

基于 GIS 和 Markov 模型的内蒙古农牧交错带土地利用变化

郭碧云^{1,2}, 张广军¹

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100; 2. 密西根州立大学林业科学系, 东兰辛 48823)

摘 要: 为了研究人类活动对农牧交错带土地利用类型的空间分布、转化及对生态环境的影响, 该文以内蒙古农牧交错带太仆寺旗为例, 运用 RS 和 GIS 技术对该区域近 30 a 土地利用/覆被变化及景观格局空间变化进行分析, 并在此基础上运用马尔可夫 (Markov) 模型对未来 20 a 土地利用变化进行预测。结果表明, 近 30 a 来, 草地和农业用地面积在该研究区占居主导地位, 并且它们之间发生着明显的相互转化。1975—1990 年, 草地主要向农业用地转移, 1990—2004 年农业用地主要转化为草地, 草地面积增加; 1975—2000 年, 研究区景观多样性升高, 蔓延度指数下降, 破碎化程度加剧; 2000—2004 年景观内优势斑块具有了很好的连接性, 聚集度增大, 整体景观格局破碎化程度降低; 人为干扰强度的变化对土地利用结构的变化具有重要作用, 土地利用强度主要受人口数量以及国家土地利用政策的影响; 在未来 20 a 间农业用地面积会继续减小, 草地、未利用土地面积将有小幅度降低, 林地面积会显著增加。实行合理的土地利用政策, 利用生态系统自身的修复功能进行生态环境治理是该地区生态恢复的基本途径。

关键词: GIS, 模型, 土地利用, 景观格局, Markov, 太仆寺旗

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.12.051

中图分类号: S771.8

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-12-0291-08

郭碧云, 张广军. 基于GIS和Markov模型的内蒙古农牧交错带土地利用变化[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 291—298.
Guo Biyun, Zhang Guangjun. Land use change in farming-pastoral region of Inner Mongolia based on GIS and Markov model[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(12): 291—298. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

中国农牧交错带是农业和牧业这两个生态系统相互过渡的过程中, 系统主体行为和结构发生“突变转变”的空间域, 它是阻隔荒漠南侵的一道屏障, 但是由于人类活动干预的增强, 使之成为了生态环境脆弱带。中国北方农牧交错带 (34°48'~48°32'N, 103°15'~124°37'E) 位于内蒙古高原东南边缘和黄土高原北部, 包括内蒙古、黑龙江、吉林、辽宁、河北、山西、陕西、甘肃、宁夏 9 个省 (自治区) 的 154 个县 (旗、市), 面积 62.1 万 hm^2 ^[1], 该地带在中国人地关系地域系统中属于一种特殊地域类型, 这里曾经是中国北方主要江河的发源地及上游地段, 具有防风固沙、涵养水源、净化江河、防止水土流失等特殊生态作用^[2], 同时, 该地带也是自然生态环境恶化最严重、经济最贫困的地区之一^[3]。目前, 对农牧交错区土地利用变化研究较多, 但就土地利用及其格局变化对生态系统结构和功能产生的影响方面研究较少。北方农牧交错区以内蒙古高原为主体, 地貌复杂多样, 从对中国农牧交错带近 10 a 的土地利用研究结果看, 内蒙古在这一时期土地利用空间格局发生的变化最大^[4]。太仆寺旗位于内蒙古农牧交错带, 近年来由于人口增长和过度放牧, 土地利用的方式、程度和广度均发生了明显的变化。不论从景观过渡还是农业经济发展的角度出发, 对这一地

域土地覆盖变化及由此引起的环境影响方面的研究具有重要意义。

Markov 模型是利用某一变量的现状和动向预测未来状态及动向的一种分析手段, 这种方法主要用在对水文、气象、经济和管理科学领域的研究, 并已取得良好的预测结果^[5-8]。本文运用太仆寺旗 1975—2004 年间美国陆地资源卫星 Landsat 系列影像 4 期, 通过遥感解译和 GIS 空间技术集成, 从时间和空间上量化了太仆寺旗自 20 世纪 70 年代中期至 2004 年近 30 a 土地类型的总体结构及景观空间格局动态变化特征, 探讨了人类活动对生态环境变化的干扰。同时, 运用 Markov 模型对土地利用演变趋势进行模拟预测, 以期为人们更好的利用研究区土地资源提供科学依据, 并能对中国农牧交错带生态环境建设起到良好的借鉴作用。

1 研究区概况

太仆寺旗位于内蒙古自治区锡林郭勒盟最南端, 地处阴山北麓, 浑善达克沙地南缘, 西北部与正镶白旗相连, 北部、东北部与正蓝旗贯通, 东南部、南部与河北省沽源县交界, 西部与河北省康保县毗邻。地理坐标为东经 114°51'~115°49', 北纬 41°35'~42°10', 海拔 1 300~1 800 m, 总面积 3 491.69 km^2 。属中温带半干旱大陆性气候, 年平均气温 1.6℃, 冷热差异较大, 多年平均绝对湿度 5.5 mm, 相对湿度 61%。年降雨量在 300~500 mm 之间。地上水资源贫乏, 没有可开发利用的河流。地貌类型主要包括低山丘陵区、沟谷盆地和河谷平原区。

太仆寺旗以农牧业为主, 该旗是锡林郭勒盟的主要粮食产区, 是自治区的油料生产基地和全国细毛羊商品

收稿日期: 2009-06-28 修订日期: 2009-11-24

基金项目: 美国 NSF 项目 (0507948, 0624018)

