近 20 年厦门市土地利用动态变化及预测

施益强[1,2], 吴志强[1]

(1. 集美大学 理学院, 福建 厦门 361021; 2. 集美大学 影像信息工程技术研究中心, 福建 厦门 361021)

摘 要: 基于 RS 与 GIS 技术,提取 1994,2000,2006 和 2013 年 4 期遥感影像土地利用信息,利用土地利用转移矩阵、动态度模型、概率转移矩阵及马尔可夫模型,研究了近 20 a 厦门市土地利用动态变化特征,并预测其未来 10 a 的土地利用变化趋势。结果表明,近 20 a 厦门市土地利用变化速度前期较快,后期趋缓,变化面积高达 46.75%;土地利用变化的总体特征与建设海峡西岸经济区龙头及加强海洋经济的城市发展战略相符;建设用地变化仍为该区域未来 10 a 土地利用变化的主导类型,需加强对耕地和林地的保护以促进土地利用可持续性发展。

关键词: TM/ETM$^+$ 影像; 土地利用动态变化; 马尔可夫模型; 厦门市

文献标识码: B **文章编号**: 1000-288X(2014)05-0176-05 **中图分类号**: P237, F301.24

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.05.040

Dynamic Changes and Prediction of Land Use in Xiamen City in Recent 20 Years

SHI Yi-qiang[1,2], WU Zhi-qiang[1]

(1. *School of Science, Jimei University, Xiamen, Fujian* 361021, *China*;
2. *Research Center of Image Information Engineering and Technology, Jimei University, Xiamen, Fujian* 361021, *China*)

Abstract: Based on RS and GIS techniques, land use information of Xiamen City was extracted from four Landsat images in the years of 1994, 2000, 2006 and 2013. By the methods of transition matrix, dynamic degree model, transition probability matrix and Markov model, the dynamic change characteristics of land use in Xiamen City during the recent 20 years were analyzed, and the tendency of land use change in the next 10 years was also predicted. The result showed that land use changed with higher speed and then decreased, and there were about 46.75% areas changed in recent 20 years. The overall characteristics of land-use change fit well with the city development strategy to become the economic leader in West Coast Economic Zone, and strengthen the marine economy. The change of construction land will still be the leading type of land use change in Xiamen City from 2014 to 2023, and it is necessary to protect farmland and forest land to promote sustainable development of land use.

Keywords: TM/ETM$^+$ images; dynamic changes of land use; Markov model; Xiamen City

人类面临的许多环境问题都与土地利用/覆被变化有关,其是全球环境变化的重要组成部分,对其开展研究显得尤为重要[1-3]。土地利用的研究是揭示人类开发建设导致其结构与功能变化趋势的一种有效手段[4],利用空间信息技术研究土地利用时空动态变化规律及其驱动机制已成为城市遥感的热点[5-9],借助数学模型定量说明土地利用结构变化趋势和过程,可为区域土地规划提供决策依据[10]。马尔可夫模型作为预测土地利用变化的较好方法,近年来已在土地利用变化模拟中得到较多应用[3,10-14]。厦门市是国内最早建立的经济特区之一,是海峡西岸经济区龙头城市,由于经济快速发展,其土地利用发生了深刻而迅速的变化,并已出现了一些针对该区域土地利用变化的相关研究[15-19],但这些研究的时间跨度普遍相对较短,且较少涉及利用数学模型进行土地利用变化预测方面的研究。本文试图利用 RS 和 GIS 空间信息技术,以近 20 a 时间跨度,综合运用转移矩阵、动态度模型及马尔可夫模型,研究厦门市 1994—2000, 2000—2006, 2006—2013 年的土地利用动态变化特征,并在此基础上分析其 2014—2023 年未来 10 a 的

收稿日期:2013-11-01 修回日期:2013-11-13

资助项目:福建省教育厅科技项目"基于空间信息技术的厦门市 PM 2.5 时空特征及影响机理研究"(JA13186); 国家科技支撑计划子课题"南方红壤水土流失治理技术研究与示范"(201309110001)

