

基于 RS 和 GIS 的西宁市 LUCC 分析及模拟预测

伏 洋¹, 肖建设^{1*}, 校瑞香¹, 洒文君², 李希来³

(1. 青海省气象科学研究所, 西宁 810001; 2. 青海省农牧厅外事外经办, 西宁 810008;
3. 青海大学农牧学院草业科学系, 西宁 810003)

摘 要: 通过研究位于青藏高原东部边缘西宁市土地利用/覆被变化 (LUCC) 空间转化规律, 以期揭示在人类活动加剧的大背景下, 实施生态建设对城市与农村及其农牧业土地利用格局、生态环境效应、社会经济状况等产生的驱动机制。运用 RS 与 GIS 综合技术, 通过精确解译西宁市 1999 年与 2005 年两期 Landsat TM 遥感影像, 获取了较高精度的土地利用/覆被的定量统计及矢量图, 结合动态指标分析了 LUCC 特征; 并采用地图代数运算法求得各土地利用类型的 Markov 转移矩阵。结果表明: 1999—2005 年西宁市的耕地、草地和未利用土地是 LUCC 的核心类型, 共有占研究区域总面积 73.58% 的土地利用方式发生了变化, 表现为一种突变性质; 6 a 间, 西宁市的河流、湖泊、湿地、草地和林地等面积显著增加, 充分表明自 2000 年以来实施的生态建设极大地改善了西宁市的生态环境。在目前外界驱动力不变的条件下, 通过 Markov 过程模拟与预测, 未来 10 a 以及至终级稳定状态下, 西宁市的耕地面积将继续减少, 建筑和交通等建设用地持续增加; 林地和草地, 以及河流和湖泊等湿地所占面积比例的增加, 将产生良好的生态环境效应。

关键词: LUCC, RS, GIS, 生态, Markov 过程, 生态建设, 效果评价, 模拟与预测, 西宁市

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.07.039

中图分类号: X87

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-7-0211-08

伏 洋, 肖建设, 校瑞香, 等. 基于 RS 和 GIS 的西宁市 LUCC 分析及模拟预测[J]. 农业工程学报, 2009, 25 (7): 211—218.

Fu Yang, Xiao Jianshe, Xiao Ruixiang, et al. Analysis and simulation prediction on LUCC of Xining city based on RS and GIS[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(7): 211—218. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

土地利用/覆被变化 (LUCC) 是全球环境变化与可持续发展的重要核心问题之一^[1]。LUCC 受自然、人文因素在不同时间、空间尺度上的相互作用。目前国际上应用 RS、GIS 技术, 已在 LUCC 监测、评价与制图, 农村与农业 LUCC 分析, 城市 LUCC 分析, LUCC 动力学, LUCC 与生态环境 5 个等领域取得最新进展^[2-5]。国内重点研究领域主要是 LUCC 问题中的动态信息获取、过程模拟、发展趋势、驱动机制及 LUCC 生态环境效应等^[6-12]。西宁市位于青藏高原东北边缘, 处于高原季风和东亚冬季风的交汇区域^[13], 同时具有黄土高原与青藏高原过渡带、冷暖气团气候过渡带、农牧区过渡带的“三过渡”特性, 属环境变化敏感带^[14-15]。因此, 对于西宁市 LUCC 信息的定量提取与分析, 在青藏高原生态环境演变研究中具有重要价值, 也是对全球变化研究的重要补充。

本研究基于 RS 与 GIS 技术, 对 1999—2005 年西宁市 LUCC 进行动态监测与定量分析, 以期揭示研究区在

2000 年以来实施西部大开发, 以及已实施的退耕还林还草、小流域治理等生态建设工程背景下, 对城市与农村以及农牧业土地利用格局、生态环境效应、社会经济状况等产生的驱动机制, 并对生态建设工程效果进行科学评价。同时运用马尔柯夫 (Markov) 过程模拟该区域土地利用的动态演变过程, 定量分析其演变特征, 并预测该区域未来 LUCC 的演变趋势及其生态环境效应。研究结果可为青藏高原东部边缘地区生态环境治理, 及其区域生产活动和相关政策的制定提供决策依据, 以实现土地资源的可持续开发利用, 增强土地的集约化程度。

1 研究区概况

西宁市位于青藏高原过渡带, 湟水流域中部西宁盆地, 为青海省省会, 对流域生态环境以及青海省社会经济发展有着举足轻重的作用^[16]。西宁市现辖 6 个区和大通、湟中、湟源 3 个县, 介于 36°12'27"~37°30'09"N, 100°47'55.6"~101°56'49.0"E。土地面积为 737 967.02 hm², 占全省面积的 1% 左右, 人口却占全省的 45.67%。地貌以湟水谷地及其两侧的低山丘陵、山间盆地, 以及中山坡地和滩地为主; 由于受湟水一级支流侵蚀、切割强烈, 故山川相间、沟壑纵横^[17]。土地利用类型以耕地和天然草地为主, 未利用土地面积占 15% 以上。

西宁盆地湟水流域森林灌丛植被分布多集中于黄土低山丘陵与中高山地形结合地带, 即黄土覆被的边缘交错区域。生境的干湿状况直接影响本区天然林的分布特征、森林灌丛植被覆被率的高低、森林的类型结构和种类组成, 并成为人工造林效果的重要环境因素^[18]。自 2000

收稿时间: 2009-03-16 修订时间: 2009-07-13

基金项目: 国家科技支撑计划项目“青海湖流域生态和环境治理技术集成与试验示范”(2007BAC30B00)

