

基于 CA-Markov 模型土地利用对景观格局影响辨识

孙贤斌^{1,2}, 刘红玉¹, 李玉凤¹, 郝敬锋¹ (1. 江苏省环境演变与生态建设重点实验室 南京师范大学地理科学学院, 江苏 南京 210046; 2 皖西学院城市建设与环境系, 安徽 六安 237012)

摘要: 采用 CA-Markov 模型方法, 研究挠力河流域不同时段土地利用对湿地景观格局干扰强度的差异性。结果表明: (1) 流域湿地景观格局变化显著。1967—2000 年, 挠力河流域湿地类型景观最大斑块指数逐渐减小, 耕地和水域斑块的面积周长分维数逐渐减小, 而沼泽和居民地的散布与并列指数变大, 草甸和耕地聚集度指数增大; 湿地景观破碎化程度增加; 湿地景观空间分布逐渐由流域周围高地势区向中心河流廊道退缩。(2) 流域土地利用变化明显。耕地和居民用地数量迅速增加, 耕地趋于集中连片分布, 土地利用呈由自然湿地逐渐转化为耕地的变化过程, 耕地成为主导的土地利用类型。(3) 流域土地利用强度存在阶段差异。1967—2000 年, 流域内人类活动对湿地景观的干扰强度逐渐加剧, 人为景观面积比例由 1967 年的 26.5% 上升至 2000 年的 67.8%。土地利用影响强度指数由 1967 年的 1.690 上升至 2000 年的 2.394。2000 年模拟的流域土地利用影响强度比 2000 年实际土地利用影响强度小, 由此可以识别 1983—2000 年人类对湿地景观的干扰强度比 1967—1983 年有所增大; 利用居民地和沼泽面积的变化可以识别流域人口增长和排水活动对土地利用影响的时段差异性。

关键词: 景观格局变化; CA-Markov 模型; 土地利用; 挠力河流域

中图分类号: Q149 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673 - 4831 (2009) 01 - 0001 - 07

CA-Markov Model-Based Identification of Impacts of Land Use on Landscape Pattern. SUN Xian-bin^{1,2}, LIU Hong-yu¹, LI Yu-feng¹, HAO Jing-feng¹ (1. Jiangsu Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction/College of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China; 2 Department of Urban Construction and Environmental Sciences, Wanxi University, Lu an 237012, China)

Abstract: With the aid of the CA-Markov model, impacts of land use on the wetland landscape pattern of the Naoli River Watershed was analyzed. Results show (1) the wetland landscape pattern varied significantly, with the largest patch index (LPI) of wetland landscape, and the perimeter-area fractal dimensions (PA-FRAC) of cultivated land and water body declining gradually, while the interspersed & juxtaposition index (JDI) of marsh and residential land, the aggregation index (AI) of wet meadow and cultivated land, and the fragmentation degree of cultivated land landscape increased ascending gradually, leading to shrinkage of the wetland landscape from lands of high relief in the circumference of the basin to the narrow corridor alongside the central river from 1967 to 2000; (2) variation of the land use was significant, reflected in rapid expansion of farmland and residential land, and mergence of farmlands in distribution; and dominance of the landscape shifted from by wetland to by farmland; and (3) variation of the intensity of land use between time phrases were remarkable. Disturbance of the wetland landscape by human activities increased in intensity in the period from 1967 to 2000, leading to rise of the proportion of artificial landscape in area from 26.5% to 67.8%, and of the intensity of land use impact from 1.690 to 2.394. The simulated impact intensity of land use on the basin was lower than the actual data in 2000. It is, hence, concluded that the disturbance intensity in the period of 1983 - 2000 was higher than in the period of 1967 - 1983. Based on variation of the areas of residential land and the wetland, temporal differences in contribution of population expansion and drainage activity to the impact of land use on the wetland landscape pattern can be distinguished in the Naoli River Watershed.

Key words: landscape spatial pattern; CA-Markov model; land use; Naoli River Watershed

景观格局是景观异质性在空间上的综合表现, 是人类活动干扰和各种生态过程在不同尺度上相互作用的结果^[1], 同时景观格局反映一定社会形态下的人类活动和经济发展的状况。景观格局的复杂程

基金项目: 国家自然科学基金 (40471003); 高等学校博士学科点专项科研基金 (20070319001)

收稿日期: 2008-08-04

通讯联系人

度与社会的发展阶段紧密联系,人口增加、社会重大变革或国家政策变化都会在景观格局上表现出来^[2]。湿地环境的严重恶化与景观格局变化密切相关,为了辨识土地利用阶段对景观格局变化影响的差异性,对湿地景观格局的变化进行模拟具有重要意义。目前,马尔可夫(Markov)模型和元胞自动机(cellular automata, CA)模型是研究景观格局演化最常用的模拟方法,CA-Markov模型综合了CA模型模拟复杂系统空间变化的能力和Markov模型长期预测的优势^[3-4],使得模拟景观生态学现象更为合理^[5-6]。关于运用CA-Markov模型对景观格局(或土地)演变进行模拟预测,前人作了较多的研究^[3-4,7-11],但这些研究主要集中于城市演变和土地利用,对土地利用变化过程的阶段差异性研究很少。笔者借助GIS技术,以挠力河流域景观为研究对象,分析近50a景观格局动态变化阶段的差异性,探讨人类干扰强度对景观变化的影响,揭示该地区湿地景观格局与土地利用、社会经济活动之间的关系,从而为该地区湿地资源的保护及恢复提供理论依据。

