

新疆玛纳斯河流域景观格局变化的生态安全分析

梁二敏, 张军民

(石河子大学 理学院, 新疆 石河子 832003)

摘要:景观是资源要素、环境因子和生态过程的空间异质形态,其格局变化综合反映了各种生态关系及其稳定状态。在Erdas 9.0和ArcGIS 10.0技术平台上,采用3期同时期Landsat TM影像数据,运用景观格局指数和空间分析方法构建生态安全指数,借助破碎度、干扰度、分离度景观格局指数以及景观类型的脆弱度等生态安全指标定量评价近10年新疆玛纳斯河流域景观格局生态安全的变化。结果表明:(1)近10年流域景观格局生态安全度由0.362下降到0.354后又略微上升到0.359,呈现先恶化再好转的“V”字型变化,说明2000年以来的西部大开发造成了新的生态安全问题,而2005年实施的节水灌溉及退耕还草等工程产生了明显的生态治理成效;(2)草地受干扰的程度由0.234降为0.239,未利用地由0.344降为0.300,建设用地由1.316降为0.877,其生态安全度有所上升;林地受干扰的程度由0.483升为0.682,水域由0.413升为0.450,耕地由0.242升为0.258,其生态安全度明显下降;(3)研究区50%以上的面积处于重警区,并且重警区的面积在不断增加;较安全区的面积占研究区面积的20%左右,虽然面积较小但却不断增加;预警区占研究区的面积由24.96%降到10.10%,减少趋势明显,说明近10年玛纳斯河流域的生态环境呈缓慢恶化状态。

关键词:景观格局;生态安全;玛纳斯河流域

中图分类号:X32

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)03-0170-06

Analysis of Ecological Security of Landscape Pattern in Manas River Watershed of Xinjiang Uygur Autonomous Region

LIANG Ermin, ZHANG Junmin

(College of Sciences, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China)

Abstract: Landscape is a form of the spatial heterogeneity based on resource factors, environmental factors and ecological process, the change of its pattern comprehensively reflects the various ecological relationship and its steady state. Based on the Erdas 9.0 and the ArcGIS 10.0, using three periods of Landsat TM data at the same time, the principle of the landscape pattern index and spatial analysis methods, we set up ecological security index, and quantitatively evaluated the changes of ecological security status according to the isolation, fragmentation as ecological security index in Xinjiang Manas River Basin in recent 10 years. The results show that: (1) nearly a decade the overall ecological security index of landscape pattern dropped from 0.362 to 0.354 and then rose slightly to 0.359, it first changed to deterioration then became better with the V-shape, illustrating the development of the western region caused a new ecological security problems since 2000, the 2005 implementation of water-saving irrigation and returning farmland to grassland and other projects led to a obvious ecological management result; (2) the interference degree of grass dropped from 0.234 to 0.239, the unused land fell from 0.344 to 0.300, construction land fell from 1.316 to 0.877, the ecological security degree had increased; interference degree of woodland rose from 0.483 to 0.682, the water body rose from 0.413 to 0.450, cultivated land rose from 0.242 to 0.258, ecological security degree had fallen markedly; (3) more than 50% of the study area was in the serious area, and the area of serious area was increasing, the safety area accounted for about 20% of study area, the area was small, but increasingly growing; the warning areas in the study area had dropped from 24.96% to 10.10%, the trend of reducing was obvious,

收稿日期:2015-05-21

修回日期:2015-06-16

资助项目:国家自然科学基金“玛纳斯河流域绿洲经济—生态景观空间分异机理研究”(41361025)

第一作者:梁二敏(1990—),女,河南郑州人,硕士研究生,研究方向为绿洲景观生态安全。E-mail:lem_ljgst@163.com

通信作者:张军民(1964—),男,新疆吐鲁番人,教授,博士生导师、主要从事绿洲景观变化及生态安全研究。E-mail:zjm_tea@shzu.com

illustrating that the ecological environment of Manas River Basin trended to the slight deterioration.