作者简介: 伏 洋 (1974—), 男, 高级工程师, 主要从事应用气象研究及遥感应用工作。西宁 青海省气象科学研究所, 810001。

Email: fuyang_hao@126.com

*通信作者: 肖建设 (1979—), 男, 工程师, 主要从事地理信息及遥感应用工作。西宁 青海省气象科学研究所, 810001。

Email: xiaojianshe@126.com

年退耕还林工程实施以来, 西宁市目前已累计完成 $4.76 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 其中退耕地还林还草 $1.99 \times 10^4 \text{ hm}^2$ (还林与还草面积分别占退耕地面积的85.9%和14.1%), 周边荒山造林种草 $2.64 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 封山育林 $0.13 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。25°以上坡耕地是湟水流域主要水土流失源, 通过退耕还林(草)与小流域治理工程, 西宁市25°以上坡耕地面积由1999年的 $2.24 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 减少至2005年的 $0.62 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。

2 材料与方法

2.1 研究材料

使用Landsat TM 1999-07-22和2005-07-25的132/034与132/035遥感影像数据; 1:10万地形图及行政区划图; 1999~2005年西宁市相关社会经济背景统计数据。

2.2 研究方法

运用RS和GIS相结合技术进行遥感影像预处理、辐射纠正和几何纠正、图像配准等。土地利用/覆被分类主要参考863—308“西部金睛行动”项目中“中国生态环境本底调查分类系统”, 并考虑地方行业标准, 为充分体现青藏高原与黄土高原过渡带的生态景观特征, 结合以往在“三江源地区”土地利用/覆被分类系统的研究应用经

验, 建立了较符合研究区生态特征的土地利用/覆被分类系统。该分类系统包括6个一级类型、11个二级类型, 景观类型分为旱地、水浇地、林地、灌木林、天然草地、河流型湿地、湖泊型湿地、其他水体、建筑用地、交通用地、未利用土地等。其中建筑用地包括连续与分散的居民、工矿用地; 交通用地主要包括公路和铁路用地; 其他水体包括水库、坑塘、泉及瀑布等, 未利用土地包括宜林草与不宜林草荒地及裸岩。然后在GIS图像处理软件支持下, 利用已建立的遥感解译标志, 使用监督分类法对TM遥感影像进行判译, 并建立土地利用空间数据库和属性数据库, 得到1999年、2005年2期土地利用现状矢量图(图1)。经同期土地利用详查资料和典型区野外实地抽样调查验证, 建筑用地、交通用地、湿地(河流、湖泊与其他水体)、林地解译精度在90%以上, 未利用土地、农用地(旱地和水浇地)、灌木林和草地解译精度在82%左右, 表明解译结果可信度较高。利用Arc/Info软件, 将1999年与2005年两期遥感矢量图进行空间叠加, 采用地图代数运算方法求得各种土地利用类型相互转化定量关系的原始矩阵, 为Markov过程模拟与预测获得相应的属性数据。

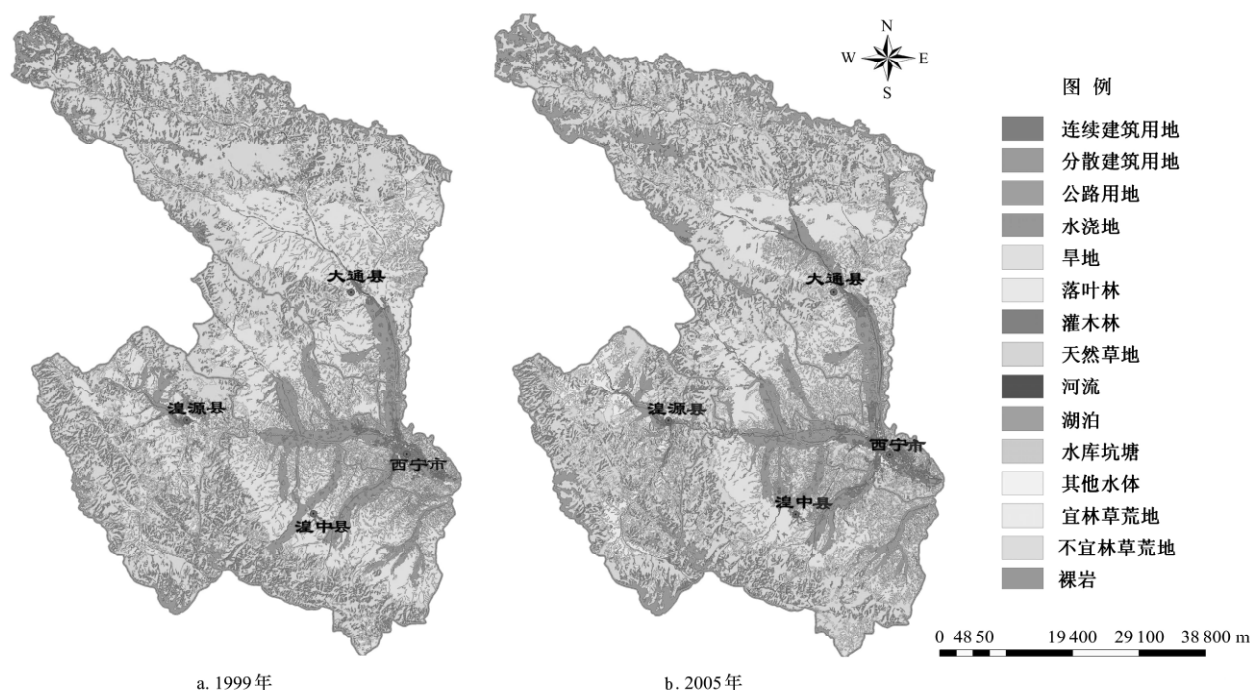


图1 西宁市1999年与2005年土地利用/覆被状况

Fig.1 Situation of land use/ land cover of Xining city in 1999 and 2005

2.3 土地利用变化分析指标

2.3.1 土地利用变化数量

包括1999年和2005年的不同土地利用类型的面积及比例构成, 以及土地利用变化的方向、类型及面积等。

2.3.2 土地利用动态度 K_s

土地利用动态度 (K_s) 计算方法如下

$$K_s = (U_b - U_a) \times (U_a \times T)^{-1} \times 100\% \quad (1)$$

式中: K_s ——研究时段内某一土地利用类型的年变化率,

%; U_a 、 U_b ——研究期初及研究期末某土地利用类型的数量, hm^2 ; T ——研究时段, a。

2.3.3 综合土地利用动态度 $LC^{[19]}$

综合土地利用动态度 (LC) 的计算公式如下^[19]

$$LC = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta LU_{i-j}}{\sum_{i=1}^n LU_i} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (2)$$