作者简介:施益强(1977—),男(汉族),福建省龙海市人,硕士,讲师,主要从事 GIS 与 RS 空间信息技术应用、城市环境遥感教学和研究。E-mail:yqshi_2004@jmu.edu.cn。

土地利用变化趋势,以期为土地利用调整与优化提供科学决策支持。

1　研究区概况

厦门市位于东经 118°04′04″,北纬 24°26′46″,地处东南沿海,陆地面积约 1 699 km^2,海域面积约 300 km^2,由思明区、湖里区、翔安区、同安区、集美区、海沧区等 6 个行政区构成。地形由西北向东南急剧倾斜,形成丘陵和带状平原(厦门岛以丘陵为主),属亚热带气候,温和多雨,年均降雨量约1 200 mm,年均气温约 21 ℃,夏无酷暑,冬无严寒。2012 年共实现 GDP 约 2 817 亿元,比上年增长12.1%,近年来 GDP 增幅呈稳中有升态势,产业结构不断优化,其中第二产业比例略有下降,第三产业比例持续上升。

2　数据资料与研究方法

2.1　数据资料

主要包括影像、地图与社会经济统计资料。其中 4 期 TM/ETM$^+$ 影像(轨道号 119/43)时相分别为 1994 年 5 月 12 日,2000 年 4 月 18 日,2006 年 3 月 2 日和 2013 年 1 月 16 日;厦门市 1∶5 万地形图(2006 年);厦门市 4 个年份(1994,2000,2006 和 2013)社会经济统计资料;"九五"至"十一五"城市总体规划图。影像处理、分类、空间分析及专题制图等主要利用 Erdads Imagine 9.2,Envi 4.8 以及 ArcGIS 9.3等专业软件完成。

2.2　数据处理

预切出涵盖厦门市的 4 幅影像,以 1∶5 万地形图为基准进行几何精校正(影像到地图空间的校正,影像到影像的配准)。将 1994 年影像校正到 1∶5 万地形图,再将其他 3 幅影像配准到 1994 年基准影像空间上,校正、配准中采用二次多项式变换,利用最邻近法以 30 m 空间分辨率重采样,并投影为 GCS_WGS_1984 坐标系,再以行政边界矢量数据精确裁剪出研究区。校正精度满足利用多时相影像进行动态变化监测的误差小于 0.5 个像元的要求。由于 Landsat 7 机载扫描行校正器故障,导致 2003 年 5 月 31 日后影像出现条带,为使影像可用,采用多影像固定窗口回归模型修复[20],即利用多景不同时相影像,采用局部回归方法对一景影像进行缝隙填充,回归区域的面积为固定值,修复后的 2006 和 2013 年影像条带去除效果较好。最后利用线性拉伸方法进行影像增强,将 4 幅影像较窄亮度拉伸到全辐射亮度级范围,并用 RGB 543 合成假彩色。

2.3　研究方法

2.3.1　*变化检测方法*　变化检测主要有光谱直接比较法和分类后比较法两大类,前者较易产生伪变化信息而影响检测精度,后者通过不同时相分类结果比较提取变化信息,确定变化的数量、类型及分布,本文采用后者进行变化检测。基于判别语句 IF I_1 ! = I_2 Then I_2 Else Null,其中 I_1,I_2 为前后时相土地利用类型,空间叠加分析的建模采用 Spatial Modeler[7],提取 1994—2000,2000—2006,2006—2013 及 1994—2013 年的土地利用变化灰度图,其像元灰度值体现不同时相新增土地利用的类型、空间分布和数量,但无法获知具体由前一时相哪种地类转变而来,类型转变信息可通过转换矩阵求取,计算公式如下:

$$NC_{(i,j)} = NC_{(i)} \times 10 + NC_{(j)} \quad (1)$$

式中:$NC_{(i,j)}$——i,j 两个年份土地利用变化图($j > i$);$NC_{(i)}$——i 年份土地利用分类图;$NC_{(j)}$——j 年份土地利用分类图;式(1)适用于土地利用分类小于 10 类。