作者简介: 郭碧云 (1972—), 女, 陕西西安人, 博士, 从事 GIS 和 RS 的应用研究。杨凌 西北农林科技大学资源环境学院, 712100。

Email: biyunguo@163.com

的基地建设旗,属于中国北方典型的农牧交错带。

2 研究方法

2.1 数据来源与处理

本研究的基础数据是 1975 年 MSS (p134r31)、1990 年 TM (p124r31)、2000 年 ETM (p124r31) 及 2004 年 ETM+ (p124r31)。在设计研究区景观遥感解译方案时遵循计算机解译与人工智能相结合的原则,把数字高程模型 (DEM)、土壤知识、地貌知识等引入到遥感分类中。依据了中国生态环境数据库土地利用类型解译标准^[9],将土地利用类型划分为 6 个一级类,即农业用地、林地、草地、水域、建设用地和未利用土地,再根据其自然属性分为 23 个二级类,即水田、旱地;有林地、灌木林地、疏林地、其他林地;高覆盖度草地、中覆盖度草地、低覆盖度草地;河渠、湖泊、水库坑塘、永久性冰川雪地、滩涂;城镇用地、农村居民点、其他建设用地;沙地、戈壁、盐碱地、沼泽地、裸土地和裸岩石砾地。

运用 Erdas9.1 图像处理软件中的监督分类法,结合研究区土地利用类型和 1980、2000 年的全国土地分类电子图,对遥感数据进行目视解译得到 4 个时期的土地利用现状图。在对 MSS 影像的解译过程中还参考了全国土地利用调查数据、研究区的一些统计数据 and 《太仆寺旗志》等。虽然 MSS 与其他 3 期影像分辨率差异较大,但这并不影响对研究区土地利用变化的宏观趋势分析。对于分类结果的统计和分析在 Erdas 9.1、ArcGIS9.0 和 Excel 中完成的。

2.2 景观格局分析方法

为了分析研究区景观格局随时间变化的情况,依据景观个体单元的形态特征、景观构成的空间特征和多样性特征,在斑块、斑块类型和景观水平上选取能说明太仆寺旗主要景观过程的景观指数进行计算,并在此基础上对各景观的空间分布特征进行分析。选取的指数见表 1。

表 1 景观指数及其含义

Table 1 Landscape index and its ecological meaning of landscape

景观指数	含义
斑块数 (NP)	景观中斑块的总数,反映景观破碎化程度
最大斑块指数 (LPI)	反映景观要素丰度和优势地位
总边缘长度 (TE)	边界总长度
边缘密度 (ED)	景观或类型被边界分割的程度,揭示景观整体复杂程度
景观形状指数 (LSI)	反映形状偏离规则圆形的程度
蔓延度指数 (CONTAG)	反映景观不同斑块类型的聚集和延展程度
香农多样性指数 (SHDI)	反映景观异质性和多样性
Simpson 多样性指数 (SIDI)	反映随机选择的两个栅格,其斑块类型不同的概率
聚集度指数 (AI)	反映不同斑块类型之间同时出现在图斑上的频率

利用 ArcGIS9.0 的空间分析模块将土地利用类型图转换为 Grid 格式,然后采用景观格局分析软件 Fragstats3.3 进行各景观组分的相关景观指数计算,计算

方法参考相关的参考文献^[10-11]。

2.3 土地利用分析指标

2.3.1 土地利用结构分析指标

在 Erdas 9.1 中,通过对不同时期的土地利用图进行空间叠加运算,求出不同时期土地利用变化数据,在此基础上计算出土地利用转移矩阵^[12],并据此分析引起土地利用变化的原因^[13]。为更好分析土地利用动态变化的情况,利用土地利用转移矩阵,建立转移概率模型^[14]。

$$D_{ij} = \frac{S_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n S_{ij}} \quad (1)$$

式中: D_{ij} ——土地覆盖类型 i 转变为土地覆盖类型 j 的转移概率; S_{ij} ——土地覆盖类型 i 转变为土地覆盖 j 的面积, km^2 ; n ——土地覆盖类型的数量。

2.3.2 土地利用强度分析指标

不同的土地利用类型体现不同的土地利用程度,人类活动对土地景观的作用结果是土地利用强度发生了改变,本文运用人为干扰强度指数和土地利用影响强度来研究人类活动对土地利用变化的影响。

人为干扰强度指数 HD ^[15]:从整体上揭示人类生活和生产活动对土地系统和自然生态系统的干扰程度。用景观中的人为干扰景观组分比例 (Phd) 与自然景观组分比例 (Pn) 之比,来表示景观受干扰的程度

$$HD = Phd / Pn \quad (2)$$

人为干扰景观比例 (Phd) 与自然景观比例 (Pn) 之和为 1,所以 Phd 越大,景观受人为干扰越强烈。在研究区,建设用地和农业用地是人为干扰景观组分,其他为自然景观组分。

土地利用影响强度 $HU(t)$ ^[16-17]:以不同土地利用类型所占比例为权重,对其对应的土地利用程度分级指数进行加权,以此来反映人类活动对研究区土地利用的影响程度。

$$HU(t) = \sum_{i=1}^{m(t)} P_i(t) \cdot h_i(t) \quad (3)$$

式中: t ——时间变量; $P_i(t)$ ——土地利用类型 i 所占面积比例; $m(t)$ ——土地利用类型总数; $h_i(t)$ ——人类活动对土地利用类型 i 的影响强度,其分级标准为:未利用土地为 1;林地、草地和水域为 2;农业用地为 3;建设用地为 4。

2.4 Markov 预测模型

Markov 模型是一种描述随机现象的模型,在植被群落演替方面,Markov 预测模型得到广泛应用^[18]。同时,该模型也是景观生态学家用来模拟土地利用/覆被格局变化最普遍的模型,它是基于空间统计相关模拟的模型^[19-20]。它的特点是无后效性^[21],由于一定时期内不同土地利用类型之间存在相互转化,而且它们之间的转化过程包含着许多难以用函数来准确表达的事件,所以此模型较适宜用于对土地利用动态变化的研究^[22]。应用 Markov 模型的关键是确定转移概率矩阵^[23-25]。其数学表