1 区域概况

挠力河流域地处黑龙江省三江平原腹地,位于45°43' ~ 47°35' N, 131°3' ~ 134°10' E,总面积22 630.4 km²。流域内平原占65%,山区占35%。挠力河是乌苏里江的主要支流,自西南流向东北,全长596 km。该区地处温带、湿润半湿润大陆性季风气候区,多年平均降水量520 mm,冬春季节降水少,夏季降水丰富,6—9月降水占全年降水量的70%以上,但全年低温期长,蒸发量小,有利于沼泽湿地的形成和发育。该区地势低平,地表径流不畅,而且广泛分布的黏性土层阻碍地表水下渗,形成大面积沼泽。独特的自然环境和气候条件,使该区具有丰富的湿地类型。

建国以来,该流域是我国重要的农业区,经过4次大规模农业开发活动,该区已成为三江平原主要产粮区和国家重要商品粮基地。目前该区已建成6个县、7个现代化农场。随着人口的增加和经济的迅速发展,大面积的湿地转化为农田。湿地逐渐向河岸区域萎缩,约80%的湿地消失。目前湿地仅占整个流域面积的7.1%,占平原面积的11%。

2 研究方法

2.1 流域湿地景观和土地利用数据的来源与处理

以挠力河流域为研究单元,利用历史时期相关图件、遥感数字资料和GIS技术恢复重现一定历史时期不同阶段的湿地景观,制作流域1950、1967和1983年的景观类型图;利用2000年TM/ETM遥感影像数据进行人工解译并结合野外景观调查编制2000年景观图。为了突出区域湿地资源的减少,景观分类系统中增加沼泽、草甸等湿地类型,同时为了使上述数据精度可靠,真实反映不同时期湿地景观状况,制图中采用相同的景观分类系统、地图投影和最小制图单元^{[12]84-92}。将上述4个时段植被和景观矢量图在Arcview 3.2和ArcGIS 9.2中进行整合,并且进行相关数据格式转换、数据的提取和统计。

2.2 景观格局分析方法

景观格局的变化从各类型景观和整体景观2个方面进行分析。具体湿地景观格局变化可通过景观格局指数来反映。本研究主要利用景观格局分析软件FRAGSTATS 3.3进行景观格局指数的计算^[13],选取的景观指数,既相互独立,又能比较全面地描述景观格局,具体选择依据和指数含义参见文献[6, 11, 14]。

2.3 CA-Markov模型及其模拟方法

2.3.1 马尔可夫(Markov)模型

Markov模型是基于Markov过程理论形成的预测事件发生概率的一种方法,常用于具有无后效性特征地理事件的预测。景观类型对应Markov过程中的“可能状态”,而各类型之间相互转换的面积数量或比例即为状态转移概率,可以利用式(1)和式(2)对景观变化进行预测^{[11],[12]115}:

$$S_{t+1} = P_{ij} \cdot S_t \tag{1}$$

式(1)中, S_t 、 S_{t+1} 分别为 t 、 $t+1$ 时刻的系统状态; P_{ij} 为状态转移概率矩阵,可由式(2)表示:

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & \dots & P_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ P_{n1} & \dots & P_{nn} \end{bmatrix} \tag{2}$$

式(2)中, n 为景观类型; P_{ij} 表示由 i 类景观类型转变为 j 类景观类型的概率,同时, P_{ij} 须满足以下2个条件:(1) $0 \leq P_{ij} \leq 1$; (2) $\sum_{j=1}^n P_{ij} = 1 (i, j = 1, 2, \dots, n)$ 。

2.3.2 元胞自动机(CA)模型

CA模型是具有时空计算特征的动力学模型,其

特点是时间、空间、状态都离散,每个变量都只有有限多个状态,而且状态改变的规则在时间和空间上均表现为局部特征^[5,11]。CA模型可表示为:

$$S_{t+1} = f(S_t, N) \quad (3)$$

式(3)中, S 为元胞有限、离散的状态集合; N 为元胞的邻域; $t, t+1$ 表示不同的时刻; f 为局部空间元胞状态的转化规则。

2.3.3 CA-Markov模型模拟方法

Markov和CA模型均为时间离散、状态离散的动力学模型,但是Markov模型预测法没有空间变量,CA模型的状态变量则与空间位置紧密相连。Irisil 5.0软件中的CA-Markov模块将二者有机地结合在一起,可用于景观变化的空间模拟,具体过程为:利用ArcGIS 9.2软件进行景观类型合并和格式转换,以1950和1967年景观类型数据为基础,利用Irisil 5.0软件的Markov模块计算景观转移矩阵(状态转移概率),创建土地利用转变适宜性图像集,采用皮尔逊检验法判别和验证应用Markov模型的条件^[7,15],由此模拟1983年各类型景观的面积;根据模拟的1983年各类型景观面积(状态转移概率),按照一定转换规则和权重,利用CA模型进行空间分配,借助CA-Markov模块进行模拟,从而得到1983年模拟景观图层。在1983年景观模拟过程中,调整CA模型的叠代次数、滤波器等参数,得到不同参数条件下的景观图,再分别与1983年实际景观图对比,由Crosstab模块统计获得各参数条件下

的景观Kappa指数^[16-17],并进行模拟精度分析,Kappa指数最大时即为2000年景观模拟参数。在此参数条件下,对2000年景观类型进行模拟。

2.4 土地利用强度分析指标

人为干扰强度指数($I_{h,d}$):景观中的人为干扰景观组分比例($P_{h,d}$)与自然景观组分比例(P_n)之比,表示景观受干扰的程度^[18],其公式为:

$$I_{h,d} = P_{h,d} / P_n \quad (4)$$

在挠力河流域,居民地和耕地是人为干扰景观,其他为自然景观。

土地利用影响强度 $U(t)$ 的数学表达式为^[19]:

$$U(t) = \sum_{i=1}^{m(t)} P_i(t) \cdot h_i(t) \quad (5)$$

式(5)中, $P_i(t)$ 为景观类型 i 所占面积比例; $m(t)$ 为景观类型总数; t 为时间变量; $h_i(t)$ 为人类活动对景观类型 i 的影响强度,分级标准参照文献[20],各土地利用类型取值为:沼泽、灌丛和岛状林,1;林地、草甸、水域,2;耕地,3;居民地,4。

3 结果与分析

3.1 流域湿地景观格局变化时空动态

3.1.1 各类型景观动态变化分析

在类型景观水平上,选取斑块数(NP)、最大斑块指数(LPI)、平均面积指数(AREA-MN)、面积周长分维数(PA-FRAC)、散布与并列指数(II)、聚集度(AD)6个景观指标,计算结果见表1。

表 1 挠力河流域湿地景观格局指数

Table 1 Landscape metrics analysis at class level in the Naoli River Watershed

年份	景观类型	斑块数	最大斑块指数	平均面积指数	面积周长分维数	散布与并列指数	聚集度
1983	沼泽	40	15.78	9 499.6	1.551	45.02	83.22
	草甸	120	0.52	938.4	1.490	60.37	56.90
	灌丛和岛状林	70	0.12	353.0	1.570	58.78	36.19
	林地	46	28.57	15 099.1	1.488	48.67	84.81
	耕地	109	39.99	9 487.4	1.558	74.86	84.13
	水域	20	0.08	339.2	1.619	71.49	35.77
	居民地	57	0.05	153.0	1.308	2.61	22.36
2000	沼泽	2	0.43	4 845.5	1.564	49.84	82.78
	草甸	153	5.45	1 095.2	1.525	26.61	66.83
	灌丛和岛状林	76	0.01	121.1	1.500	27.76	8.24
	林地	61	10.40	4 928.5	1.492	9.27	81.53
	耕地	176	65.11	13 424.7	1.526	62.14	89.06
	水域	18	0.09	290.7	1.408	55.38	43.01
	居民地	119	0.06	128.7	1.311	8.29	14.83

由表 1 可知, 1983—2000 年, 沼泽、耕地、草甸、居民地 4 个类型斑块数变化较大, 沼泽斑块数急剧减少, 草甸和耕地以及居民地斑块数急剧增加, 反映区域土地利用活动干扰强度增加。沼泽、岛状林和灌丛、林地等类型的最大斑块指数逐渐减小, 平均斑块面积也逐渐减小, 斑块逐渐破碎化, 而草甸和耕地的最大斑块指数逐渐增大, 平均斑块面积也逐渐增大。从面积周长分维数来看, 耕地和水域的分维数在减少, 这是由于人类活动的影响, 大量形状不规则的自然景观变为规则的耕地和水渠, 从而使它们的形状变得有规则, 趋于简单化, 而沼泽和草甸由于农业开垦致使景观破碎化, 景观斑块复杂化, 使面积周长分维数变大, 其他类型的分维数变化不大。

沼泽的散布与并列指数变大, 这是因为经过农

业挖渠和排干后, 沼泽斑块被割裂和散布, 使该指数变大, 而沼泽排干转化为草甸和湿地后又被开垦为耕地, 使耕地斑块面积增大, 集中成片分布, 但使沼泽散布与并列指数增大, 同时也使草甸和耕地聚集度指数增大。沼泽、岛状林和灌丛、林地由于人类活动干扰使聚集度指数减小, 居民地斑块数增加, 在挠力河流域更加零星散布, 聚集度减小。