式中: LU_i ——研究期初 i 类土地利用类型面积, hm^2 ;

ΔLU_{ij} ——研究时段内 i 类土地利用类型转为非 i 类 (j 类, $j=1\cdots n$) 土地利用类型面积的绝对值, hm^2 。

3 结果与分析

3.1 土地利用结构现状及动态变化

3.1.1 土地利用变化转移矩阵

通过精确解译西宁市 1999 年与 2005 年两期同时相 Landsat TM 遥感影像图, 得到土地利用/覆被状况, 利用

Arc / Info 软件, 将两期矢量图进行空间叠加运算, 获取 1999 年至 2005 年的各土地利用类型的面积转化量, 采用 Markov 转移矩阵表示各种土地利用类型组分之间的转化情况^[20] (表 1)。表 1 中的行表示 t 时期第 i 种土地利用类型, 列表示 $t+1$ 时期第 j 种土地利用类型, 表中数据表示 t 期的土地利用类型转化为 $t+1$ 时期各种土地利用类型的面积, 即原始土地利用变化转移矩阵 A_{ij} 。

表 1 西宁市 1999—2005 年土地利用类型之间定量转移状况

Table 1 Quantitative transition condition between the land use types of Xining city from 1999 to 2005											hm ²
2005 年 1999 年	建筑 用地	交通 用地	水浇地	旱地	林地	灌木林	天然 草地	河流	湖泊	其他 水体	未利用 土地
建筑用地	5 114.41	88.19	1 085.91	209.16	55.86	5.46	734.44	118.16	0	2.43	412.84
交通过地	46.01	159.63	104.64	10.82	0.17	0	37.46	3.59	0	0	59.20
水浇地	3 237.28	401.86	36 714.06	5 201.43	136.24	142.02	2 070.25	351.22	0	0	1 921.64
旱地	1 846.02	142.89	13 336.21	125 750.69	1 415.69	2 277.66	30 990.42	498.80	0.57	127.70	44 315.85
林地	148.73	22.57	381.23	433.98	7 512.27	3 497.86	8 539.43	88.34	0.00	9.58	1 067.80
灌木林	10.12	7.28	123.60	716.15	6 789.03	20 101.50	26 570.99	126.53	0.08	1.63	4 596.48
天然草地	655.40	119.70	1 181.45	7 552.19	8 093.70	29 027.35	229 272.05	830.61	31.74	80.53	28 434.82
河流型湿地	91.23	10.59	399.03	329.44	20.58	61.16	980.19	2 320.49	0	71.28	202.85
湖泊型湿地	0.02	0	0	2.70	2.04	0	0	0	46.23	0	7.19
其他湿地	0.01	0	0.89	11.29	0	0	1.51	0	0.00	55.28	4.64
未利用土地	2 485.39	90.03	1 608.73	9 933.71	582.13	1 090.31	12 624.13	220.91	20.29	129.56	39 411.64

3.1.2 土地利用类型的空间转化

由表 1 可得出 1999—2005 年各类型面积的增减以及转入、转出情况 (表 2)。从各土地利用类型间相互转化来看, 林地、灌木林和交通用地的转出率最高; 湖泊和天然草地转出率最少, 其余依次为河流、旱地、未利用土地、建筑用地、水浇地、天然草地和其他水体。交通

用地和其他水体 (坑塘、水库) 转入率最高, 旱地的转入率最少, 其他依次为林地、未利用土地、灌木林、湖泊、河流、水浇地和天然草地。1999—2005 年西宁市土地利用的主要转化形式为: 草地转化为湖泊、林地、灌木林和旱地; 旱地、灌木林逆转为草地; 旱地转化为未利用土地。

表 2 西宁市 1999—2005 年各土地利用类型动态变化

Table 2 Dynamic variation of each land use type of Xining city from 1999 to 2005

类 型	1999 年		2005 年		面积增减 /hm ²	转出率 /%	转入率 /%	K_s /%
	面积/hm ²	比例/%	面积/hm ²	比例/%				
建筑用地	7 826.85	1.06	13 634.6	1.85	5 807.75	34.66	62.49	12.37
交通过地	421.52	0.06	1 042.75	0.14	621.23	62.13	84.69	24.56
水浇地	50 175.99	6.80	54 935.74	7.44	4 759.75	26.83	33.17	1.58
旱地	220 702.5	29.91	150 151.57	20.35	-70 550.93	43.02	16.25	-5.33
林地	21 701.8	2.94	24 607.7	3.33	2 905.91	65.38	69.47	2.23
灌木林	59 043.38	8.00	56 203.32	7.62	-2 840.06	65.95	64.23	-0.8
天然草地	305 279.53	41.37	311 820.87	42.25	6 541.33	24.90	26.47	0.36
河 流	4 486.83	0.61	4 558.64	0.62	71.81	48.28	49.10	0.27
湖 泊	58.18	0.008	98.9	0.01	40.73	20.55	53.26	11.66
其他水体	73.62	0.01	477.99	0.06	404.37	24.90	88.43	91.54
未利用土地	68 196.83	9.24	120 434.94	16.32	52 238.11	42.21	67.28	12.77