达式为

$$P = P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \cdots & P_{nn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中： P_{ij} —— i 土地利用类型转化为 j 土地利用类型的概率， P_{ij} 满足两个条件：1) $0 \leq P_{ij} \leq 1$ ；2)

$$\sum_{j=1}^n P_{ij} = 1 \quad (i, j = 1, 2, 3, \cdots, n)。$$

根据 Markov 模型和条件概率可以计算出系统在 $T+1$ 时刻的状态向量。系统在 $T+1$ 时刻的状态向量 $P(T+1)$ 可以由其在时刻 T 的状态向量 $P(T)$ 和转移概率 P_{ij} 来确定

$$P(T+1) = P(T) \times P_{ij} \quad (5)$$

3 结果与分析

3.1 景观格局变化分析

景观空间格局特征是景观生态学研究的核心^[26]。景观格局是许多景观过程长期作用的产物，同时景观格局也直接影响景观过程^[27]。对研究区景观格局变化的研究有助于了解该区域景观格局演变的趋势及内在机理，为恢复和重建受损景观提供依据。太仆寺旗位于内蒙古农牧交错带，处于生态脆弱区域，由于草地的大面积开垦、生态移民政策及退耕还林还草项目的实施，改变了原有的景观格局。

表 2 景观指标分析

Table 2 Analysis of landscape index

年份	NP	LPI/%	TE/m	ED/(m·hm ²)	LSI	CONTAG/%	SHDI	SIDI	AI/%
1975	38 912	58.741	27 869 520	79.727	119.591	58.794	1.033	0.534	88.037
1990	111 632	27.701	40 184 400	115.096	171.745	52.432	1.123	0.619	82.725
2000	162 599	19.842	52 727 700	151.022	224.804	48.052	1.152	0.620	77.332
2004	121 462	45.245	51 150 840	146.493	218.134	51.633	1.082	0.585	78.013

注：NP——斑块数；LPI——最大斑块指数；TE——总边缘长度；ED——边缘密度；LSI——景观形状指数；CONTAG——蔓延度指数；SHDI——香农多样性指数；SIDI——Simpson 多样性指数；AI——聚集度指数。

从表 2 可以看出，1975—2000 年 NP、TE、ED、LSI 呈大幅度增加趋势，表明景观被边界割裂的程度增加，斑块的离散性加大，空间形状复杂性增大，同类型斑块间的连接度降低，并且优势景观降低，景观格局向着破碎、多样化的方向发展。2000—2004 年这些景观指数呈减少状态，说明景观连通性升高，破碎度降低，斑块形状趋于简单，土地景观趋于集中和均衡化。

多样性指数是土地利用类型的多样性和复杂性的度量，多样性指数的高低反映了土地利用类型的多少以及各类型所占比例的变化^[28]，同样标志着土地利用的丰富程度和破碎化程度。1975—2000 年香农多样性指数、Simpson 多样性指数呈增长趋势，最大斑块指数、蔓延度和聚集度指数下降，在 1975 年草地景观占据优势，但随着时间的变化，这种优势逐渐减弱，各类斑块的分布趋于均匀，20 世纪 90 年代末，土地利用变得丰富，具有多种要素的密集的格局，景观由许多离散的小斑块组成，其聚集度较小，破碎化程度增大，优势类型景观降低，景观间差距缩小。2000—2004 年多样性指数减少，而最大斑块指数、蔓延度和聚集度指数上升，景观中的斑块表现出团聚的趋势，景观中以少数大斑块为主或同一类型的斑块高度连接，这主要是由于草地这种优势斑块面积增加，河渠、湖泊、沙地、沼泽等稀有斑块类型面积的减少，导致多样性指数下降，景观中的斑块形成了良好的连通性，土地利用系统向有序性方向发展。

景观变化与人口增长和人们对农业生产与生活的满意度有关，景观破碎化程度与人类活动强度呈正相关，并且从其变化的过程中可以很清晰看出人为干扰的迹象。1949—1999 年研究区人口从 7.32 万人增加至 20.81

万人，同时经历了 3 次开垦土地的高潮，第 1 次是 1958—1959 年，第 2 次是 20 世纪 60 年代初，第 3 次是“文化大革命”期间^[29]。从 1975 年到 20 世纪 90 年代末，景观的破碎化程度加大，主要是由于这一时期人们过度开垦草地、超载放牧使得占主要景观的草地的优势度降低，景观趋于均匀分布。国家从 2000 年以来对太仆寺旗先后实施了“京津风沙源治理”、“退耕还林”、“禁牧舍饲”、“生态移民”、“易地移民搬迁”五大生态建设工程，通过这些工程的实施，生态景观聚集程度有所提高，景观破碎的趋势得到有效控制。

3.2 土地利用时空变化分析

3.2.1 土地利用结构变化

不同土地利用类型面积的变化可以反应它的结构变化趋势，本研究根据 4 个时期遥感影像分类结果（图 1），对各个时期不同土地利用类型面积进行统计，进一步计算 1975—2004 年 4 个时期各种土地利用类型面积百分比（图 2）。

从图 2 中可以很直观的看出各土地类型的结构变化趋势。按地类所占比例看，农业用地、草地占主要地类，林地、水域、建设用地和未利用土地所占份额比较小，且农用地和未利用土地面积所占比例在逐渐减少。1) 1975—1990 年，农业用地、未利用土地有所增加，且农业用地的面积大幅度增加，从占总面积的 23.5% 增加到 43.9%；林地、草地明显减少，草地面积从占总面积的 63.5% 减少到 42%；水域和建设用地的面积变化不大。2) 1990—2000 年，林地、草地呈现增加趋势，农业用地和未利用土地呈现减少状态，建设用地有所增加，但增幅不大。3) 2000—2004 年，草地面积增幅很大，从 2000