3. 1. 2 整体景观动态变化分析

在整体景观水平上, 选取斑块数 (NP)、最大斑块指数 (LPI)、面积周长分维数 (PA-FRAC)、面积权重形状指数 (SHAPE-AW)、蔓延度指数 (CONTAG)、聚集度指数 (AI)、散布与并列指数 (II)、Shannon 多样性指数 (SHDI)、Shannon 均匀度指数 (SHEI) 9 个景观指标, 计算结果见表 2。

表 2 挠力河流域湿地整体景观指数

Table 2 Landscape metrics analysis at landscape level in the Naoli River Watershed

年份	斑块数	最大斑块指数	面积周长分维数	面积权重形状指数	蔓延度指数	聚集度指数	散布与并列指数	Shannon 多样性指数	Shannon 均匀度指数
1967	562	21.25	1.361	7.62	43.432	81.287	72.088	1.513	0.778
1983	462	39.99	1.502	10.83	51.099	81.921	62.072	1.258	0.646
2000	589	65.11	1.511	10.33	63.701	88.816	42.821	0.907	0.466
2000 (模拟)	539	45.05	1.384	8.24	56.919	84.564	58.606	1.220	0.627

从挠力河流域湿地整体景观变化 (表 2) 来看, 1967—2000 年, 挠力河流域景观斑块数先减小后增大, 最大斑块指数增大, 说明景观趋于集中化分布, 耕地景观破碎化程度降低, 这主要是由于人类活动干扰加剧以及开荒造成的耕地面积增加所致。面积周长分维数和面积权重形状指数都呈增加趋势, 表明景观形状趋于复杂, 流域土地利用活动增强。蔓延度指数和聚集度指数均增大, 散布与并列指数减小, 说明景观类型在空间分布上出现非均衡化, 景观中的某一类或某几类元素的优势度增高且连通性增强。Shannon 多样性和 Shannon 均匀度指数减小, 说明景观异质程度下降, 景观类型有向单一化或非均衡化 (耕地为主导) 方向发展的趋势 (图 1), 这也是流域内耕地、居民地面积大量增加, 而沼泽、草甸和水域大量减少的直接反映。1967—2000 年, 景观多样性的变化降低了景观的抗干扰能力与整个生态系统的稳定性。与 1983—2000 年模拟景观格局指数比较, 除景观面积周长分维数指数和面积权重形状指数以外, 其他所有模拟景观格局指数大小均在 1983 和 2000 年的值之间, 反映流域模拟的景观格

局变化强度比实际值小。

3. 2 CA-Markov 模型精度检验

通过 Crosstab 模块对 1983 年实际景观图与模拟景观图进行统计获得各类景观的 Kappa 指数 (K_k), 可以定量反映模拟准确性^[17], K_k 的计算式为:

$$K_k = (P_o - P_c) / (P_p - P_c) \quad (6)$$

式 (6) 中, P_o 为正确模拟的比例, P_c 为随机情况下期望的正确模拟比例, P_p 为理想分类情况下的正确模拟比例 (即 100%)。1983 年景观模拟过程中, 模型在 5 × 5 的滤波器、CA 循环次数取 20、空间元胞栅格为 200 m × 200 m 的参数条件下, 正确率和 Kappa 指数均最大, 为最佳模拟效果, 即: 每类景观模拟正确比例在 87.4% 以上, 全局模拟正确比例 91.6%, 共有 7 个景观类型参与模拟, 每个栅格随机情况下正确模拟比例 P_c 为 1/7, 故可以由式 (6) 求得各类景观的 Kappa 指数都在 0.853 以上, 全局 Kappa 指数为 0.902, 模拟结果准确率达到可信的效果^[21]。

利用 1983 年景观模拟参数模拟 2000 年景观类型, 2000 年模拟景观图与实际景观图存在较大差异

(图 1)。这是因为 2000 年模拟的景观图是按照 1967—1983 年期间土地转移强度条件下的景观变化结果。实际 2000 年景观图反映的是 1983—2000 年期间土地利用强度,由此可以说明 1967—1983 年