Keywords: landscape pattern; ecological security; the Manas River Basin

景观是由不同生态系统组成的地表综合体,表现为不同的土地利用或土地覆盖类型,形成不同时空尺度及生态功能的景观格局。因此,景观格局异质性及其生态过程关联是景观生态学研究的基本前提^[1],景观格局变化过程为研究生态系统健康状态(生态安全)提供了全景信息(综合途径)。

景观格局模拟、景观生态评价及景观功能规划始终是景观生态学研究的核心命题,人类活动影响的主导作用受到普遍重视^[1-2]。景观模拟主要关注格局变化与生态过程的综合分析,重点是通过定量识别驱动机制以解析格局变化的生态效益;作为主要分析手段的景观指数的选择和构建也更加强调生态意义及区域内涵^[3-4]。景观生态评价主要基于胁迫受体界定风险源、风险作用、风险危害的分析评估,关注景观类型及形态的多样性、破碎化及连通性、稳定性等特征,用景观指数模型测度生态风险因子及生态安全状态,评价生物多样性及生态服务价值损益水平及重构机理^[5-6]。总体上,景观格局与生态过程相互作用关系的研究已从单一风险评估发展到多风险源、多受体复合生态系统评估,建立了基于不同时空尺度的景观格局—生态过程—生态服务关联模型及概念框架^[7-8]。

绿洲景观演变的生态环境效益一直是干旱区景观生态安全研究的热点问题,绿洲景观廊道的连通作用、水土资源配置与景观格局耦合、格局变化与绿洲稳定性等领域的研究取得了明显进展^[9-10],基于流域尺度的景观格局生态评价成为深化绿洲化、荒漠化研究的重要方向。比较而言,绿洲景观生态安全的研究在理论和实证方面都有待深入,一方面因为景观格局与生态过程的相互关系及调控原理极其复杂,针对绿洲这种特定的格局—过程关系更是难以准确界定和量化^[11];同时,广泛使用的景观格局度量指标及以Fragstats为代表的相关计算软件,大多因其生态意义不明确和作用关系不确切而失之偏颇,使格局与过程不具有一致性,或景观指数对数据源及景观功能的敏感性、解释度不精确等,最关键的是绿洲景观在干旱区的发生和分布具有局域性、分散性特征,其生态过程及功能又具有擅变性、脆弱性特质,很难用通识性景观格局指数及生态过程模型开展定量研究。本研究根据干旱区景观变化及格局分异的特殊规律,从外部胁迫和内生适应两个维度选择了互相补充的景观分析指标,对景观格局变化指数及计算参数进行了修正,以期更好地透视干旱区内陆河流域景观格局变

化的生态效益,为流域生态资源有效开发和合理配置提供科学依据。

1 研究区概况

玛纳斯河流域位于新疆天山南坡中部、准噶尔盆地南部,地理位置为 $85^{\circ}01'—86^{\circ}32'E, 43^{\circ}27'—45^{\circ}21'N$,由发源于北天山中部依连哈比尔尕山(5 242.5 m)的塔西河、玛纳斯河、宁家河、金沟河及八音沟河沿SSE-NNW方向冲积而成。上游为海拔600 m以上的低山丘陵和900 m以上的高山带,面积约11 107 km²;河流出山口进入盆地后(1 000 m)依次形成冲积—洪积扇平原、冲积平原及三角洲平原(绿洲),面积约6 543 km²,海拔约300~600 m,下游河道游移于沙漠边缘,最终消失于玛纳斯湖(257 m)。自然状态下,绿洲平原区以河流为中心向两岸及下游依次发育绿洲、过渡带、荒漠;植被从有林地、灌木林、疏林地过渡到高、中、低盖度草地直至沙漠、戈壁。植被由宽渐窄、盖度由密到稀,呈三角形状逐渐尖灭于荒漠之中^[12]。因此,水土资源利用及土地资源利用决定和影响着流域水文生态过程及生态系统安全。

2 研究方法

2.1 数据来源及处理方法

采用玛纳斯河流域2000年、2005年和2010年的Landsat TM影像,行列号为144/28,144/29,144/30,空间分辨率为30 m,采集时间为6—8月,并且以2010年土地利用现状图(1:10万)、地形图(1:5万)等为辅助数据,数据来源为<http://www.usgs.gov/>和地理空间数据云。景观分类根据国家一级土地利用一级分类标准,将研究区的景观划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地6种景观类型,运用ENVI 4.8软件,选择5、4、3波段进行假彩色合成,对研究区域的各期的遥感影像进行几何校正,图像增强等处理,根据野外考察及相关资料,利用最大似然法进行监督分类,最后根据研究区的土地利用现状图对分类后影像进行修正,得到3期玛纳斯河流域的景观类型分布图,为了验证解译的精度,分别对解译的3期结果进行随机抽样,并与野外的采样结果进行精度检验,验证结果表明影像解译精度分别为0.812,0.825,0.815,基本可以达到研究所需要求。借助Fragstats 3.3软件计算景观指数,从景观层次分析总体景观格局状况。