基于式(1)获取 $NC_{(1994,2000)}$,$NC_{(2000,2006)}$,$NC_{(2006,2013)}$ 和 $NC_{(1994,2013)}$,其像元灰度值体现类型转变,如 1994 年耕地(灰度值 1)在 2000 年变为林地(灰度值 2),则在 $NC_{(1994,2000)}$ 图上,其灰度值为 1×10+2=12,代表耕地到林地的转变,用地类型未变化的灰度值的十位数与个位数相等。

2.3.2　*动态变化模型*　土地利用动态变化模型是研究土地利用变化的过程、程度及趋势的主要手段。土地利用动态度可定量描述土地利用变化速度。单一土地利用类型动态度[21]表达的是一定时间范围内某种土地利用类型的数量变化情况,计算公式如下:

$$K = \left(\sqrt[\frac{1}{T}]{\frac{U_b}{U_a}} - 1 \right) \times 100\% \quad (2)$$

式中:K——研究时段内某种土地利用类型动态度;U_a,U_b——研究期初及期末某种土地利用类型的数量;T——研究时段长。当 T 时段设定为年时,K 值为研究时段内某种土地利用类型的年变化率。

2.3.3　*马尔可夫模型*　马尔可夫链是一种具有"无后效性"的特殊随机运动过程,其假设动态系统在 $T+1$ 时刻状态和 T 时刻状态有关,而与 T 时刻前状态无关。区域内不同土地利用类型的相互转化是复杂过程,难以用函数关系准确描述,即在一定条件下土地利用类型变化符合马尔可夫随机过程性质,用其研究土地利用类型动态转化是可行的[14],可定量获取地类之间相互转化情况,如预测地类经过一段时间后转为其他地类所占的比例,地类变化后所占总面积的结构比例等,便于分析土地利用的演变过程。应用

马尔可夫模型的关键在于确定转移概率矩阵[13-14]：

$$\boldsymbol{P}_{ij}=\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \cdots & P_{nn} \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中：P_{ij}——第 i 类用地类型转化为第 j 类用地类型的转移概率；n——研究区用地类型数目；$P_{ij}=\frac{C_{i-j}}{\mathrm{LU}_i}$，其中：$C_{i-j}$——研究期内用地类型 i 转化为用地类型 j 的面积；LU_i——初始时期用地类型 i 的总面积；i,j——1,2,3,…,n；转移矩阵每一项元素 P_{ij} 都要满足两个条件：(1) $\sum_{j=1}^{n}P_{ij}=1$，即每行元素和都为 1；(2) $0\leqslant P_{ij}\leqslant 1$，各元素值为非负。

3 结果与讨论

3.1 土地利用动态变化分析

3.1.1 分类结果与评价 根据影像季相、实际可解译能力及厦门市土地利用结构特征，参考全国土地资源分类，将土地利用类型分为：耕地、林地、未利用地、建设用地、水体与滩涂以及养殖用地等 6 类。利用具有较好统计特性及分类精度的最大似然监督法分类，训练区选取时综合考虑地物形状、大小、色调、阴影、纹理、位置布局等特征，并结合地形图、土地利用现状图、实地调查和非监督分类结果等辅助数据。由于“同物异谱、异物同谱”及空间分辨率等限制，需对分类结果进行后处理以提高精度。利用 Clump 和 Eliminate处理细碎斑块，采用目视判读，结合辅助数据，辅以专家经验知识，人机交互地修改明显存在误分、错分的地类。基于误差矩阵评价分类结果的精度，各年份均抽样 240 个点，各土地类型至少抽样 30 个点，得到的使用者精度均在 0.8 以上，总精度均高于0.85，Kappa 系数分别为 0.86，0.91，0.92 和0.89，均高于 0.7 的最低允许判别精度[22]，表明采用的影像处理和分类方法是适宜的。

3.1.2 动态变化分析 从表 1—3 计算可得，1994—2000，2000—2006，2006—2013 年，土地利用变化的面积占总面积分别为 33.65%，28.68%和 23.40%；从表 4 统计可得，1994—2013 年，土地利用类型稳定的面积约为 1 009.60 km^2（占总面积的 53.25%），土地利用发生变化的面积高达 46.75%，表明近 20 a 随经济发展和城市化进程加快，厦门市土地利用发生了很大变化，但其变化速度呈减小趋势。