期间与 1983—2000 年期间土地利用强度的差异性,即利用 CA-Markov 模型辨识不同时期土地利用对景观格局的影响。

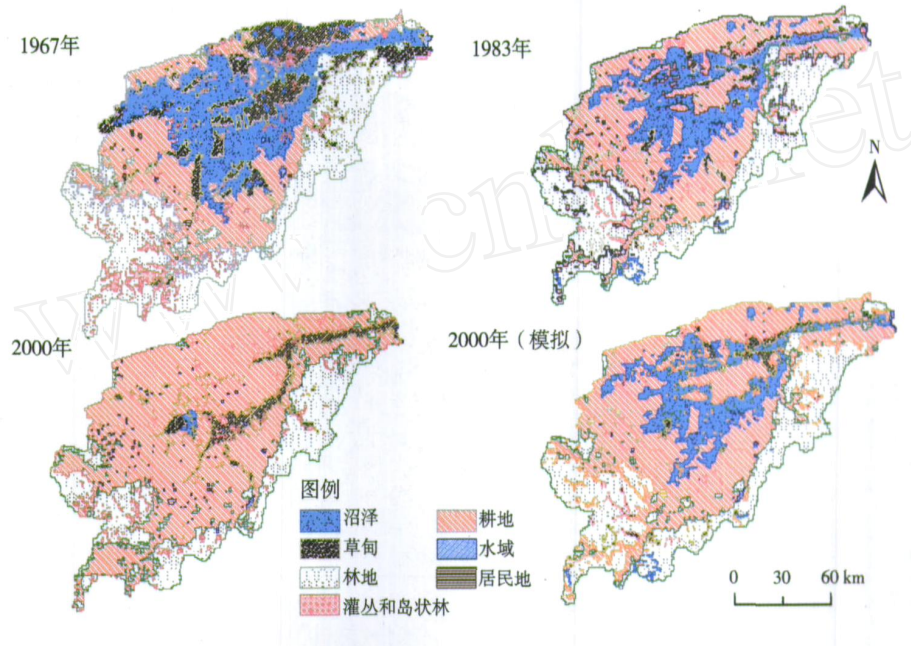


图 1 1967—2000 年挠力河流域景观动态变化

Fig 1 Changes in landscape and its simulation in the years of 1967 - 2000 in the Naoli River Watershed

3.3 流域土地利用格局变化时空动态

挠力河流域景观类型面积变化见表 3。由表 3 可知,挠力河流域 1967—1983 年和 1983—2000 年 2 个时期耕地和居民地都在增加,耕地增加量在所有类型景观面积变化中最大,占景观面积变化的比例分别为 49.6% 和 44.0%。1967—1983 年,沼泽和草甸面积分别减少 25.6% 和 70.3%,湿地(包括沼泽和草甸)景观类型主要转化为耕地。1983—2000 年挠力河流域景观变化为:沼泽和林地面积分别减少 3 690.91 和 1 324.91 km²,面积大量减少,2 者变化的面积占区域土地类型面积变化的 50% 左右,耕地面积增加 4 530.11 km²,是面积增加最大的景观类型,沼泽和耕地面积变化占全区景观面积变化的 80%,这 2 者在空间分布上反映非常明显(图 1)。

表 3 不同时段挠力河流域景观类型面积变化

Table 3 Change in landscape area in the years of 1967 - 2000 in the Naoli River Watershed km²

景观类型	1967—1983 年	1983—2000 年	1983—2000 年 (模拟)
沼泽	- 1 306.02	- 3 690.91	- 100.13
草甸	- 2 506.87	572.27	216.92
灌丛和岛状林	- 683.55	- 131.58	- 80.10
林地	23.19	- 1 324.91	- 230.51
耕地	4 465.06	4 530.11	1 545.59
水域	- 7.54	- 2.19	- 3.34
居民地	16.52	47.21	51.57

从 1983—2000 年土地利用类型转移(表 4)来看,沼泽主要转为耕地和草甸,草甸有 75% 转为耕地,灌丛和岛状林有 54% 和 40% 分别转为耕地和林地,林地有 28% 转为耕地,78.5% 的居民地由耕地

转化而来。挠力河流域景观类型变化为:湿地面积减少量占区域面积的 14%,耕地面积增加量占区域面积的 20%,区域湿地被逐渐开垦利用(表 3)。居民地面积比原来增加了 74%,表明随着人口的增加,人类活动对自然湿地环境干扰加剧;水域面积减少,草甸面积增加,说明区域水域和沼泽湿地被排干,转化为草甸和耕地。将 2000 年景观面积模拟结

果与实际情况对比来看,沼泽、灌丛和岛状林、林地 3 类景观面积减少速度下降,水域面积减少速度增加,草甸、耕地面积增加速度下降,居民地面积增加速度上升(表 3);从空间上表现为:2000 年模拟景观图中沼泽面积分布仍然较大,而草甸和耕地面积分布较小(图 1)。

表 4 1983—2000 年挠力河流域土地利用转移矩阵

Table 4 Conversion matrix of land use in the years of 1983 - 2000 in the Naoli River Watershed