2.2 景观生态安全指数的构建

本文在对玛纳斯河流域景观格局分析的基础上,全面考虑景观格局指数的生态学意义,采用破碎度、分离度、优势度等景观格局指数和景观类型脆弱度为评价指标研究玛纳斯河流域景观格局生态安全,并通过景观格局与生态环境之间的关联关系,建立景观格局指数与景观格局生态安全度之间的定量化表达。

2.2.1 景观干扰度指数 景观格局指数是指能够高度浓缩景观格局信息,反映其结构组成和空间配置某些方面特征的简单定量指标,是研究景观格局广泛使用的一种定量研究方法。

景观破碎度指数能够表征景观在一定时间内由单一、连通的整体趋向于复杂、异质的斑块镶嵌体过程,此值越大,表明景观单元内部稳定性越低,对应的景观生态系统稳定性也越低;景观分离度指数表征某一景观类型中不同元素或斑块个体分布分离的程度,分离程度越大,表明景观在地域分布上越分散,景观分布越复杂,破碎化程度也越高;景观优势度指数衡量斑块在景观中的重要地位,反映斑块对景观格局变化影响的大小^[13]。

对以上 3 种指数进行权重叠加,构建反映景观受不同干扰程度(尤其是人为干扰)的景观干扰度指数。其公式为:

$$U_i = aC_i + bF_i + cD_i \quad (1)$$

$$C_i = N_i / A_i \quad (2)$$

$$F_i = \sqrt{S_i} / 2P_i \quad (3)$$

$$S_i = N_i / A \quad (4)$$

$$P_i = A_i / A \quad (5)$$

$$D_i = dL_i + eP_i \quad (6)$$

$$L_i = N_i / N \quad (7)$$

式中: U_i ——景观类型干扰度; C_i ——景观类型破碎度; F_i ——景观类型分离度; D_i ——景观类型优势度; a, b, c ——破碎度、分离度和优势度的权重; L_i ——景观类型相对密度; P_i ——景观类型相对盖度; d, e ——景观类型相对密度与景观类型相对盖度的权重; S_i ——景观类型距离指数; N_i ——景观类型斑块数量; N ——景观斑块总数量; A_i ——景观类型斑块面积; A ——景观总面积。

权重反映了各指数对景观所表征的生态环境不同的影响程度。干旱区景观格局独具特色,绿洲外围及周边以荒草地和小半灌木为基质,它构成了未利用土地的功能特征和生态禀赋,绿洲内部以耕地为基质,粮棉等农业用地景观决定着已利用土地的生态属性;河流渠系作为廊道连接着绿洲内外不同的生态功能单元,水域及建设用地作为节点控制着要素流动及

分配。据此,在借鉴相关研究成果基础上,认为在绿洲干扰度计算中,景观优势度指数最为重要,其次为景观破碎度和景观分离度,其权重分别为 0.3, 0.2, 0.5^[14];在优势度计算中,相对盖度最为重要,其次为相对密度,其权重分别为 0.6, 0.4^[15]。

2.2.2 景观脆弱度指数 景观脆弱度表示景观类型所代表的生态系统在受到外界干扰时的易损性,此值大小与其在景观自然演替过程中所处的阶段有关,一般情况下,处于初级演替阶段、食物链结构简单、生物多样性指数小的生态系统较为脆弱^[11]。但是人类活动是该区生态系统的主要干扰因素之一,而土地利用程度不仅反映了土地利用中土地本身的自然属性,而且反映了人为因素与自然因素的综合效应。研究中把土地利用类型与景观脆弱性联系,耕地=6,未利用地=5,草地=4,水域=3,林地=2,建设用地=1。其中,耕地最为脆弱,建设用地最稳定,并对各数值进行专家赋值法,得到各自的脆弱度指数^[16]。