表 1 1994－2000 年各土地利用类型面积转移矩阵 km^2

土地利用类型		2000 年					
		耕 地	林 地	未利用地	建设用地	水 体	滩涂与养殖
1994 年	耕 地	310.66	115.60	10.85	88.21	0.52	32.49
	林 地	132.74	393.89	4.50	70.28	0.78	2.60
	未利用地	12.85	17.65	1.98	7.90	0.06	0.37
	建设用地	54.64	7.80	7.92	179.02	2.46	8.80
	水 体	0.06	0.00	0.35	1.91	310.63	2.88
	滩涂与养殖	2.47	0.26	0.15	12.87	37.98	61.72

表 2 2000－2006 年各土地利用类型面积转移矩阵 km^2

土地利用类型		2006 年					
		耕 地	林 地	未利用地	建设用地	水 体	滩涂与养殖
2000 年	耕 地	300.52	63.17	8.94	133.06	0.11	7.63
	林 地	63.12	448.80	2.43	19.02	0.10	1.74
	未利用地	8.19	1.13	1.17	15.00	0.02	0.25
	建设用地	70.00	18.93	5.09	243.00	0.78	22.40
	水 体	0.21	0.43	0.64	9.85	297.77	43.54
	滩涂与养殖	14.94	0.80	1.15	22.19	8.72	61.06

表 3 2006－2013 年各土地利用类型面积转移矩阵 km^2

土地利用类型		2013 年					
		耕 地	林 地	未利用地	建设用地	水 体	滩涂与养殖
2006 年	耕 地	198.36	96.26	2.76	123.10	0.25	36.25
	林 地	17.52	481.84	0.42	26.81	0.17	6.50
	未利用地	4.63	1.90	0.81	10.44	0.18	1.47
	建设用地	55.40	24.33	3.51	292.26	1.97	64.66
	水 体	0.11	0.28	0.93	18.69	233.40	54.07
	滩涂与养殖	2.73	1.89	1.30	52.34	22.45	55.92

表 4　1994－2013 年各土地利用类型面积转移矩阵　　km^2

土地利用类型		2013 年					
		耕 地	林 地	未利用地	建设用地	水 体	滩涂与养殖
1994 年	耕 地	164.86	162.40	3.71	178.24	1.46	47.68
	林 地	82.58	404.77	1.28	93.25	0.56	22.36
	未利用地	4.74	21.43	0.30	12.08	0.00	2.26
	建设用地	24.17	17.26	1.95	167.47	2.09	47.72
	水 体	0.46	0.19	0.86	21.14	233.26	59.92
	滩涂与养殖	1.93	0.44	1.62	51.47	21.06	38.94

(1) 1994—2013 年耕地数量减少非常明显,共减少了 279.61 km^2,年减少率为3.59%,减少速度由慢变快,其在 2006—2013 年高达 6.82%,主要转出流向是建设用地与林地,表明在经济利益和城市化驱动下,大量耕地向单位面积经济产值更高的土地利用类型转变;(2) 1994—2013 年林地面积总体上保持平稳,其转入与转出面积相当,年增长率仅为0.01%。减少的部分主要是较平坦地势的林地(包括果园)被开发为建设用地与耕地,转入部分主要来源于耕地和未利用地,在城市扩展较为迅速背景下,这一特征与发展园林城市的目标相吻合;(3) 1994—2013 年建设用地面积增加最多,年增长率达到3.74%,主要转入来源为耕地与林地(转入面积分别为 178.24 与 93.25 km^2)。建设用地增长与大批工业区、投资区及房地产兴起等有密切联系,其中 1994—2000 年增长率高达 5.54%,而 2000—2006 与 2006—2013 年则分别回落为 3.47%与 2.45%,总体呈现增长趋缓态势;(4) 1994—2013 年水体用地面积略微减少,年减少率仅为 1.05%,呈现先增加后减少的趋势,转出的主要流向是滩涂与养殖用地;相反,滩涂与养殖用地面积则净增了 103.42 km^2,年增长率达到 3.42%,增加的面积数量仅次于建设用地,其中在 2006—2013 年,面积增加非常明显,年增长率高达 6.96%,转入的主要类型为水体,而转出主要是由于滩涂开发引起,如通过填海造地建设码头等;(5) 1994—2013 年未利用地变化迅速,面积共减少了 31.08 km^2,呈逐年减少态势,年减少率高达 7.27%,转出的主要流向是林地与建设用地,转入主要来源于耕地,其中在 2006—2013 年减少率更是高达 9.41%,其中较为明显的是同安区和海仓区的西北部未利用地的转变(表 5)。