1) 6 a 间, 耕地中有 13 461.93 hm^2 水浇地和 94 951.81 hm^2 的旱地转出, 分别占西宁市内发生转化土地总面积的 4.96% 和 34.97%。耕地转化为建筑用地和交通用地的数量最多, 分别占二者新增面积的 59.67% 和 61.68%;

同时, 天然草地和未利用土地转化为旱地, 分别占新增旱地面积的 30.95% 和 40.71%; 有大量旱地转化为水浇地, 占新增水浇地面积的 73.90%, 水浇地净增 4 759.75 hm^2 。

2) 河流型湿地转入率略大于转出率, 面积净增

71.81 hm², 主要由天然草地、灌木林和水浇地转化而来, 分别占河流增加总面积的37.11%、32.99%和15.69%; 湖泊型湿地在各土地利用类型中转出面积最少, 转出率为20.55%, 而转入率高达53.26%, 面积净增40.73 hm², 主要由天然草地和未利用土地转入, 分别占湖泊新增面积的60.25%和38.52%。

3) 由于近年来水利设施增加、水产养殖业的发展以及区域降水量增加, 未利用土地和旱地转化为坑塘、水库等湿地的数量增加, 分别占 2005 年新增水体面积的30.65%和 30.21%。

4) 林地面积净增2 905.91 hm², 主要由天然草地和灌木林转入, 分别占新增林地面积的47.34%和39.71%; 天然草地转出面积较少, 转出率为24.90%, 而转入的草地面积占研究区发生转化土地总面积的30.40%, 草地面积净增6 541.33 hm², 主要由旱地、灌木林和未利用土地转化而来, 分别占新增草地面积的37.54%、32.19%和15.29%; 在灌木林新增面积中, 主要由80.40%的天然草地转化而来。

5) 未利用土地面积增加最大, 净增52 238.11 hm², 其中转入的面积占研究区发生转化土地总面积的29.84%。未利用土地主要以山地裸岩(荒漠)和盐碱地为主, 主要由旱地和天然草地转化而来, 分别占新增未利用土地面积的54.70%和35.09%。主要是由于大量边远坡耕地的撂荒, 以及局部草地退化而造成。

6) 西宁市市区面积由1950年的2 600 hm²增加为1999年的34 246.67 hm², 50 a间增加了12.17倍。随着人口的增长, 城市人均土地资源量减少, 人口密度高达333人/km², 比青海省平均高出近40倍, 比全国平均水平135人/km²高出近1.5倍, 单位面积城市生态压力增大。

3.1.3 土地利用结构及动态变化

1999—2005年, 西宁市土地利用类型发生了较大变化, 旱地面积减少最多, 减幅为31.97%, 其次为灌木林, 减幅为4.81%; 面积增加最大的是未利用土地, 增幅为76.60%, 其余依次为天然草地、建筑用地、水浇地和林地。比例增加最大的是水库、坑塘等湿地, 增加近500倍, 其次为交通用地, 增加约133倍, 建筑用地增加74.52%; 天然草地与河流比例比较稳定(表2)。

西宁市1999—2005年面积增加的各土地利用类型中 K_s 依次为: 其他水体>交通用地>未利用土地>湖泊>建筑用地>林地>水浇地>天然草地>河流; 面积减少的各土地利用类型中 K_s 为旱地>灌木林(表2)。该区域综合土地利用动态度为6.13%。

3.2 Markov过程模拟与预测

3.2.1 Markov模型

Markov分析是利用某一系统的现在状况及其发展动向预测该系统未来状况的一种概率预测方法与技术^[21]。在Markov过程中, 较简单和常用的是一阶Markov过程, 即系统转移到下一状态的概率 $S^{(t)}$, 仅取决于该系统前一个状态 $S^{(t-1)}$, 而与 $S^{(0)}$, $S^{(1)}$, $S^{(2)}$, \dots , $S^{(t-2)}$ 等 $(t-1)$ 时刻以

前的状态无关。这对于研究土地利用的动态变化较为适宜, 因为在一定条件下, 土地利用的动态演变具有Markov过程的性质: 1) 一定区域内, 不同土地利用类型之间具有相互可转化性; 2) 土地利用类型之间的相互转化过程包含着较多尚难用函数关系准确描述的事件。

设 $S^{(0)}$ 为土地利用初始状态向量, 记为:

$$S^{(0)} = (S_1^{(0)}, S_2^{(0)}, \dots, S_m^{(0)}) \quad (3)$$

式中 m ——系统可能存在的相互独立的状态数。

运用Markov过程的关键在于确定土地利用类型之间相互转化的初始转移概率矩阵 P , 若以 P_{ij} 表示预测对象由第 t 时刻状态 i 转向第 $t+1$ 时刻状态 j 的一步转移概率 $(i, j = 1, 2, \dots, n)$, 则一步转移概率矩阵为

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & \dots & P_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ P_{n1} & \dots & P_{nn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中 n ——研究区土地利用类型的数量。

以上矩阵满足以下条件:

1) $0 \leq P_{ij} \leq 1$, $(i, j = 0, 1, \dots, n)$, 矩阵每个元素都非负; 2) $\sum_{j=1}^n P_{ij} = 1$ $(i, j = 0, 1, \dots, n)$, 矩阵每行元素之和等于1。

如果Markov链的转移概率 $P_{ij}(t)$ 与 t 无关(即无论在任何时刻 t , 从状态 i 经过一步转移到达状态 j 的转移概率矩阵都相等), 则称此链为齐次Markov链。通常研究的Markov链都具有无后效性和齐次性两个特征, 满足以下基本方程

$$S^{(t)} = S^{(t-1)}P = S^{(0)}P^{\Delta t} \quad (5)$$

式中 Δt ——由初始状态转移的步长。

土地利用状态在人类活动长期作用($S(t) \rightarrow \infty$)下, 最终可能达到的各土地利用类型与它们初始状态 $S^{(0)}$ 的比例无关, 转移概率达到相对稳定状态, 即 t 期的土地利用状态与 $t-1$ 期的土地利用状态相等, 即

$$S^{(t)} = S^{(t-1)}, \text{ 而 } S^{(t)} = S^{(t-1)}P, \text{ 所以, } S^{(t)} = S^{(t)}P \quad (6)$$