本文采用各景观类型干扰度和脆弱度来表征景观类型生态安全程度。干扰度越大景观脆弱性越强区域生态环境安全程度就越低,根据生态安全与景观格局之间的经验关系可确定生态安全与景观格局之间的关系,以下公式见参考文献^[15, 17]。

$$ES_i = 1 - 10U_i \cdot Q_i \quad (8)$$

$$ES = \sum_{i=1}^n ES_i \cdot Q_i \quad (9)$$

式中: ES_i ——景观类型生态安全度; U_i ——景观干扰度; Q_i ——景观类型脆弱度; ES ——景观安全度; n ——景观类型数。

3 结果与分析

3.1 景观格局变化特征

结合研究区 2000 年、2005 年和 2010 年景观类型图,根据上述计算公式,利用 Fragstats 3.3 景观指数统计软件和 Excel 2010 的统计分析功能计算各类景观的格局指数。

近 10 年,玛纳斯河流域各景观类型的利用结构发生了明显的变化。由表 1 可知,未利用地是研究区域的主要景观,分布于全区,其次是耕地,主要分布于玛纳斯河流域的中游以及中下游,二者之和约为 70%。总体上是草地、耕地和建设用地的面积逐渐增加,未利用地、林地和水域面积逐渐减少。其中面积变化速率最快的是建设用地为 7.22%,面积增加到 1 436.78 km²,表明了生态环境受人类活动频繁、较强的扰动,也说明近几年研究区的城市人口增加,城镇化发展较快;其次是林地,林地的变化速率也较快,林地的面积在不

断地减少,由于人口的增加,对耕地面积的需求也越来越大,大部分的林地转化为耕地;再次,耕地的变化

速率相对来说也较快,面积增加最多,增加 1 751.9 km²,所占面积的比例也增加到 23%。

表 1 玛纳斯河流域 2000—2010 年各土地利用类型面积

景观类型	2000 年			2005 年			2010 年		
	面积/km ²	面积百分比/%	斑块数/个	面积/km ²	面积百分比/%	斑块数/个	面积/km ²	面积百分比/%	斑块数/个
草地	4323.96	0.13	864	4559.16	0.15	1054	5618.56	0.18	1067
未利用地	17651.76	0.54	3062	14039.64	0.48	2652	14561.60	0.46	2336
林地	2497.30	0.08	1350	2188.32	0.07	1255	1498.84	0.05	1165
水域	1941.08	0.06	768	1859.58	0.06	842	1727.92	0.05	755
建设用地	834.31	0.03	1344	1116.07	0.04	1633	1436.78	0.04	1582
耕地	5365.08	0.16	1048	6587.22	0.21	1351	7116.94	0.22	1448

3.2 景观格局指数变化分析

由表 2 可知,从景观的完整程度看,整个研究区域景观破碎化程度在不断加剧。对于每个地类来讲,

林地、水域和耕地的破碎化程度在不断加剧,建设用地的破碎化程度在不断降低,草地和未利用地的破碎化程度先增加后降低。

表 2 景观格局生态安全指数

景观类型	年份	破碎度	优势度	分离度	干扰度	脆弱度	生态安全度
草地	2000	0.200	0.121	0.614	0.243	0.19	0.537
	2005	0.231	0.135	0.630	0.263	0.19	0.499
	2010	0.190	0.157	0.520	0.239	0.19	0.544
未利用地	2000	0.173	0.470	0.283	0.344	0.24	0.182
	2005	0.176	0.409	0.303	0.318	0.24	0.243
	2010	0.160	0.385	0.297	0.300	0.24	0.286
林地	2000	0.541	0.110	1.329	0.483	0.10	0.540
	2005	0.574	0.099	1.433	0.508	0.10	0.516
	2010	0.780	0.084	2.036	0.682	0.10	0.357
水域	2000	0.396	0.072	1.289	0.413	0.14	0.410
	2005	0.453	0.074	1.381	0.449	0.14	0.358
	2010	0.440	0.069	1.421	0.450	0.14	0.357
建设用地	2000	1.611	0.079	3.968	1.316	0.05	0.373
	2005	1.463	0.096	3.205	1.128	0.05	0.463
	2010	1.100	0.103	2.475	0.877	0.05	0.583
耕地	2000	0.195	0.148	0.545	0.242	0.29	0.309
	2005	0.205	0.188	0.494	0.254	0.29	0.274
	2010	0.200	0.203	0.478	0.258	0.29	0.263