表 5　1994,2000,2006,2013 年各类型面积变化及年变化率

土地利用类型	1994—2000 年		2000—2006 年		2006—2013 年		1994—2013 年	
	面积变化/km^2	年变化率/%	面积变化/km^2	年变化率/%	面积变化/km^2	年变化率/%	面积变化/km^2	年变化率/%
耕 地	－44.91	－1.39	－56.45	－1.92	－178.24	－6.82	－279.61	－3.59
林 地	－69.59	－2.02	－1.94	－0.06	73.23	1.86	1.70	0.01
未利用地	－15.05	－7.38	－6.33	－4.59	－9.70	－9.41	－31.09	－7.27
建设用地	99.55	5.54	81.92	3.47	81.52	2.45	262.99	3.74
水 体	36.60	1.84	－44.96	－2.25	－49.06	－2.45	－57.42	－1.05
滩涂与养殖	－6.59	－0.97	27.76	3.86	82.25	6.96	103.42	3.42

3.2　土地利用变化趋势预测

依据马尔可夫模型确定 1994—2013 年土地利用类型的转移概率矩阵(表 6),并以 2013 年各地类面积占全部地类面积的百分比为初始状态矩阵,从而由初始状态矩阵与转移概率矩阵获得 2014—2023 未来 10 a间土地利用变化趋势(图 1)。从图 1 可初步分析厦门市未来 10 a 间各土地利用类型所占结构比例变化的总体趋势:耕地面积将逐步减少,至 2023 年将减少约 98.21 km^2,主要是被建设用地等占用;林地所占比例将呈先减少后趋稳态势,特别是 2014—2018 年未来 5 a 的减少趋势较为突出;未利用地变化幅度不明显,其所占结构比例将稳定在约 0.69%;建设用地面积将持续保持增长态势,从 2013 年初始状态所占的 27.62%上升到 2023 年的 41.02%,预计未来 10 a其结构比例将净增加约 13.40%,其主要由经济发展与城市扩展所驱动;水体用地将呈现先减少后又逐渐增加趋稳态势;滩涂与养殖用地的比例将逐渐增大,但增长的态势亦趋于平缓,预计 2023 年面积可达约 328.94 km^2,其所占结构比例将会增加约 5.81%,其变化趋势基本上能体现发展海洋经济的城市战略。

表 6 1994－2013 年各土地利用类型转移概率矩阵

土地利用类型		2013 年					
		耕 地	林 地	未利用地	建设用地	水 体	滩涂与养殖
1994 年	耕 地	0.295 3	0.290 9	0.006 6	0.319 2	0.002 6	0.085 4
	林 地	0.136 5	0.669 3	0.002 1	0.154 2	0.000 9	0.037 0
	未利用地	0.116 2	0.525 0	0.007 5	0.295 9	0.000 0	0.055 3
	建设用地	0.092 7	0.066 2	0.007 5	0.642 5	0.008 0	0.183 1
	水 体	0.001 5	0.000 6	0.002 7	0.066 9	0.738 5	0.189 7
	滩涂与养殖	0.016 7	0.003 8	0.014 0	0.445 8	0.182 4	0.337 3