式中 $S^{(t)}$ ——土地利用终级稳定状态。

将上式写成矩阵形式为

$$(S_1^{(t)} \ S_2^{(t)} \ \dots \ S_m^{(t)}) = (S_1^{(t)} \ S_2^{(t)} \ \dots \ S_m^{(t)}) \times P \quad (7)$$

展开上式, 得

$$\begin{cases} S_1^{(t)} = S_1^{(t)}P_{11} + S_2^{(t)}P_{21} + \dots + S_m^{(t)}P_{m1} \\ S_2^{(t)} = S_1^{(t)}P_{12} + S_2^{(t)}P_{22} + \dots + S_m^{(t)}P_{m2} \\ \dots \\ S_n^{(t)} = S_1^{(t)}P_{1n} + S_2^{(t)}P_{2n} + \dots + S_m^{(t)}P_{mn} \\ S_1^{(t)} + S_2^{(t)} + \dots + S_m^{(t)} = 1 \end{cases} \quad (8)$$

3.2.2 Markov转移概率矩阵的确定

利用表1中1999—2005年各土地利用类型的转化情况, 计算出步长为6 a的土地利用的转移概率矩阵, 在此基础上得出各土地利用类型的年平均转移状况, 即步长为1 a的初始状态下各地利用类型的转移概率矩阵

(表 3)。

表 3 西宁市 1999—2005 年土地利用类型年均转移概率
Table 3 Annual transition probability of land use types of Xining city from 1999 to 2005

P_{ij}	建筑用地	交通用地	水浇地	旱地	林地	灌木林	天然草地	河流	湖泊	其他水体	未利用土地
建筑用地	0.9422	0.0019	0.0231	0.0045	0.0012	0.0001	0.0156	0.0025	0	0.0001	0.0088
交通用地	0.0182	0.8964	0.0414	0.0043	0.0001	0	0.0148	0.0014	0	0	0.0234
水浇地	0.0108	0.0013	0.9553	0.0173	0.0005	0.0005	0.0069	0.0012	0	0	0.0064
旱地	0.0014	0.0001	0.0101	0.9283	0.0011	0.0017	0.0234	0.0004	0	0.0001	0.0335
林地	0.0011	0.0002	0.0029	0.0033	0.8910	0.0269	0.0656	0.0007	0	0.0001	0.0082
灌木林	0	0	0.0003	0.0020	0.0192	0.8901	0.0750	0.0004	0	0	0.0130
天然草地	0.0004	0.0001	0.0006	0.0041	0.0044	0.0158	0.9585	0.0005	0	0	0.0155
河流	0.0034	0.0004	0.0148	0.0122	0.0008	0.0023	0.0364	0.9195	0	0.0026	0.0075
湖泊	0.0001	0	0	0.0077	0.0058	0	0	0	0.9658	0	0.0206
其他水体	0	0	0.0020	0.0256	0	0	0.0034	0	0	0.9585	0.0105
未利用土地	0.0061	0.0002	0.0039	0.0243	0.0014	0.0027	0.0309	0.0005	0	0.0003	0.9297

3.2.3 Markov过程的模拟与检验

为了验证表3中年均转移概率是否准确，根据1999年各类土地利用类型的面积百分比值，得到初始状态向量矩阵 $S^{(0)}$ ：

$$S^{(0)} = [0.0106 \quad 0.0006 \quad 0.0680 \quad 0.2991 \quad 0.0294 \quad 0.0800 \quad 0.4137 \quad 0.0061 \quad 0.0001 \quad 0.0001 \quad 0.0924]$$

运用Markov基本方程（5）模拟2005年的土地利用结构 $S^{(6)}$ ，并与2005年实际的土地利用结构进行对比，模拟值和实际值十分接近（表4）。运用拟合误差率公式（9）分析，各类型所占比例的总体拟合误差率为6.13%；在11种土地利用类型中，拟合误差最大的是旱地，为4.29%，其次是未利用土地，为4.26%，其他土地利用类型的拟合误差都在0.60%之内。因此，利用Markov过程预测西宁市土地利用结构是可行的。

设拟合时点的状态变量为： $X_i = (X_1, X_2, X_3 \cdots X_n)$

拟合的结果状态变量为： $X_i' = (X_1', X_2', X_3' \cdots X_n')$

则拟合误差率为

$$E = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\frac{(X_i - X_i')^2}{X_i} / \sum_{i=1}^n X_i \right]} \times 100\% \tag{9}$$

表 4 利用 Markov 过程模拟土地利用结构的检验

Table 4 Examination of land use structure by using Markov process simulation

土地利用类型	面积实际值 /hm ²	比例(X) /%	面积模拟值 /hm ²	比例(X')/%	拟合误差 (E)/%
建筑用地	13 634.60	1.85	13 424.83	1.82	0.21
交通用地	1 042.75	0.14	946.29	0.13	0.35
水浇地	54 935.74	7.44	53 768.21	7.29	0.58
旱地	150 151.57	20.35	164 439.68	21.28	4.29
林地	24 607.70	3.33	23 904.49	3.24	0.52
灌木林	56 203.32	7.62	57 269.10	7.76	0.52
天然草地	311 820.87	42.25	311307.78	42.18	0.11
河流	4 558.64	0.62	4 600.46	0.62	0.07
湖泊	98.90	0.01	101.09	0.01	0.03
其他水体	477.99	0.06	460.04	0.06	0.10
未利用土地	120 434.94	16.32	107 745.06	15.6	4.26