年占总面积的 44.9% 增加到 53.9%，但其面积仍小于 1975 年；这一时期林地面积增幅不大；农业用地和未利用土

地面积减幅很大，但占总面积的比例仍然高于 1975 年。

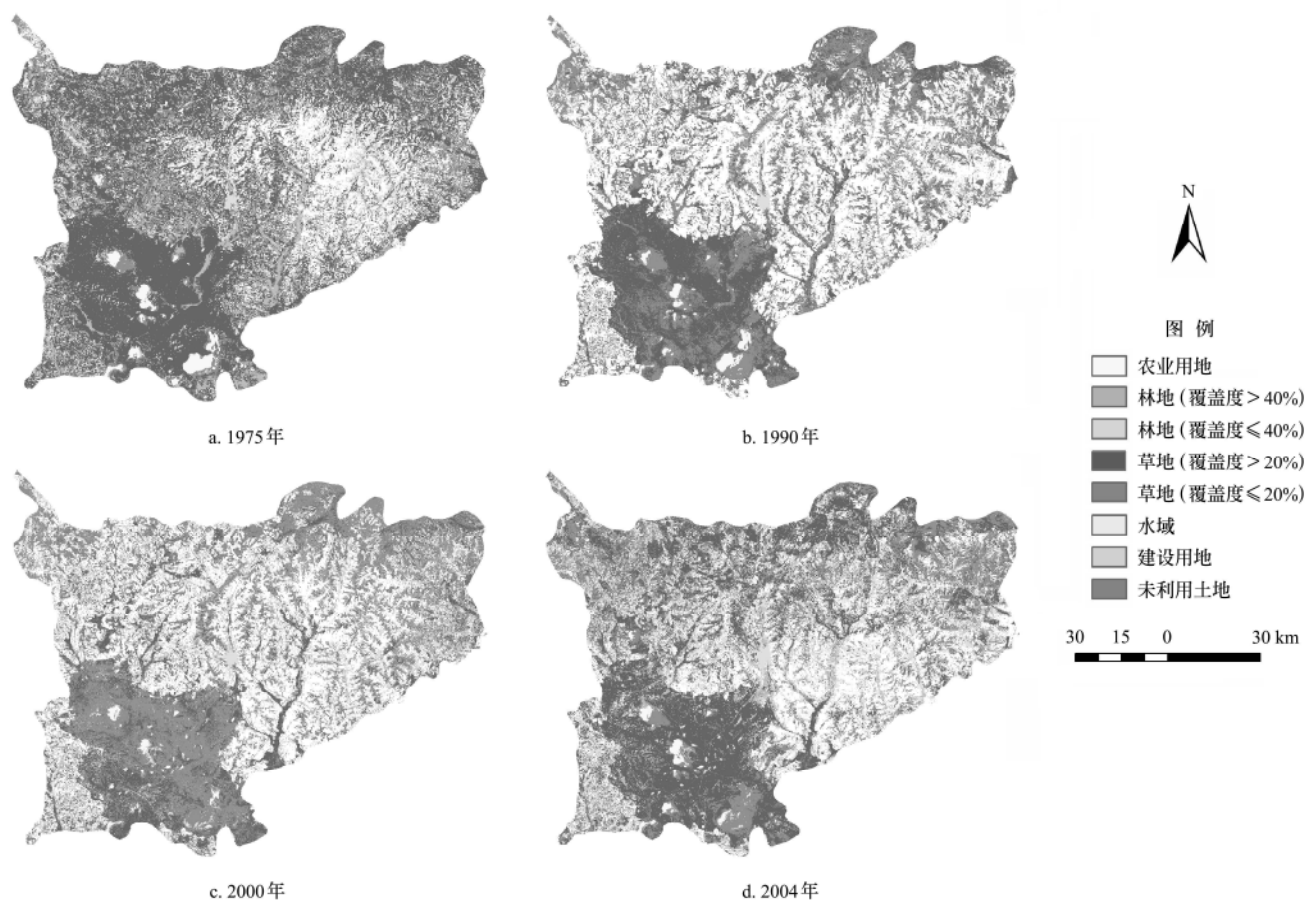


图 1 太仆寺旗 1975 - 2004 年土地利用/覆被的空间格局

Fig.1 Spatial pattern of land use / cover in Taipusi Qi during 1975-2004

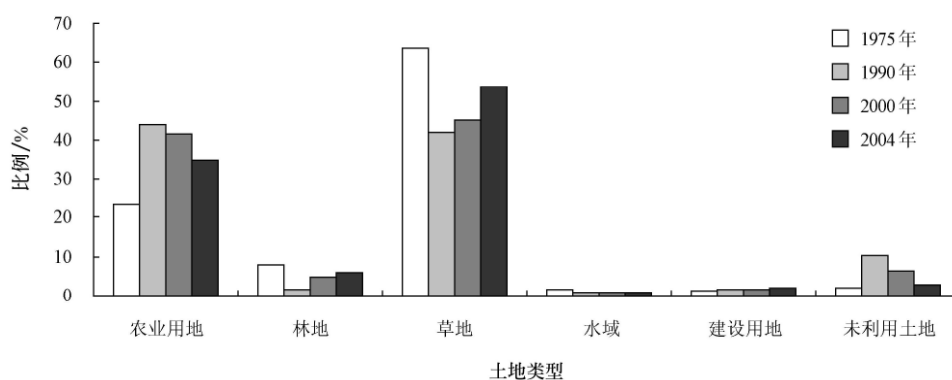


图 2 1975 - 2004 年不同土地类型结构变化情况

Fig.2 Structural changes of different land use types from 1975 to 2004

1949—1999 年太仆寺旗粮食总产量增长了 2.5 倍，粮食产量的提高一方面是生产技术进步的结果，更重要的原因是农业用地面积的扩张。从 1965 年到 20 世纪 80 年代初，研究区牲畜总头数为 30 万头（只），到 1991 年牲畜总头数猛增到 42.9 万头（只），达到历史最高水平，但从 20 世纪 90 年代中期以后牲畜总数有所下降，到了 1999 年为 28 万头（只），比 1949 年增长了 9.2 倍。畜牧业是农牧交错带的主要产业，畜牧业的变化直接影响到草场的质量和数量，牲畜数量的多少与该地区经济水平