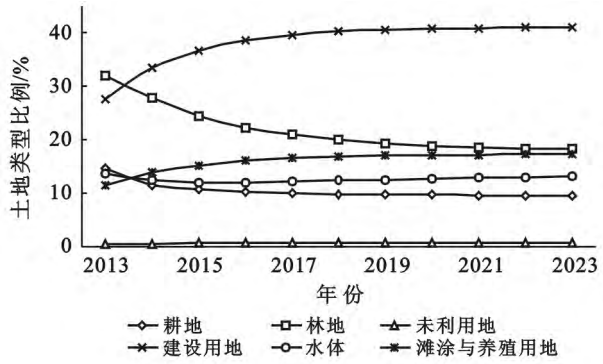


图 1 厦门市 2013－2023 年各土地利用类型结构比例变化趋势

4 结 论

(1) 该区域主要土地利用类型为建设用地、林地和耕地。土地利用发生变化的面积比例高达 46.75%，其中 1994—2000，2000—2006，2006—2013 年变化的面积比例分别为 33.65%，28.68% 和 23.40%，总体上呈现变化速度较快但趋缓格局。建设用地变化是该区域土地利用变化的主导类型，其驱动力主要来自经济发展与城市扩展。

(2) 耕地与未利用地减少非常明显，特别是在 2006—2013 年年减少率分别高达 6.82%，9.41%，主要流向建设用地；林地和水体总体上保持平稳；建设用地与滩涂养殖用地面积迅速增加，分别净增加了 262.99，103.42 km^2，其中建设用地年增加率高达 5.54%，而滩涂养殖用地在 2006—2013 年年增长率高达 6.96%，其主要由水体转入。土地利用变化总体特征基本反映了建设海峡西岸经济区龙头与加强海洋经济等城市发展战略。

(3) 未来 10 a 中，耕地与林地将逐步减少，水体与滩涂养殖用地平缓增长，未利用地保持平稳，建设用地仍将继续较快增加(到 2023 年其占总面积比例将高达 41.02%)。在如此变化趋势下，需加强耕地保护，减少城市扩展对林地植被的侵占，以促进土地利用的可持续，改善生态环境质量。

在社会经济发展战略和土地利用政策保持相对稳定前提下，运用马尔可夫模型预测的土地利用变化趋势较其预测的具体变化数值具有更好的可信度，今后可考虑结合其他预测方法以提高其数值预测精度，并可进一步对土地利用的景观格局、结构优化及生态效应等深入研究。

[参 考 文 献]

[1] 刘彦随，陈百明. 中国可持续发展问题与土地利用/覆被变化研究[J]. 地理研究，2002，21(3)：324-330.

[2] 孙美琴，赵成义，施枫芝，等. 近 20 a 塔里木河干流区土地利用变化特征[J]. 干旱区研究，2013，30(1)：16-21.

[3] 解修平，周杰，张海龙，等. 关中—天水经济区土地利用变化模拟预测及景观格局动态变化[J]. 干旱区地理，2013，36(3)：482-490.

[4] 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(2)：206-212.

[5] 孙善磊，周锁铨，魏国栓，等. 环杭州湾地区城市扩张的遥感动态监测[J]. 自然资源学报，2008，23(2)：327-335.

[6] 牟凤云，张增祥，迟耀斌，等. 基于多源遥感数据的北京市 1973—2005 年间城市建成区的动态监测与驱动力分析[J]. 遥感学报，2007，11(2)：257-268.

[7] 施益强，朱晓铃，张辰臣. 厦门市城市扩展遥感动态监测及其驱动力分析[J]. 集美大学学报：自然科学版，2010，15(2)：150-155.

[8] Sudhira H S, Ramachandra T V, Jagadish K S. Urban sprawl: metrics, dynamics and modeling using GIS[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2004, 5(1): 29-39.

[9] Eugenia Kalnay, Cai Ming. Impact of urbanization and land use change on climate [J]. Nature, 2003, 423 (6939): 528-531.

[10] 徐岚，赵羿. 利用马尔柯夫过程预测东陵区土地利用格局的变化[J]. 应用生态学报，1993，4(3)：272-277.

[11] 李黔湘，王华斌. 基于马尔柯夫模型的涨渡湖流域土地利用变化预测[J]. 资源科学，2008，30(10)：1541-1546.

[12] 周锐，苏海龙，王新军，等. 基于 CLUE-S 模型和 Markov 模型的城镇土地利用变化模拟预测：以江苏省常熟市辛庄镇为例[J]. 资源科学，2011，33(12)：2262-2270.