3.2.4 动态模拟与预测

根据Markov模型理论，利用已知的初始状态概率矩阵，在外界驱动力不变的情况下，土地利用类型转移概率也不变，可模拟出某一初始年后若干年乃至终极稳定状态下各土地利用类型的比例，将各时期土地利用类型的比例乘以研究区总面积，即得到各时期各类土地利用类型面积。

利用年均转移概率矩阵（表3），根据2005年各类土地利用类型的面积百分比值，得到初始状态向量矩阵 $S^{(0)}$ ：

$$S^{(0)} = [0.0185 \quad 0.0014 \quad 0.0744 \quad 0.2035 \quad 0.0333 \quad 0.0762 \quad 0.42254 \quad 0.0062 \quad 0.00013 \quad 0.00065 \quad 0.1632]$$

根据式（5）～（8），利用 EXCEL/VBA 以及“规划求解”工具进行 Markov 预测，分别计算出研究区 2007—2017 年以及终极稳定状态时的各土地利用类型所占比例及面积（表 5）。根据预测结果，研究区未来 LUCC 有以下特点：

1) 耕地面积减少速度不断加快。从 2007 年到 2017 年，旱地面积平均每年减少 3658.202 hm²；至终极稳定状态时，比例将由 2005 年的 20.35%降至 11.71%；水浇地却呈增加趋势，平均每年增加 152.33 hm²，至终极稳定状态时，比例将由 2005 年的 7.44%增加至 7.91%。耕地主要转化为居民点及工矿用地、园地和交通用地，首先与人口增长、社会经济发展增加了对建设用地的需求量；其次，由于农业结构调整，大量的耕地转为经济价值更高的果园、菜园和经济作物用地。

2) 土地利用/覆被的良性转化表征生态环境的恢复态势。未来10 a，在退耕还林（草）政策的继续实施下，与2005年相比，西宁市林地比例增加0.19%，灌木林比例增加0.13%，天然草地比例增加1.25%。在未来气候暖湿化背景下，降水量增加，冰川积雪融水增多，西宁市河流型湿地、湖泊型湿地以及其他湿地类型面积将增加，坑塘、水库等湿地增幅最大，为139.17%，其次为湖泊型湿地，增幅为93.45%。

3) 未利用土地可开发利用程度低。据预测，至2017年西宁市的未利用土地占西宁市总面积的19.26%，较2005年比例增加2.94%，至终极稳定状态时，未利用土地

比例达18.75%，较2017年比例将减少0.51%。未利用土地主要包括分布于高山阳坡面、石质低山和峡谷的裸岩，河流和湖泊周边的盐碱地，河流、森林边缘的荒草地，以及沙地和戈壁滩，大部分属于利用难度较大，仅有局部尚可开发利用的土地。

4) 建设用地比例持续增加，但增速放缓。未来10 a，西宁市居民点及工矿等建筑用地比例将从2005年的1.85%增加到2017年的3.15%，至终极稳态时将达到4.21%；交通用地比例将从0.14%增加到0.22%，至终极稳

态时将达到0.27%，这是西宁市未来10a工业化和城市化向纵深推进的结果。同时，建设用地增速将逐渐放缓，1999～2005年建筑用地和交通用地 K_s 为12.37%和24.56%，为历史最高时期，2005～2007年分别降至6.60%和5.68%，2007～2009年，分别降为5.34%和4.44%，2011～2017年，分别降为3.59%和2.59%。这是由于经济发展达一定水平后，对建设用地的使用方式逐渐从单纯的外延扩张转向内涵挖掘，经济增长与建设用地增长间的弹性系数开始下降，从而使建设用地利用率提高。

表5 基于 Markov 的西宁市土地利用变化预测
Table 5 Prediction of land use change of Xining based on Markov

土地利用 类型	2007 年		2009 年		2011 年		2017 年		终极稳定状态	
	比例/%	面积/hm ²	比例/%	面积/hm ²	比例/%	面积/hm ²	比例/%	面积/hm ²	比例/%	面积/hm ²
建筑用地	2.09	15 435.43	2.31	17 083.02	2.60	19 153.20	3.15	23 278.19	4.21	31 050.55
交通用地	0.16	1 161.13	0.17	1 264.13	0.19	1 410.26	0.22	1 629.28	0.27	1 984.75
水浇地	7.51	55 405.99	7.56	55 779.02	7.65	56 429.30	7.71	56 929.29	7.91	58 402.38
旱 地	18.98	140 057.86	17.84	131 649.40	16.06	118 481.81	14.02	103 475.85	11.71	86 439.24
林 地	3.37	24 896.60	3.41	25 142.76	3.46	25 510.20	3.52	25 982.95	3.65	26 959.76
灌木林	7.63	56 298.81	7.65	56 434.61	7.65	56 452.34	7.74	57 150.76	7.99	58 962.64
天然草地	42.49	313 567.22	42.71	315 153.89	42.98	317 182.85	43.51	321 069.88	44.43	327 890.23
河 流	0.63	4 624.35	0.64	4 689.88	0.64	4 755.37	0.67	4 956.83	0.75	5 522.04
湖 泊	0.02	114.91	0.02	130.39	0.02	147.30	0.03	191.33	0.05	367.72
其他水体	0.08	598.67	0.10	711.55	0.11	845.94	0.15	1 143.19	0.28	2 048.59
未利用土地	17.05	125 806.04	17.61	129 928.36	18.65	137 598.44	19.26	142 159.48	18.75	138 339.11

4 结论与讨论

2000年西部大开发战略实施以来，随着经济的快速发展和人口的逐年增加，西宁市的增容扩建以及工业的发展，以及交通、能源等基础设施建设迅速发展，驱使城郊建设和交通用地大幅增长，尤其导致靠近城郊的大量耕地被占用，其中旱地面积减少最多，减幅为4.81%，包括城市居民点与工矿等建筑用地与交通用地分别增加74.20%和147.38%。主要转化轨迹为：天然草地、未利用土地→旱地→水浇地→建筑和交通用地。