的发展程度密切相关，一般情况下，饲养量越大，农牧民收入越高，但是草地生态系统的承载力是有限的，超载过牧的结果是草地覆盖度降低，承载力下降。1991 年太仆寺旗被列为自治区重点造林县旗，在主要干线实施“通道工程”，实行公路两旁基本绿化^[29]，从 90 年代末开始，国家先后在研究区实施了一系列生态建设重点工程，并且对研究区产业结构进行了调整，这些措施的实施，使一些不适宜耕种的耕地变为草地和林地，草地、林地的面积和覆盖度显著增加，2004 年草地和林地面积

与 1990 年相比分别增加了 412.28 km² 和 152.04 km²，农业用地面积则减少了 321.25 km²。

土地利用转移矩阵可全面而又具体地刻画区域土地利用变化的结构特征与各土地类型变化的方向^[30]。用 Erdas 软件的地理信息系统分析功能按时间顺序分别选取连续的两期遥感影像的解译数据对各土地类型的转移趋向和数量进行分析，得出不同时段内土地利用类型之间的转移矩阵（表 3）。

表 3 1975—2004 年太仆寺旗土地利用/土地覆盖类型转移矩阵
Table 3 Transition matrix of land use/land cover type in Taipusi Qi from 1975 to 2004

1975 年	1990 年					
	农业用地	林地	草地	水域	建设用地	未利用土地
农业用地	569.61	11.15	167.82	0.48	4.07	67.20
林地	91.45	15.74	129.44	0.73	2.23	42.88
草地	843.88	24.63	1 128.76	2.51	12.90	202.86
水域	4.70	0.23	4.37	28.70	0.41	19.58
建设用地	8.42	0.12	11.79	0.01	24.74	2.62
未利用土地	14.87	0.28	25.13	1.10	0.86	23.44
1990 年	2000 年					
	农业用地	林地	草地	水域	建设用地	未利用土地
农业用地	1 218.77	49.42	235.52	0.18	4.11	25.70
林地	0.02	51.87	0.03	0.00	0.00	0.25
草地	184.35	46.04	1 143.83	1.07	9.40	83.37
水域	0.08	0.09	1.91	16.17	0.00	15.28
建设用地	1.07	0.06	3.35	0.16	39.69	0.88
未利用土地	41.06	18.49	184.42	11.02	1.89	101.86
2000 年	2004 年					
	农业用地	林地	草地	水域	建设用地	未利用土地
农业用地	851.46	78.82	504.71	0.11	5.05	4.69
林地	57.78	36.17	70.41	0.05	0.72	0.80
草地	254.45	76.42	1 185.80	0.80	7.25	43.67
水域	0.55	1.66	3.05	15.76	0.03	7.53
建设用地	0.97	0.38	1.10	0.00	52.45	0.20
未利用土地	47.04	10.57	114.19	9.34	1.97	44.09

从表 3 可以看出，在整个研究时段内，变化幅度较大的是草地和农业用地，它们之间发生了较大的相互转换。1) 从 1975—1990 年，草地主要流向农业用地，这一时期研究区人口数量迅速增长，对粮食的需求增加，促使人们过度地开垦草地为耕地。1990—2004 年，农业用地更多地流向草地，草地面积增加，这种变化与 20 世纪 90 年代末实施的退耕还林还草政策有关；2) 在整个研究时段内，林地的转出大于转入，1975—1990 年林地主要转为草地和农业用地，而转入的面积很少，1990—2004 年林地面积变化幅度较小，转入大于转出，面积增加；3) 在研究期内，水域的变化基本平稳。建设用地的变化不是十分突出，它的转入大于转出，它的转入主要来自于草地和农业用地；4) 未利用土地增加和去向都以中、低覆盖度草地为主，1975—1990 年未利用土地面积的转入大于转出，主要是由于这一时期超载过牧造成了

大面积草场流向沙漠，据统计 1949—1984 年，研究区牲畜总头数由 102 233 个羊单位增至 565 377 个羊单位，年均每个羊单位的草场面积减少 1.54 hm²[29]，1990—2004 年末利用土地的转出大于转入，面积减小。

3. 2. 2 土地利用强度分析

1) 人为干扰强度变化

从表 4 中可以看出 1990 年人为干扰强度指数为最大值，这主要与这一时期耕地面积大幅度增加有关，建设用地在研究区内所占份额很小，人为干扰强度指数的变化主要与耕地面积密切相关，1975 年耕地面积最少，所以这一时期土地利用受人为干扰强度最小。

表 4 人类活动对太仆寺旗生态景观的影响强度
Table 4 Impact intensity of human activities on ecological landscape in Taibus Qi

年份	景观比例/%		人为干扰强度指数	土地利用影响强度
	人为	自然		
1975	24.86	75.14	0.331	2.243
1990	45.40	54.60	0.831	2.368
2000	42.98	57.02	0.754	2.380
2004	36.66	63.34	0.579	2.357