(下转第 186 页)

2.6 评价结果分析

由表 6 可知，代家沟、犬门沟、凉泉沟 3 条沟的和危险等级分别为 2.53(Ⅲ)，1.91(Ⅱ)和 1.80(Ⅱ)，采用可拓方法评价的结果和实际勘察的结果基本一致，说明可拓层次分析法在泥石流危险性评价中是切实可行的。

3 结 论

运用可拓层次分析法(EAHP)对佃户营泥石流危险性指标进行定量化分析，根据当地实际情况，选取佃户营代家沟、犬门沟、凉泉沟泥石流沟的实测数据代入模型，进行泥石流危险性评价，评价结果与实际情况相吻合。研究表明，可拓层次分析法(EAHP)所建立的评价模型能较好地应用于泥石流危险性评价中，该评价方法实用且有效。

[参 考 文 献]

[1] 孙绍骋. 灾害评估研究内容与方法探讨[J]. 地理科学进展，2001，20(2)：122-130.

[2] 刘厚成，谷秀芝. 基于可拓层次分析法的泥石流危险性评价研究[J]. 中国地质灾害与防治学报，2010，21(3)：61-66.

[3] 淡小龙，徐卫亚，梁桂兰. 可拓方法在泥石流危险性评价中的应用[J]. 岩石力学与工程学报，2009，28(12)：28-35.

[4] Bai Liping，Wang Yeyao，Sun Jiali. Application of extension theory in risk zoning of debris flow in Beijing[J]. Global Geology，2009，12(1)：40-45.

[5] 诸克军，张新兰，肖荔瑾. Fuzzy AHP 方法及应用[J]. 系统工程理论与实践，1997，17(12)：64-69.

[6] 许若宁，翟晓燕. 层次分析法中 Fuzzy 判断矩阵的建立及其排序[J]. 系统工程，1988，6(5)：52-61.

[7] 蔡文，杨春燕，林伟初. 可拓工程方法[M]. 北京：科学出版社，1997.

[8] 高洁. 可拓聚类预测方法及其在邮电业务总量预测中的应用[J]. 系统工程，2000，18(3)：73-77.

[9] 王维早，杨涛，许强. 河北省元氏县佃户营泥石流灾害形成机理及预报方法的研究[J]. 地球与环境，2011，39(1)：63-68.

[10] 王欣宝，王昕洲，王艳. 河北元氏县佃户营泥石流危险性评价与防治[J]. 中国地质灾害与防治学报，2000，11(3)：93-97.

[11] 哀俊廷. 元氏县佃户营“96·8”泥石流灾害调查[J]. 河北水利水电技术，1998(3)：160-161.

(上接第 180 页)

[13] 张春华，王宗明，宋开山，等. 基于马尔可夫过程的三江平原土地利用动态变化预测[J]. 遥感技术与应用，2009，24(2)：210-216.

[14] 王剑，徐美. 基于马尔柯夫模型的漾濞江流域土地利用变化预测[J]. 水土保持研究，2011，18(5)：91-95.

[15] 全斌，朱鹤健，晏路明，等. 厦门岛土地利用变化趋势预测[J]. 资源科学，2004，26(5)：98-104.

[16] 陈鹏，许燕红. 厦门市集美区土地利用变化的时空特征分析[J]. 水土保持研究，2012，19(3)：94-97.

[17] 朱晓铃. 厦门市土地利用/覆被遥感动态监测[J]. 厦门理工学院学报，2012，20(1)：66-70.

[18] 陈本清，徐涵秋. 城市扩展及其驱动力遥感分析：以厦门市为例[J]. 经济地理，2005，25(1)：79-83.

[19] 黄静，崔胜辉，李方一，等. 厦门市土地利用变化下的生态敏感性[J]. 生态学报，2011，31(24)：7441-7449.

[20] 李二珠，谭琨，杜培军，等. 基于多时相遥感数据的徐州市植被净初级生产力估算及相关性分析[J]. 遥感技术与应用，2013，28(4)：689-696.

[21] 陈本清，徐涵秋. 厦门市土地利用年际变化遥感分析[J]. 地球信息科学，2004，6(3)：99-104.

[22] 陈芸芝，陈崇成，汪小钦，等. 多源数据在森林资源动态变化监测中的应用[J]. 资源科学，2004，26(4)：146-152.