西宁市2005年林地和天然草地分别增加13.39%和2.14%，具体转化轨迹为：天然草地→林地；旱地、未利用土地→天然草地→灌木林→林地，其中也有草地直接转化为林地；充分表明自2000年以来实施的域退耕还林（草）、小流域治理等生态建设工程极大地改善了西宁市的生态环境。在目前外界驱动力不变的情况下，未来10 a乃至终极稳定状态，河流、湖泊等湿地的持续增加，以及草地和林地等植被的增加是研究区土地利用/覆被变化的主要方向。同时，随着区域人口剧增和人类经济活动加剧，在低山梁峁丘陵区，由于坡陡，土层松薄、植被稀少、暴雨集中、地质灾害频繁等自然因素，造成了新的水土流失，从而导致裸岩等未利用土地显著增加。

草地和耕地是西宁市主要土地利用类型。1999～2005年西宁市土地利用整体处于不稳定调整期，与未来10 a以及至终极稳定状态时的预测结果对比，6 a间，共有占区域总面积 73.58%的土地利用方式发生了变化，为

西宁市土地利用动态度的历史最高时期，表现为一种突变性质，这主要与人为因素有关。

由于西宁市具有黄土覆被边缘地区的多样化生态地理特征，森林、灌丛植被具有人类活动的明显痕迹，人类活动的规模、范围、作用方式、影响强度等因素成为本区森林灌丛植被及其生境变化与差异的重要原因之一。在自然与人为因素驱动下，土地利用/覆被各类型间转换频繁且复杂。因此，必需根据西宁市自然地理特征，采取合理的治理方式以使土地利用方式向良性发展，从而促进良好的生态环境效应。首先要充分发挥退耕还林（草）和小流域治理工程的作用，突出川水扩张、浅山治理、脑山修养；二是应做到植被自然恢复与人工恢复相结合、林业生态保护与经济效益相结合、农业与畜牧业相结合、环境保护和经济发展相结合；三是需重视流域生态保护建设中综合配套技术的集成和措施的整合；四是在兼顾经济效益、社会效益和生态环境效益的条件下，合理开发未利用土地；五是对已实施的生态建设工程进行科学评价，总结经验和不足，从而指导今后工作。

[参 考 文 献]

- [1] 高向军, 罗明, 张惠远. 土地利用和覆被变化 (LUCC) 研究与土地整理[J]. 农业工程学报, 2001, 17(4): 151—155.
Gao Xiangjun, Luo Ming, Zhang Huiyuan. Study on land use and cover change and land consolidation[J]. Transactions of the CSAE, 2001, 17(4): 151—155. (in Chinese with English abstract)