景观类型	沼泽	草甸	灌丛和岛状林	林地	耕地	水域	居民地	2000 年合计	2000 年占有率
沼泽	94.93	0	0	0	0.90	1.00	0	96.83	0.44
草甸	1 178.39	200.99	3.83	34.83	186.98	9.24	0.08	1 614.34	7.27
灌丛和岛状林	22.41	5.75	5.34	5.09	27.75	0	0	66.34	0.30
林地	42.81	51.17	80.00	4 785.61	454.55	1.54	0	5 415.68	24.40
耕地	2 444.47	781.46	107.33	1 904.85	9 545.18	19.88	41.04	14 844.21	66.88
水域	4.26	2.46	1.04	10.14	11.57	17.05	0	46.52	0.21
居民地	0.47	0.24	0.38	0.07	87.17	0	22.76	111.09	0.50
1983 年合计	3 787.74	1 042.07	197.92	6 740.59	10 314.10	48.71	63.88	22 195.01	
1983 年占有率	17.07	4.70	0.89	30.37	46.47	0.22	0.29		100
变化率	-97.42	54.68	-66.29	-19.66	43.92	-4.55	72.41		

行表示 1983 年 i 种土地利用类型,列表表示 2000 年 j 种土地利用类型。土地利用数据表示 1983 年土地利用类型转变为 2000 年各种土地利用类型的面积, km^2 ,即土地利用变化转移矩阵 A_{ij} 。占有率表示各土地利用类型占流域总面积的比例,%;变化率表示 2000 年各土地利用类型相对于 1983 年的变化程度,变化率 ($a, \%$) 计算公式为: $a = (\sum_{i=1}^7 A_{ij} - \sum_{j=1}^7 A_{ij}) \times 100 / \sum_{j=1}^7 A_{ij}$ 。

3.4 流域土地利用影响时空差异

CA-Markov 模型模拟 1983—2000 年景观变化,是以 1967—1983 年期间各类景观面积转移概率为参数得出的景观变化过程,与 1983—2000 年实际人类活动强度干扰情况对比,可以反映挠力河流域湿地景观变化外界驱动因子强度是否发生改变。具体可以通过人为干扰强度指数和土地利用面积变化来分析。

3.4.1 人为干扰强度变化

人为活动对挠力河流域湿地景观影响强度见表 5。根据 1967—1983 年人为干扰强度,且不考虑环境的累积效应,2000 年人为景观面积模拟值为 $10\,787.90 \text{ km}^2$,比实际值减少 $4\,530.21 \text{ km}^2$,占流域 1983—2000 年人为景观面积变化量的 93.5%。2000 年模拟景观人为干扰强度指数为 0.913,而实际值为 2.103,比模拟值增加 130%。

人为景观比例和自然景观比例之和为 1,人为景观比例越大,景观受人为干扰越强烈。1967—2000 年,挠力河流域的人为干扰强度指数逐渐增大(从 0.361 增至 2.103),人为活动对湿地干扰强度

逐渐加大。根据 1967—1983 年各类景观面积转移概率进行 1983—2000 年 CA-Markov 景观模拟,以反映 1967—1983 年土地利用对景观格局的影响强度。2000 年模拟人为干扰强度指数为 0.913,比实际人为干扰强度指数要小,说明在 1983 年以后人为干扰对湿地景观的影响强度增加。由于人为活动对湿地干扰强度和范围增加,人为景观在不断增加,自然景观在逐渐减少,1983—2000 年湿地的基质类型由自然景观转变为人为景观,发生了根本性改变,湿地景观逐渐趋向以耕地为主的人为景观。

表 5 人为活动对挠力河流域湿地景观的影响强度

Table 5 Intensity of the impacts of human activity on landscape spatial pattern in the Naoli River Watershed

年份	景观面积 / km^2		人为干扰强度指数	土地利用影响强度
	人为	自然		
1967	5 989.89	16 611.37	0.361	1.690
1983	10 471.47	12 130.58	0.863	1.976
2000	15 318.11	7 283.96	2.103	2.394
2000 (模拟)	10 787.90	11 814.17	0.913	2.004

3.4.2 土地利用强度变化

人类活动对土地利用影响强度指数可以反映流域内土地利用强度的时段差异性。1967—2000年,挠力河流域的土地利用影响强度逐渐增大(由 1.690 增至 2.394),土地利用对湿地景观影响强度逐渐加大;通过 CA-Markov 模拟,得到的 2000 年模拟人类活动对土地利用影响强度为 2.004,比实际值小(表 5),说明 1983—2000 年人类活动干扰强度比以往时段加剧。