2) 土地利用影响强度变化

从表 4 中可以看出，1975—2000 年土地利用影响强度持续增加（由 2.243 增至 2.380），2000—2004 年呈下降趋势（由 2.380 降至 2.357），国家实施的土地利用政策对土地利用影响强度的变化起了很大作用，在研究期早期，由于草地垦殖和过度放牧等人为干扰使得土地利用影响强度在这一时期增幅很大，近年来，随着一系列生态环境建设工程的实施，土地生态系统得到很好的恢复，人类活动对土地利用影响强度较前期有所下降。

3. 3 Markov 模型预测过程及结果

3. 3. 1 Markov 转移概率矩阵的确定

运用 Markov 模型预测的关键在于转移概率矩阵的确定。本研究运用 1990—2000 年土地利用类型转移矩阵建立 Markov 转移概率矩阵（表 5）。

表 5 太仆寺旗 1990—2000 年土地利用结构转移概率矩阵
Table 5 Transition probability matrix of land use structure in Taipusi Qi during 1990-2000

1990 年	2000 年					
	农业用地	林地	草地	水域	建设用地	未利用土地
农业用地	0.79466	0.03222	0.15356	0.00011	0.00268	0.01676
林地	0.00034	0.99436	0.00055	0.00003	0.00000	0.00472
草地	0.12557	0.03136	0.77914	0.00073	0.00640	0.05679
水域	0.00225	0.00271	0.05703	0.48220	0.00002	0.45577
建设用地	0.02376	0.00138	0.07416	0.00356	0.87758	0.01956
未利用土地	0.11445	0.05153	0.51409	0.03072	0.00528	0.28393

3. 3. 2 模型的检验

为了检验上述转移概率矩阵的合理性，采用 1990 年土地利用类型数据为基准，以表 5 为转移概率矩阵，运用 Markov 的基本方程（5）来模拟 2000 年的土地利用结

构, 将 2000 年的模拟值与实际值比较, 计算模拟值与实际值之间的相对误差^[31], 并对预测结果进行检验 (表 6)。

表 6 利用 Markov 过程模拟土地利用类型的检验

Table 6 Examination of simulating land use type by Markov process

土地利用类型	$Y(\text{模拟值})/\text{km}^2$	$Y(\text{实际值})/\text{km}^2$	相对误差/%
农业用地	1 444.7870	1 445.3430	0.04
林地	165.6624	165.9679	0.18
草地	1 566.3890	1 569.0730	0.17
水域	28.4322	28.5977	0.58
建设用地	60.4088	55.0949	-9.65
未利用土地	225.7301	227.3415	0.71

从模拟结果来看, 模拟值与实际值的差异很小, 二者十分接近。在 6 种土地利用类型中, 模拟值与实际值偏差最大的是建设用地, 其他地类之间的偏差较少, 因此利用 Markov 过程预测太仆寺旗土地利用结构变化是可行的。

3.3.3 预测结果

根据 Markov 模型理论, 以太仆寺旗 2000 年土地利用类型面积为初始向量, 利用 1990—2000 年土地利用结构转移概率矩阵, 步长为 10 a, 预测出 2010、2020 和 2030 年的土地利用类型面积 (表 7)。

表 7 研究区土地利用变化 Markov 预测结果

Table 7 Prediction result of land use change in research area by Markov model

年份	农业用地	林地	草地	水域	建设用地	未利用土地
2010	1 373.038	272.685	1567.160	22.288	63.474	192.772
2020	1 311.605	374.623	1537.115	18.206	70.439	179.428
2030	1 257.678	472.376	1497.751	15.827	76.123	171.661

预测结果表明: 2010 年以后的 20 a 内 (2010—2030 年) 研究区农业用地面积会以每年 5.768 km^2 的速度继续减少, 其主要原因是有一部分转化为林地和建设用地, 林地面积会以每年 9.985 km^2 的速度快速增加, 草地以每年 3.47 km^2 的速度缓慢减小, 水域和未利用土地面积将继续减小, 建设用地有所增加, 建设用地的增加与农业用地和草地之间矛盾将会显现出来。

4 结论与讨论

太仆寺旗处于农牧交错这一特殊的地域, 人类活动对森林、草地和未利用土地等景观的干扰尤为明显, 人类活动的范围、规模和作用强度等因素是引起本地区生境变化的主要原因之一。近 30 a 来太仆寺旗土地利用类型、强度和景观格局发生了较为复杂的变化, 土地利用类型间的转化突出表现为草地和农业用地之间的相互转化。1975—1990 年, 农业用地面积增加, 农业用地面积的增加是以开垦草地、林地为代价的, 草地、林地面积在这一时期迅速下降, 未利用土地面积增加, 草地退化和荒漠化程度加剧。1990—2004 年, 这种变化趋势正好相反, 在空间结构上, 草地面积增加了 11.81%, 农业用

地面积减少了 9.2%。在研究期内, 未利用土地主要与农业用地和草地之间进行着相互转化。建设用地的变化不大, 主要是由于研究区城镇化水平较低, 经济发展速度缓慢。

土地利用景观水平分析表明, 1975—2000 年景观破碎程度增加, 2000—2004 年由于景观受一种或几种占优势景观的控制程度加大, 斑块形成了良好的连通性, 表现出团聚趋势的特征, 破碎化程度减弱。说明了人类活动干扰和政府的政策调控在景观格局变化中起了一定的作用。

在整个研究期内, 1990 年前后人类活动对生态景观的影响程度最大, 这种变化主要与这一时期农业用地大幅度扩张有关, 1975 年林地面积占首要地位, 农业用地面积较小, 土地利用受人干扰强度最小; 土地利用影响强度主要受国家土地利用政策的影响。

