯. 区域生态安全格局研究进展[J]. 生态学报, 2010, 30(24): 6980-6989.
- [10] 苏泳娴,张虹鸥,陈修治,等. 佛山市高明区生态安全格局和建设用地扩展预案[J]. 生态学报, 2013, 33(5): 1524-1534.
- [11] 杨青生,乔纪纲,艾彬. 快速城市化地区景观生态安全时空演化过程分析:以东莞市为例[J]. 生态学报, 2013, 33(4): 1230-1239.
- [12] 游巍斌,何东进,巫丽芸,等. 武夷山风景名胜区景观生态安全度时空分异规律[J]. 生态学报, 2011, 31(21): 6317-6327.
- [13] 肖笃宁,李秀珍,高峻,等. 景观生态学[M]. 北京:科学出版社, 2010.
- [14] 宫兆宁,张翼然,宫辉力,等. 北京湿地景观格局演变特征与驱动机制分析[J]. 地理学报, 2011, 66(1): 77-86.
- [15] 王旭丽,刘学录. 基于 RS 的祁连山东段山地景观稳定性分析[J]. 遥感技术与应用, 2009, 24(5): 665-669.
- [16] 肖化顺,付春风,张贵. 流溪河国家森林公园森林景观稳定性评价[J]. 中南林业科技大学学报:自然科学版, 2007, 27(1): 88-92.
- [17] 张昊,张伟华,李文忠,等. 环境水容量对黄家寨镇景观稳定性影响的研究[J]. 水土保持研究, 2005, 12(6): 191-193.
- [18] 杨国安,甘国辉. 基于分形理论的北京市土地利用空间格局变化研究[J]. 系统工程理论与实践, 2004, 24(10): 131-137.
- [19] Fu B, Lu Y. The progress and perspectives of landscape ecology in China[J]. Progress in Physical Geography, 2006, 30(2): 232-244.
- [20] 杨春红,张正栋,田楠楠,等. 基于 P-S-R 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.
- [21] 宋戈,林佳,孙丽娜. 黑龙江省东部垦区耕地利用效益时空分异特征[J]. 经济地理, 2010, 30(12): 2061-2066.
- [22] 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(1): 234-238.

(上接第 47 页)

- [18] 魏丹,刘智勇,李小冰. SWAT 模型及 SUFI-2 算法在秃尾河上游流域径流模拟中的应用[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(6): 200-206.
- [19] Rocha J, Roebeling P, Rial-Rivas M E. Assessing the impacts of sustainable agricultural practices for water quality improvements in the Vouga catchment (Portugal) using the SWAT model[J]. Science of the Total Environment, 2015, 536: 48-58.
- [20] 袁宇志,张正栋,蒙金华. 基于 SWAT 模型的流溪河流域土地利用与气候变化对径流的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(4): 989-998.
- [21] 王学,张祖陆,宁吉才. 基于 SWAT 模型的白马河流域土地利用变化的径流响应[J]. 生态学杂志, 2013, 32(1): 186-194.
- [22] 姚海芳,师长兴,邵文伟,等. 基于 SWAT 的内蒙古西柳沟孔兑径流模拟研究[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(6): 139-144.
- [23] Abbaspour K C, Vejdani M, Haghighat S. SWAT-CUP calibration and uncertainty programs for SWAT [J]. Modsim International Congress on Modelling & Simulation Land Water & Environmental Management Integrated Systems for Sustainability, 2007, 364(3): 1603-1609.
- [24] 宋艳华,马金辉. SWAT 模型辅助下的生态恢复水文响应:以陇西黄土高原华家岭南河流域为例[J]. 生态学报, 2008, 28(2): 636-644.