从景观的优势度看,2000—2010 年优势度最大的是未利用地,分别为:0.470,0.409,0.385,其次是耕地分别为:0.148,0.188,0.203。草地的优势度也在不断增加。说明近 10 年,研究区域的未利用地和耕地的面积发生了较大的变化,但始终是研究区域的优势景观,对景观结构和类型的变化产生很大影响。

从景观的分离度看,近 10 年来,分离度最大的为建设用地,其次是林地和水域。分离度越大,表明景观在地域分布上越分散,景观分布越复杂,破碎化程度也越高。

综上,近 10 年建设用地面积增加最快,其干扰度

指数最大,其次是林地和耕地。林地面积不断减少,耕地面积不断增加,主要是大量的毁林开荒,过度伐木,导致林地面积减少,分离度增大,森林生态系统遭到破坏。由于本区降水量较少,干燥程度很高,地面以疏松的沙性物质为主,长期强烈的开发活动导致大面积沙漠化、盐碱地出现(未利用地包括沙地和盐碱地),结果会使脆弱性景观所占比重增大,景观平均质量下降。

3.3 景观格局生态安全评价

由表 2 和图 1 可以看出,10 年间林地、水域和耕地景观的生态安全度均有所下降,主要原因是在市场

经济的驱动下,棉花的种植面积迅速增加,导致土地利用程度不断上升,使大量的林地和未利用地被开垦为耕地,导致了林地面积的减少,同时由于棉花种植需要大量的灌溉用水,使水域面积减小。而草地、未利用地和建设用地的安全度均是增加的,是因为流域内的大量自然景观被人工景观所替代,而这种干扰对人工景观是有利的。

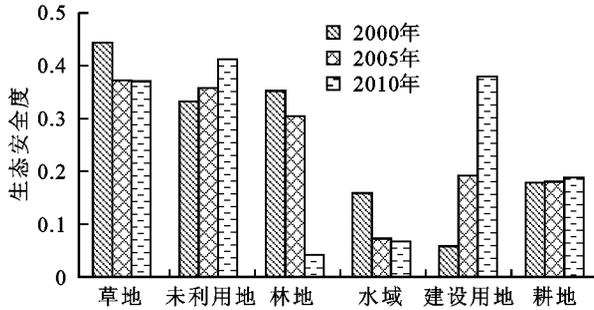


图1 玛纳斯河流域土地利用类型生态安全度

表3 玛纳斯河流域景观格局生态安全预警

景观生态安全等级	景观生态安全度	2000年			2005年			2010年		
		景观类型	景观面积/km ²	面积比重/%	景观类型	景观面积/km ²	面积比重/%	景观类型	景观面积/km ²	面积比重/%
重警区	0~0.3	未利用地	17651.76	52.13	未利用地、耕地	21626.82	68.99	未利用地、耕地	21678.55	67.83
预警区	0.3~0.5	建设用地、耕地、水域	8140.47	24.96	建设用地、水域	2975.64	9.49	林地、水域	3226.76	10.10
较安全区	0.5~0.8	林地、草地	6821.26	20.92	林地、草地	6747.48	21.52	草地、建设用地	7055.34	22.08

10年间,玛纳斯河流域的景观类型安全等级发生了很大的改变,重警区和较安全区的面积增加,预警区的面积减少。其中重警区的面积增加了4 026.79 km²,较安全区面积增加了234.08 km²,预警区的面积减少了4 913.71 km²。耕地景观的安全等级由预警区变为重警区,建设用地由预警区变为较安全区,林地由较安全区变为预警区。可能是近几年人类干扰活动加强,使耕地、建设用地和林地的生态安全发生了很大变化。