- [2] 李秀彬. 全球环境变化研究的核心领域—土地利用/土地覆被变化的国际研究动向[J]. 地理学报, 1996, 51(06): 553-557.
Li Xiubin. A review of the international researches on land use/land cover change[J]. Acta Geographica Sinica, 1996, 51(06): 553—557. (in Chinese with English abstract)
- [3] 陈百明, 刘新卫, 杨红. LUCC研究的最新进展评述[J]. 地理科学进展, 2003, 22(01): 22—29.
Cheng Baiming, Liu Xinwei, Yang Hong. Review of most recent progresses of study on land use and land cover change[J]. Progress In Geography, 2003, 22(01): 22—29. (in Chinese with English abstract)
- [4] 郭旭东, 刘国华, 陈利顶, 等. 欧洲景观生态学研究展望[J]. 地球科学进展, 1999, 14(04): 40—44.
Guo Xudong, Liu Xinwei, Yang Hong, et al. Perspective of landscape ecology in europe[J]. Advance In Earth Sciences, 1999, 14(04): 40—44. (in Chinese with English abstract)
- [5] 张世文, 唐南奇. 土地利用/覆被变化(LUCC)研究现状与展望[J]. 亚热带农业研究, 2006, 2(3): 221—225.
Zhang Shiwen, Tang Nanqi. Land use—cover change (LUCC) research present situation and outlook[J]. Subtropical Agriculture Research, 2006, 2(3): 221—225. (in Chinese with English abstract)
- [6] 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 CSAE, 2005, 21(3): 121—125. (in Chinese with English abstract)
- [7] 张钰, 刘桂民, 马海燕, 等. 黑河流域土地利用与覆被变化特征[J]. 冰川冻土, 2005, 26(6): 740—746.
Zhang Yu, Liu Guiming, Ma Haiyan, et al. Changing characteristics of land—use and land—cover in the Heihe River basin[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 26(6): 740—746. (in Chinese with English abstract)
- [8] 于开芹, 冯永军, 郑九华, 等. 城乡交错带土地利用变化及其生态效应[J]. 农业工程学报, 2009, 25(3): 213—218.
Yu Kaiqin, Fen Yongjun, Zheng Jiuhua, et al. Land use changes and their ecological effects in urban—rural ecotone[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(3): 213—218. (in Chinese with English abstract)
- [9] 杨述河, 闫海利, 郭丽英. 北方农牧交错带土地利用变化及其生态环境效应: 以陕北榆林市为例[J]. 地理科学进展, 2004, 23(6): 49—55.
Yang Shuhe, Yan Haili, Guo Liying. The land use change and its eco—environmental effects in transitional agro—pastoral region: A case study of Yulin city in Northern Shaanxi province[J]. Progress In Geography, 2004, 23(6): 49—55. (in Chinese with English abstract)
- [10] 赵庚星, 李静, 王介勇, 等. 基于TM图像和GIS的土地利用/覆被变化及其环境效应研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(10): 78—82.
Zhao Gengxing, Li Jing, Wang Jieyong, et al. Analysis of land use/cover change and its environment effects based on TM imagery and GIS[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(10): 78—82. (in Chinese with English abstract)
- [11] 谢林花. 典型农牧交错区土地利用变化驱动力分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(10): 56—62.
Xie Linghua. Driving force analysis of land use changes in the typical farming—pastoral ecotone[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(10): 56—62. (in Chinese with English abstract)
- [12] 阎金凤, 陈曦. 基于GIS的干旱区LUCC分析和模拟方法探讨[J]. 干旱区地理, 2003, 22(2): 185—191.
Yan Jinfeng, Chen Xi. Analysis and stimulation method discussion on LUCC of arid region based on GIS[J]. Arid Land Geography, 2003, 22(2): 185—191. (in Chinese with English abstract)
- [13] 苗运法, 方小敏, 戴霜, 等. 依据孢粉记录初探青海湟水流域二级阶地的成因[J]. 地质通报, 2007, 26(12): 1697—1702.
Miao Yunfa, Fang Xiaoming, Dai Shuang, et al. Origin of the second terraces in the Huangshui drainage area, Qinghai, China, studied based on sporopollen records[J]. Geological Bulletin Of China, 2007, 26(12): 1697—1702. (in Chinese with English abstract)
- [14] 王先彦, 鹿化煜, 季峻峰, 等. 青藏高原东北部湟水流域新近纪风尘堆积源区分析[J]. 沉积学报, 2006, 24(3): 365—369.
Wang Xianyan, Lu Huayu, Ji Junfeng, et al. Identification of dust sources of the miocene—pliocene red clay deposit in the northeastern tibetan plateau[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(3): 365—369. (in Chinese with English abstract)
- [15] 顾延生, 李长安, 郭广猛, 等. 青藏高原东北缘第三纪构造—气候事件与环境变迁[J]. 地质科技情报, 2000, 19(2): 1—4.
Gu Yansheng, Li Chang'an, Guo Guangmeng, et al. Tectonic—climatic events and environmental change of Tertiary in Northeastern Margin of Qinghai—Xizang (Tibet) Plateau[J]. Geological Science and Technology Information, 2000, 19(2): 1—4. (in Chinese with English abstract)
- [16] 卓玛措, 冯起, 李锦秀. 青海河湟地区水资源综合开发与区域经济发展研究[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(2): 95—99.
Zhuo Macuo, Feng Qi, Li Jinxiu. The study on water resources exploitation and regional economy of Hehuang Areas in Qinghai[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007, 21(2): 95—99. (in Chinese with English abstract)
- [17] 李万寿, 李晓东. 人类活动对湟水流域生态环境影响[J]. 干旱区研究, 1995, 12(2): 18—23.
Li Wanshou, Li Xiaodong. Effects of human activities on the ecological environment of huangshui valley[J]. Arid Zone Research, 1995, 12(2): 18—23. (in Chinese with English abstract)
- [18] 陈桂琛, 周立华, 彭敏, 等. 青海省湟水地区森林灌丛植被遥感分析及其主要特征[J]. 西北植物学报, 2001, 21(4): 719—725.
Chen Guichen, Zhou Lihua, Peng Min, et al. Remote sensing interpretation and its characteristics of the forest and shrub

- vegetation in Huang Shui area, Qinghai Province[J]. *Acta Botanica Boreali—Occidentalia Sinica*, 2001, 21(4): 719—725. (in Chinese with English abstract)
- [19] 朱会义, 李秀彬. 关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论[J]. *地理学报*, 2003, 58(5): 643—650.
Zhu Huiyi, Li Xiubin. Discussion on the index method of regional land use change[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(5): 643—650. (in Chinese with English abstract)
- [20] 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, 1977. 1—25.
- [21] Etienne Pardoux. Markov Processes and Applications: Algorithms, Networks, Genome and Finance[M]. New York: John Wiley and Sons Ltd, 2008: 28—52.

Analysis and simulation prediction on LUCC of Xining city based on RS and GIS

Fu Yang¹, Xiao Jianshe^{1*}, Xiao Ruixiang¹, Sa Wenjun², Li Xilai³

(1. *Qinghai meteorological science institute, Xining 810001, China;*

2. *Foreign Affairs Office, Agricultural and Animal Husbandry Bureau of Qinghai, Xining 810008, China;*

3. *School of Agriculture and Animal Science, Qinghai University, Xining 810003, China)*

Abstract: Xining city is located in the east of the Qinghai-Tibetan Plateau. With the development of human activities, studying spatial transformation regulation of land use and land cover change (LUCC) in this region is important to reveal the driving mechanism of the regional changes caused by environmental improvement campaign. These changes included land use patterns of animal husbandry in urban and rural areas, eco-environmental effects, socioeconomic situation, etc. GIS and the related models were applied to interpret precisely Landsat-TM remote sensing image of Xining city in 1999 and 2005, and quantitative statistic and phasor diagram on land use / cover had been worked out. Dynamic characteristics of LUCC were analyzed, and Markov transition matrix of various land use types was calculated by using map algebra as well. The results showed that cropland, grassland and uncultivated land were main types of LUCC in Xining city from 1999 to 2005. Variation of land use pattern had taken place promptly in 73.58% of the study area. Wetlands area such as rivers, lakes, etc. grassland area and woodlands area increased significantly during six years, indicating strong positive consequence of environmental improvement campaign in Xining since 2000. Results of simulation and prediction showed that under conditions of constant external impacts, cropland area in Xining city would continue to decrease, and construction land area such as buildings, roads, etc. will increase in the coming ten years. Increase of woodlands, grassland, rivers, lakes as well as wetland is certainly favorable to ecological environment.

Key words: land use/cover change(LUCC), RS, GIS, Markov process, ecology, ecological improvement, evaluation of effect, simulation and prediction, Xining city