利用 Markov 模型对研究区土地利用变化预测结果表明, 在今后一段时期内, 农业用地、草地、未利用土地每年会有轻微减少, 林地面积将会增加, 水域面积的变化趋势趋于平稳, 随着城镇人口增加和经济的发展, 建设用地增加趋势显著。

GIS 技术具有强大的空间分析功能, 它不仅可以对土地利用类型及景观格局的变化进行研究, 而且能够对土地利用类型之间的动态转移及空间分布情况进行分析。在经济和土地政策没有较大变化的情况下, Markov 模型可以定量的预测土地利用类型的变化情况。本研究运用 GIS 技术和 Markov 模型相结合的方法对太仆寺旗土地利用变化情况进行分析和预测, 较真实地反映了该区域土地利用类型的时空变化信息, 预测值与实际值基本吻合。该研究可以为研究区土地资源的使用、管理和合理规划提供有力的决策依据, 同时, 对农牧交错区生态环境重建与恢复及环境保护工程的实施起到一定的指导作用。

由于统计数据欠缺, 本研究对土地利用变化的驱动因素方面的分析较浅, 同时对于景观格局与生态过程之间的相互关系方面尚需要进一步的研究。

志谢: 本文得到美国密西根州立大学林业科学系尹润生教授的指导, 特此感谢!

[参 考 文 献]

- [1] 刘军会, 高吉喜. 气候和土地利用变化对中国北方农牧交错带植被覆盖变化的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(9): 2016—2022.
Liu Junhui, Gao Jixi. Effects of climate and land use change on the changes of vegetation coverage in farming-pastoral ecotone of Northern China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(9): 2016—2022. (in Chinese with English abstract)
- [2] 史德宽. 农牧交错带在持续发展战略中的特殊地位[J]. 草地学报, 1999, 7(1): 17—21.
Shi Dekuan. The special role of the borders between farming and ranging regions in the sustainable development strategies[J]. Acta Agrestia Sinica, 1999, 7(1): 17—21. (in Chinese with English abstract)

- Chinese with English abstract)
- [3] 吴全, 秦富仓, 王桂华, 等. 内蒙古锡林郭勒盟太仆寺旗土壤侵蚀初步分析[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(9): 78—84.
- Wu Quan, Qin Fucang, Wang Guihua, et al. Primary analysis on soil erosion of Taipusi County in Silinguole Pledge of Inner Mongolia[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007, 21(9): 78—84. (in Chinese with English abstract)
- [4] 邹亚荣. 中国农牧交错带典型区土地利用变化驱动力分析及其对土壤侵蚀的影响[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2003.
- Zou Yarong. Analysis on Driving Forces of Typical Zones Land Use Change in Ecotone Between Agriculture and Animal Husbandry and its Impacts on Soil Erosion[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2003. (in Chinese with English abstract)
- [5] 何鑫, 李琼芳. 马尔柯夫法在耕地质量动态评价中的应用[J]. 资源开发与市场, 2004, 20(1): 9—10.
- He Xin, Li Qiongfang. Application of Markov method in cultivated land quality dynamic assessment[J]. Resource Development & Market, 2004, 20(1): 9—10. (in Chinese with English abstract)
- [6] 刘琼, 欧名毫, 彭晓英. 基于马尔柯夫过程的区域土地利用结构预测研究[J]. 南京农业大学学报: 自然科学版, 2005, 28(3): 575—579.
- Liu Qiong, Ou Minghao, Peng Xiaoying. The forecast of land use structure based on Markov process: A case study of Kunshan city[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2005, 28(3): 575—579. (in Chinese with English abstract)
- [7] Balzter H. Markov chain models for vegetation dynamics[J]. Ecological Modeling, 2000, 126: 139—154.
- [8] Pastor J, Sharp A, Wolter P. An application of Markov model to the dynamics of Minnesota's forests[J]. Journal of Forest Research, 2005, 35: 3011—3019.
- [9] 陈文波, 郑蕉, 鄢帮有. 鄱阳湖区土地利用景观格局特征研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(4): 79—83.
- Chen Wenbo, Zheng Jiao, Yan Bangyou. Landscape pattern characteristics in Poyang Lake region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(4): 79—83. (in Chinese with English abstract)
- [10] 肖笃宁. 景观生态学研究进展[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1999: 8—14.
- [11] Haines Y R, Chopping M. Quantifying landscape structure: a review of landscape indices and their application to forested landscapes[J]. Progress in Physical Geography, 1996, 20(4): 418—445.
- [12] Jenson J Q, Cowen D. Principles of change detection using digital remote sensor data integration of GIS and remote sensing[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997: 1—25.
- [13] 刘贤赵, 王巍. 烟台沿海地区土地利用景观格局演变研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(10): 79—85.
- Liu Xianzhao, Wang Wei. Changes of land use and landscape pattern in Yantai coastland areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(10): 79—85. (in Chinese with English abstract)
- [14] 史培军, 陈晋, 潘耀忠. 深圳市土地利用变化机制分析[J]. 地理学报, 2000, 55(5): 151—160.
- Shi Peijun, Chen Jin, Pan Yaozhong. Land use change mechanism in Shenzhen city[J]. Acta Geographica Sinica, 2000, 55(5): 151—160. (in Chinese with English abstract)
- [15] 吴兆录. 西双版纳勐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.
- Wu Zhaolu. Impact of land-use on natural landscapes in Mengyang Nature Reserve of Xishuangbanna[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1997, 8(supp.): 32—37. (in Chinese with English abstract)
- [16] 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.
- Yue Tianxiang, Ye Qinghua. Models for landscape connectivity and their applications[J]. Acta Geographica Sinica, 2002, 57(1): 67—75. (in Chinese with English abstract)
- [17] 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.
- Gao Zhiqiang, Liu Jiyan, Zhuang Dafang. The relation between ecological environmental background and the used degree of land resources in China[J]. Acta Geographica Sinica, 1998, 53(supp.): 36—43. (in Chinese with English abstract)
- [18] 陈建忠, 周世勇, 徐福余. Markov 过程在森林资源结构动态预测中的应用: 以福建省南平地区的树种结构为例[J]. 应用生态学报, 1994, 5(3): 232—236.
- Chen Jianzhong, Zhou Shiyong, Xu Fuyu. Application of Markov process in structural dynamic forecasting of forest resources with tree species structure in Nanping region of Fujian Province as an example[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1994, 5(3): 232—236. (in Chinese with English abstract)
- [19] Luijten J C. A systematic method for generating land use patterns using stochastic rules and basic landscape characteristics results for a Colombian hillside watershed[J]. Agric Ecosyst, 2003, 95: 427—441.
- [20] 孙丹峰, 李红, 张凤荣. 基于动态统计规则和景观格局特征的土地利用覆被空间模拟预测[J]. 农业工程学报, 2005, 21(3): 121—125.
- Sun Danfeng, Li Hong, Zhang Fengrong. Spatial simulation and prediction of land use and land cover using adaptive stochastic rules and landscape pattern characteristics[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(3): 121—125. (in Chinese with English abstract)
- [21] 郭笃发. 利用马尔科夫过程预测黄河三角洲新生湿地土地利用/覆被格局的变化[J]. 土壤, 2006, 38(1): 42—47.
- Guo Dufa. Prediction of land use and land cover patterns in recent Yellow River Delta using Markov chain model[J]. Soils, 2006, 38(1): 42—47. (in Chinese with English abstract)
- [22] 胡召玲, 张国成, 嵇昌芬等. 基于马尔可夫模型对徐州市土地利用动态变化的研究[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(8): 2344—2345.
- Hu Zhaoling, Zhang Guocheng, Zhuo Changfen. Study on