由图2可以看出,处于重警区的景观类型分布在研究区的上游和下游,主要是未利用地,原因是人口数量的增加导致了大量未利用地的开发利用,人类活动对其干扰强度比较大,2005年和2010年处于中游的耕地由预警区变为重警区,说明近几年在绿洲地区人类活动对耕地的干扰度比较明显;处于预警区的景观类型大部分分布在研究区的中游和中下游,但是由于耕地景观安全度的改变使预警区越来越集中于中下游地区;处于较安全区的景观类型分布于研究区的中上游,主要是林地和草地的分布区,较安全区面积增加说明近几年退耕还林还草的工程取得了一定成效。

采用各景观类型生态安全度与该景观类型面积比重的乘积合计,可数量化表征玛纳斯河流域景观格局生态安全的整体水平,结果见图3,玛纳斯河流

根据参考文献并结合自己的研究结果将研究区景观格局生态安全划为3个等级^[18]:重警区[0~0.3]、预警区[0.3~0.5]、较安全区[0.5~0.8]。

从2000年各景观类型的生态安全等级看,未利用地处于重警区,占流域面积的52.13%;建设用地、耕地和水域处于预警区,占流域面积的24.96%;林地、草地处于较安全区,占流域面积的20.92%。从2005年各景观类型的生态安全等级看,其中未利用地和耕地处于重警区,占流域面积的68.99%;建设用地、水域和草地处于中警区,占流域面积的24.03%;林地处于较安全区,占流域面积的7.21%。从2010年各景观类型的生态安全等级看,未利用地和耕地处于重警区,占流域面积的67.83%;林地和水域处于中警区,占流域面积的10.10%;草地和建设用地处于较安全区,占流域面积的22.08%。

域的景观格局生态安全度呈“V”字型变化。其中2000年玛纳斯河流域景观格局整体生态安全水平为0.362,2005年的为0.354,2010年为0.359,景观格局整体生态安全水平略有下降。

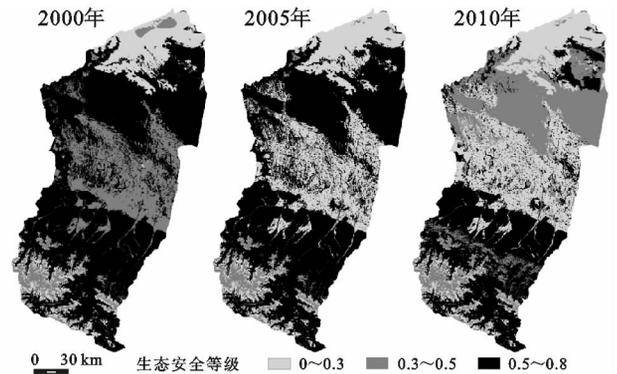


图2 玛纳斯河流域景观格局生态安全等级

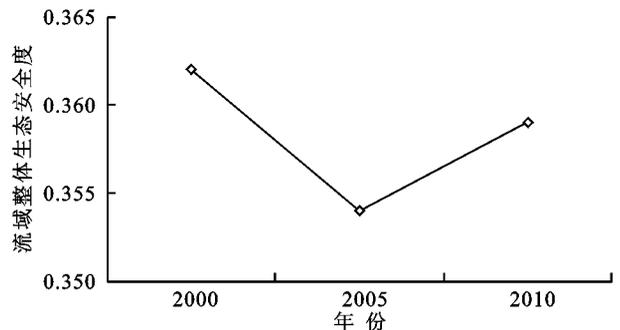


图3 整体景观格局生态安全度

4 结论与讨论

(1) 近10年玛纳斯河流域景观结构发生了显著的变化,草地、耕地和建设用地面积呈现增加的趋势,林地、未利用地和水域的面积则表现出减少的趋势,其中建设用地面积增加的最快,由于城市人口不断增加,研究区城镇化发展较快。

(2) 草地受干扰的程度由0.234降为0.239,未利用地由0.344降为0.300,建设用地由1.316降为0.877,其生态安全度有所上升;林地受干扰的程度由0.483升为0.682,水域由0.413升为0.450,耕地由0.242升为0.258,其生态安全度明显下降。说明人类活动对流域景观的干扰度较大。

(3) 2000—2010年,研究区内处于重警区的景观类型的面积在不断的增加,耕地的生态安全度由预警区变为重警区;处于预警区景观类型的面积在逐渐减少,建设用地由预警区变为较安全区,说明虽然建设用地变化受人类干扰的程度较大,但是这种干扰是有利的;处于较安全区景观类型面积呈现出增加的趋势,但是增加的幅度较小,其中,林地由较安全区变为预警区,由于人口的增加导致对耕地面积需求的增加,大部分的林地被开垦为耕地,使林地的生态安全度降低。