3.4.3 土地利用面积变化

从 1983—2000 年景观面积变化与模拟值比较来看(表 3),挠力河流域土地利用存在显著的时间差异性。首先,居民地面积变化的差异性反映人口变化对土地利用的影响。模拟得到居民地增加面积为 51.57 km²,而实际增加量为 47.21 km²,揭示 1967—1983 年和 1983—2000 年这 2 个时段人口增长存在显著差异。1954—1976 年是我国对三江平原进行大规模开发时期,挠力河流域西部是重点开发区,该时段是人口增加数量最大和速度最快的时期^{[12][126-127,122-23]},人口由 28.78 万增至 81.76 万,而到 1985 年和 2000 年人口分别为 85.50 万和 99.14 万。居民地变化是人口变化的直接反映,根据 1967—1983 年各类景观面积转移概率进行景观模拟,居民地面积增加较大,所以景观模拟可以识别人口变化对土地利用影响的时间差异性。其次,沼泽和草甸面积变化的差异性可以反映人类排水活动对土地利用的影响。实际沼泽景观面积减少 3 690.91 km²,而模拟沼泽景观面积减少 100.13 km²,揭示 1983 年前后 2 个阶段人类排水活动也存在不同。2 个时期挠力河流域排灌渠系发展状况^{[12][123-124]}见表 6。由表 6 可知,1967—1983 年人类排水和灌溉活动强度较小。根据 1967—1983 年人类排水活动强度模拟的景观变化表现为排干沼泽较少,转化为草甸类型也相应较少(表 3);岛状林和灌丛湿地主要分布在草甸湿地边缘地带,其面积变化也受到草甸面积变化的影响。另外,耕地和林地面积的实际变化量比模拟值大(表 3),反映 1983—2000 年人类对耕地和林地利用强度加大。

1967—1983 年处于国家经济建设的初期,湿地资源开垦利用主要集中于挠力河流域地势较高的边缘地区(图 1),其人类活动主要是开垦湿地、开挖水渠和修建水利工程。1983—2000 年是国家经济建设综合开发时期,林地被开垦,并且人类开发活动逐渐延

伸到河流的中下游,道路建设力度、排水活动强度和影响范围逐渐加大,道路建设和水利工程使更多湿地从河岸湿地中逐渐被隔离和开垦;同时隔离的湿地之间缺乏明显的地表水联系,导致湿地生态系统演替和退化,湿地景观演变的累积效应表现明显^[21],加速自然湿地景观的退化(图 1)。总之,Markov 模型是常用的景观动态概率转移模型,Markov 模拟过程未包括人类活动干扰强度的变化和环境累积效应,所以 CA-Markov 模拟可以辨识挠力河流域不同时段土地利用对湿地景观影响程度的差异性。

表 6 挠力河流域排灌渠系变化

Table 6 Change in drainage and irrigation system in the Naoli River Watershed

时段	排水渠系			灌溉渠系		
	长度 / km	数量	排水面积 / km ²	长度 / km	数量	灌溉面积 / km ²
1967—1983	4 484	2 826	227.7	192	216	39.30
1983—2000	5 327	6 914	3 782.1	2 605	3 560	1 020.75

4 结论

(1) 挠力河流域经历了不同时段土地大规模开发,景观格局变化与土地利用强度密切相关。1983—2000 年,挠力河流域湿地景观格局因受人类活动的干扰,致使湿地景观大量丧失,景观结构破碎化,居民地斑块数急剧增加,自然湿地景观转化为以耕地为主的人为景观。

(2) 1967—2000 年挠力河流域土地利用强度逐渐加剧,CA-Markov 模型能够模拟景观时空变化,可按照一定的转移概率揭示景观时空演变状态,在调整模型各种参数使模拟精度达到要求的前提下,挠力河流域景观模拟可以辨识不同时段人类活动对土地利用影响强度的差异性。

(3) 景观模拟的准确性与景观分析的尺度大小有关,通过划分区域单元或者单独预测各种景观类型变化可以减少景观模拟数据量,同时,使用适当的尺度可以提高景观格局变化的模拟精度,至于如何提高和评价景观模拟的精度将有待于进一步研究。

(4) 流域湿地景观时空变化过程会产生许多负面的环境效应,有关景观格局变化模拟与环境效应的综合分析,以及预测未来生态环境变化的强度等方面内容是今后研究的重点。

(下转第 31 页)

经受到破坏。

综上所述,太湖流域的环境状况仍不容乐观,为确保太湖流域社会、经济、环境的协调可持续发展,提出以下几点建议:(1)污染防治的工作思路应由点源污染防治逐渐向非点源污染防治转变。随着点源污染得到逐步治理,养殖、农田、农村居民生活等非点源污染已经逐步成为太湖的主要污染源。因此,要从流域生态系统的角度,实施科学管理,实行保护性耕作,对潜在的污染物质进行有效截留,减少非点源污染物的流失。(2)加强太湖环湖地区污染源的治理,重点是要加强环湖流域企业污染的治理。(3)合理发展城市经济,合理利用和开发土地,合理规划人类社会经济活动,加大环保投入,从根本上、源头上减少污染的排放。

(上接第 7 页)

参考文献:

- [1] 肖笃宁. 景观生态学研究进展 [M]. 长沙:湖南科技出版社, 1999: 1 - 7.
- [2] 韩文权,常禹,胡远满. 景观格局优化研究进展 [J]. 生态学杂志, 2005, 24 (12): 1487 - 1492.
- [3] WARD D P, MURRAY A T. An Optimized Cellular Automata Approach for Sustainable Urban Development in Rapidly Urbanizing Regions [J]. International Journal of Geographical Information Science, 1999, 7 (5): 235 - 250.
- [4] 熊利亚,常斌,周相广. 基于地理元胞自动机的土地利用变化研究 [J]. 资源科学, 2005, 27 (4): 38 - 43.
- [5] 李书娟,曾辉,夏洁,等. 景观空间动态模型研究现状和应重点解决的问题 [J]. 应用生态学报, 2004, 15 (4): 701 - 706.
- [6] 解修平,周杰,张海龙,等. 基于景观生态和马尔可夫过程的西安地区土地利用变化分析 [J]. 资源科学, 2006, 28 (6): 175 - 181.
- [7] 韩文权,常禹. 景观动态的 Markov 模型研究 [J]. 生态学报, 2004, 24 (9): 1958 - 1969.
- [8] LIXia, YEHA GO. Neural-Network-Based Cellular Automata for Simulating Multiple Land Use Changes Using GIS [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2002, 16 (4): 323 - 343.
- [9] LOPEZ E, BOCCO G, MENDOZA M, et al. Predicting Land-Cover and Land-Use Change in the Urban Fringe: A Case in Morelia City, Mexico [J]. Landscape and Urban Planning, 2001, 55 (4): 271 - 285.
- [10] MULLER M R, MIDDLETON J. A Markov Model of Land-Use Change Dynamics in the Niagara Region, Ontario, Canada [J]. Landscape Ecology, 1994, 9 (2): 151 - 157.
- [11] 侯西勇,常斌,于信芳. 基于 CA-Markov 的河西走廊土地利用变化研究 [J]. 农业工程学报, 2004, 20 (5): 286 - 291.

参考文献:

- [1] 许晗之,汪院生,常本春,等. 江苏太湖地区调水改善水环境研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2006, 15 (1): 92 - 96.
- [2] 焦锋,秦伯强. 太湖水环境污染的社会经济因子分析 [J]. 地域研究与开发, 2002, 21 (2): 89 - 92.
- [3] 胡志新,胡维平,谷孝鸿,等. 太湖湖泊生态系统健康评价 [J]. 湖泊科学, 2005, 17 (3): 256 - 262.
- [4] 汪尚朋,李江云,郑旭荣,等. 水质模糊评价的探讨 [J]. 中国农村水利水电, 2005 (1): 49 - 51.
- [5] 海洋,苗群,和慧敏,等. 模糊综合评价在水环境质量评价中的应用 [J]. 青岛理工大学学报, 2007, 28 (6): 68 - 72.

作者简介:刘庄 (1969—),男,江苏泰州人,副研究员,博士,主要从事流域水污染控制与水生态保护研究。

- [12] 刘红玉. 湿地景观变化与环境效应 [M]. 北京:科学出版社, 2005.
- [13] MCGARLAL K, CUSHMAN S A, NEEL M C, et al. FRAG - STATS: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps [CP/OL]. [2008 - 08 - 04]. <http://www.Umass.Edu/landeco/research/fragstats/fragstats.htm> 2002.
- [14] RUITERS K H, O NELL R V, HUNSAKER C T, et al. A Factor Analysis of Landscape Pattern and Structure Metrics [J]. Landscape Ecology, 1995, 10 (1): 23 - 39.
- [15] WENG Q H. Land Use Change Analysis in the Zhujiang Delta of China Using Satellite Remote Sensing, GIS and Stochastic Modeling [J]. Journal of Environment, 2002, 64 (3): 273 - 284.
- [16] 刘光,贺小飞. 地理信息系统实习教程 [M]. 北京:清华大学出版社, 2002: 133 - 138.
- [17] 摆万奇,张永民,阎建忠,等. 大渡河上游地区土地利用动态模拟分析 [J]. 地理研究, 2005, 24 (4): 206 - 213.
- [18] 吴兆录. 西双版纳纳勒养自然保护区土地利用对自然景观的影响 [J]. 应用生态学报, 1997, 8 (增刊): 32 - 37.
- [19] 岳天祥,叶庆华. 景观连通性模型及其应用 [J]. 地理学报, 2002, 57 (1): 67 - 75.
- [20] 高志强,刘纪远,庄大方. 中国土地资源生态环境背景与利用程度的关系 [J]. 地理学报, 1998, 53 (增刊): 36 - 43.
- [21] 布仁仓,常禹,胡远满,等. 基于 Kappa 系数的景观变化测度 [J]. 生态学报, 2005, 25 (4): 778 - 784.
- [22] 刘红玉,李兆富. 挠力河流域湿地景观演变的累积效应 [J]. 地理研究, 2006, 25 (4): 606 - 616.
- [23] 侯伟,张树文,张养贞,等. 三江平原挠力河流域 50 年代以来湿地退缩过程及驱动力分析 [J]. 自然资源学报, 2004, 19 (6): 725 - 731.

作者简介:孙贤斌 (1970—),男,安徽含山人,讲师,博士生,主要从事景观生态与 GIS 应用研究。E-mail: sunxb98@126.com