- dynamic changes of land use in Xuzhou city based on Markov model[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2007, 35(8): 2344—2345. (in Chinese with English abstract)
- [23] 吴琼, 王如松, 李宏卿. 土地利用/景观生态学研究中的马尔可夫链统计性质分析[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(3): 434—437.
- Wu Qiong, Wang Rusong, Li Hongqing. Statistical properties of Markov chain in land use and landscape study[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(3): 434—437. (in Chinese with English abstract)
- [24] 张君, 刘丽. 基于马尔可夫模型的绿洲土地利用变化预测研究[J]. *统计与信息论坛*, 2006, 21(4): 73—76.
- Zhang Jun, Liu Li. Research on the prediction in the change of oasis land usage based on Markov model[J]. *Statistics & Information Forum*, 2006, 21(4): 73—76. (in Chinese with English abstract)
- [25] Anderson T W, Goodman L A. Statistical inference about Markov chains[J]. *Annals of Mathematical Statistics*, 1957, 28(1): 89—110.
- [26] Forman R T T, Godron M. *Landscape Ecology*[M]. New York: Wiley, 1986.
- [27] 傅伯杰, 陈利顶, 马克明, 等. 景观生态学原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 202—203.
- [28] 蔡为民, 唐华俊, 吕钢, 等. 景观格局分析法与土地利用转换矩阵在土地利用特征研究中的应用[J]. *中国土地科学*, 2006, 20(1): 39—44.
- Cai Weimin, Tang Huajun, Lü Gang, et al. Application of approach of landscape pattern analysis and land use conversion matrix in research of land use characteristics[J]. *China Land Science*, 2006, 20(1): 39—44. (in Chinese with English abstract)
- [29] 王海亮. 太仆寺旗志[M]. 海拉尔: 内蒙古文化出版社, 2000: 5—163.
- [30] 蒋旭东, 彭鹏, 李璞, 等. 合肥市土地利用变化及其对景观生态格局的影响[J]. *合肥工业大学学报: 自然科学版*, 2008, 31(8): 1227—1231.
- Jiang Xudong, Peng Peng, Li Pu, et al. Study of land-use changes and the effects on landscape ecology in Hefei city of Anhui Province[J]. *Journal of Hefei University of Technology: Nature Science*, 2008, 31(8): 1227—1231. (in Chinese with English abstract)
- [31] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 216—220.

Land use change in farming-pastoral region of Inner Mongolia based on GIS and Markov model

Guo Biyun^{1,2}, Zhang Guangjun¹

(1. College of Resources and Environment, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China;

2. Department of Forestry, Michigan State University, East Lansing 48823, U.S.A.)

Abstract: For studying the influence of human activity on spatial distribution, transformation of land use type and ecological environment in farming-pastoral region, Taipusi Qi in Inner Mongolia was selected to analyze the change of land use, land cover and spatial landscape pattern in the past 30 years by remote sensing (RS) and geographic information system (GIS). The Markov model was applied to predict land use variation in the following 20 years. The results showed that grassland and farmland were the main land use types of research area with obvious reciprocal transformation. Grassland was mainly transferred to farmland in 1975-1990. Farmland was chiefly converted to grassland, and grassland tended to increase in 1990-2004. The landscape diversity in the study area rose with the contagion index decreasing and fragmentation degree being intensified during 1975-2000. The advantageous patches maintained good connectivity with the increasing patch cohesion index and the decreasing landscape fragmentation during 2000-2004. The change of human interference intensity played an important role on the variation of land use structure. Land use intensity was mainly affected by the changes in population as well as national land use policies. In the following 20 years, the agriculture land area would tend to decrease, the grassland and unused land area would have a slight reduction by contrasting the increasing the forest land area notably. It is a basic approach to ecological restoration by implementing rational land use policies and utilizing ecosystem self-repair functions.

Key words: geographic information system, models, land use, landscape pattern, Markov, Taipusi Qi