(4) 总之,2000年景观格局生态安全度为0.362,2010年的为0.359,2005年生态安全度最低为0.354,整体生态安全度呈“V”字型变化,说明2000年以来的西部大开发造成了新的生态安全问题,而2005年实施的节水灌溉及退耕还草等工程产生了明显的生态治理成效,生态环境逐渐向好的方向发展。但是2010年景观格局生态安全程度较2000年整体有所下降,主要是由于近10年来人类活动对流域景观干扰程度加重,使景观格局的差异变大,玛纳斯河流域整体生态环境有所恶化。

本文是基于景观格局对玛纳斯河流域的生态安全进行分析,不同于区域生态安全,区域生态安全是由自然、经济和社会生态安全共同组成的生态体系,景观格局只是区域生态安全的重要影响因素之一,并且本文构建的景观生态安全度不具有绝对性,只是相对安全程度。但是人类的社会经济活动对景观格局的变化会产生重要的影响,因此,本文选用景观空间结构来研究玛纳斯河流域的生态安全也有重要的意义。由于决定景观生态安全的干扰度和脆弱度等指标难以量化,景观格局指数的选择也有一定的局限,其表征方法的本身有待完善和改善。

参考文献:

- [1] Haber W. Landscape ecology as a bridge from ecosystems to human ecology[J]. *Ecological Research*, 2004, 19(1):99-106.
- [2] Wu J. Landscape ecology, cross-disciplinarity, and sustainability science [J]. *Landscape Ecology*, 2006, 21(1):1-4.
- [3] 吕一河,陈利顶,傅伯杰. 景观格局与生态过程的耦合途径分析[J]. *地理科学进展*, 2007, 26(3):1-10.
- [4] 陈利顶,李秀珍,傅伯杰,等. 中国景观生态学发展历程与未来研究重点[J]. *生态学报*, 2014, 34(12):3129-3141.
- [5] 左伟,王桥,王文杰,等. 区域生态安全评价指标与标准研究[J]. *地理学与国土研究*, 2002, 18(1):67-71.
- [6] Su S, Chen X, DeGloria S D, et al. Integrative fuzzy set pair model for land ecological security assessment: a case study of Xiaolangdi Reservoir Region, China[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2010, 24(5):639-647.
- [7] Fu B, Wang S, Su C, et al. Linking ecosystem processes and ecosystem services[J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5(1):4-10.
- [8] LÜ Y H, Fu B J, Feng X M, et al. A policy-driven large scale ecological restoration: quantifying ecosystem services changes in the Loess Plateau of China[J]. *PLoS ONE*, 2012, 7(2):31-42.
- [9] 贾定全,慈龙骏. 绿洲景观生态研究[M]. 北京:科学出版社, 2003.
- [10] 肖笃宁,王根绪,王让会. 中国干旱区景观生态学研究进展[M]. 乌鲁木齐:新疆人民出版社, 2003.
- [11] 罗格平,周成虎,陈曦. 干旱区绿洲景观斑块稳定性研究:以三工河流域为例[J]. *科学通报*, 2006, 51(1):73-80.
- [12] 张军民. 新疆玛纳斯河流域水资源及水文循环二元分化研究[J]. *自然资源学报*, 2005, 20(6):857-863.
- [13] 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.
- [14] 王娟,崔保山,姚华荣,等. 纵向岭谷区澜沧江流域景观生态安全时空分异特征[J]. *生态学报*, 2008, 28(4):1681-1690.
- [15] 韩振华,李建东,殷红,等. 基于景观格局的辽河三角洲湿地生态安全分析[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(3):701-705.
- [16] 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, 22(1):57-62.
- [17] 孙才志,闫晓露,钟敬秋. 下辽河平原景观生态安全评价及空间结构分析[J]. *安全与环境学报*, 2014, 14(2):266-272.
- [18] 左伟,周慧珍,王桥,等. 区域生态安全综合评价与制图:以重庆市忠县为例[J]. *土壤学报*, 2004, 41(2):203-209.