

基于遥感数据的城市空间扩张研究

任鹏飞, 甘 淑, 宗慧琳, 谢显奇

(昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093)

摘 要: 城市化是区域人口增长与社会经济发展的综合进程,其最为明显的特征是城市空间扩张。采用基于 RULEGEN 的决策树分类方法从 Landsat ETM⁺ 影像中提取昆明市建设用地信息,应用皮尔逊卡方检验和香农熵模型计算城市空间扩张的自由度和蔓延度。结果显示,在近 8 a 中,该市城市扩张呈现较高的自由性和蔓延性以及明显的各方位不均衡性;空间扩张的时段自由度和蔓延度均呈现不同程度的下降趋势,城市发展趋于紧凑化。

关键词: 遥感探测; 建设用地; 空间扩张; 城市蔓延

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2014)03-0116-05

中图分类号: P237

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.03.022

A Study of Urban Spatial Expansion Based on Remote Sensing Data

REN Peng-fei, GAN Shu, ZONG Hui-lin, XIE Xian-qi

(Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China)

Abstract: Urbanization is an integrated process of regional population growth and socio-economic development. The most notable feature of urbanization is the urban expansion in space. Built-up area information was extracted from Landsat ETM⁺ images using decision tree classification method based on RULEGEN. Pearson's chi-square test and Shannon's entropy model were used to calculate the degrees of freedom and sprawl of urban expansion. Results show that the urban expansion had higher degrees of freedom and sprawl, moreover, it was imbalanced in different directions apparently in the recent 8 years. The degrees of freedom and sprawl in time spans declined and urban development tended to be compact.

Keywords: remote sensing; construction land; spatial expansion; urban sprawl

城市扩张是城市发展的进程之一。城市化的快速发展使得城市及其周边地区的自然环境发生剧烈变化,并表现为城市对其他用地类型的侵占^[1],尤其是对周边耕地的占用,而土地覆被类型的改变在一定程度上影响着区域土地利用格局的变化^[2]。

城市用地的扩张通常有以下几个含义,例如:较高的经济产能、就业机会,对环境和生态结构的破坏,环境污染,地表水体减少以及地下水位下降,温度升高,非正规的移民区,农田和林地的减少,食物紧缺等^[3]。因此,快速的城市扩张对社会的可持续发展带来了新的挑战,对于区域的社会、经济的发展具有重要影响作用。

目前已有相关研究涉及了城市扩张的模式、进程、起因和结果,对策等。遥感数据和 GIS 技术已被

广泛地用于各项分析研究中,利用遥感数据可确定城市增长速率及空间结构特征^[4],GIS 技术可对训练区进行分析和模拟,如杨亮洁等^[5-9]在遥感和地理信息系统技术的支持下,分别对义乌、厦门、保定、福清、北京等市进行城市扩张研究并从多个方面进行扩张驱动力分析。

目前有 20 多种相关模型应用,例如:居住地的扩散模拟、商业选址、城镇面积、交通网的扩张分析以及城市土地利用动态研究等,利用这些模型可较好的理解城市增长,但多数情况下需要大量的输入数据,而在许多国家,尤其是发展中国家,普遍缺少可有效利用的基础数据。皮尔逊卡方检验和香农熵模型常被用于城市地理研究中,其中,皮尔逊卡方检验可揭示增长的差异性^[10],香农熵能确定蔓延状况^[11]。但是

收稿日期:2013-06-08

修回日期:2013-07-24

资助项目:国家自然科学基金项目“基于遥感与 GIS 的滇东南石漠化监测、评价及过程模拟研究”(41261092),“云南山区不同地域环境下农户生计与土地利用互动研究”(71163023)

作者简介:任鹏飞(1986—),男(汉族),内蒙古自治区土左旗人,硕士,研究方向为遥感信息处理与技术应用。E-mail:494590944@qq.com。

通信作者:甘淑(1964—),女(汉族),云南省腾冲县人,博士教授,博士生导师,主要从事资源环境管理及 3S 技术应用研究。E-mail:N1480@qq.com。

以往的研究在应用这些模型时都有一定的局限性,如:Almeida等^[12]利用卡方检验和熵来确定城市模式的总体自由度,其着手于评估节点信息的不确定性;Yeh等^[11]利用不同形式的熵来分析城市模式;Kumar等^[13]应用熵模型来确定某一特定时间城市的蔓延状况。而城市扩张不应仅仅针对某一瞬间的空间结构特征或某一时间段的空间结构变化,要将两者相结合进行分析。

本研究旨在利用多时段的遥感数据,应用统计模型从空间、时间维度来分析城市增长。首先选用3个时期的遥感卫星影像来确定研究区的城市土地覆被类别,随后应用皮尔逊卡方检验和香农熵模型等进行统计分析,并采用象限分割方法深化研究区城市空间扩张定量研究。

1 资料与方法

云南省省会昆明市,地理坐标为东经 102°10′—103°40′,北纬 24°23′—26°33′,南北长 237.5 km,东西宽 152 km,总面积约 21 473 km²。城区坐落于滇池坝子,海拔约 1 891 m,属低纬度高原山地季风气候。主城区包括:五华区、盘龙区、官渡区、西山区和呈贡区,即市内 5 区。本研究选取的研究区即为昆明市主城区。

本研究数据选取 Landsat 7 经过辐射纠正和几何纠正的系统级纠正产品,影像获取时间为 2002 年 2 月 9 日,2006 年 1 月 3 日,2010 年 1 月 30 日。3 期影像质量较好,所选研究区内均无云遮挡。

2 城市建设用地信息提取

2.1 数据预处理

多光谱图像的各波段之间经常是高度相关的,它们的 DN 值以及显示出来的视觉效果往往很相似,主成分分析(PCA)可以较好的去除波段之间多余的信息、将多波段的图像信息压缩到比原波段更为有效的少数几个转化波段中。其中,第 1 主成分包含所有波段中 80% 的方差信息,前 3 个主成分包含了所有波段中 95% 以上的信息量。由于各波段之间不相关,主成分波段可以生产更多颜色、饱和度更好的彩色合成图像。

植被指数常作为遥感解译的重要参数,它是从多光谱遥感数据中提取的有关地表植被状况的光谱量数值,能数量化地反映植物状况,有助于增强遥感影像的解译力,以排除非林地信息产生的不必要干扰。归一化植被指数对土壤背景的变化较为敏感,削弱了地形和群落结构阴影的影响,常用来反映植被状况、

植被覆盖、生物量信息,是目前应用最广泛的一种植被指数^[14]。其公式为:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (1)$$

式中:NDVI——归一化植被指数; NIR——近红外波; Red——红光波段,在 ETM 影像中,分别为第 4、3 波段。

各波段间的相关性较大,没有必要选用全部波段,根据山地城市地物特征,以及 ETM 影像各波段信息含量以及波谱特征,经过反复研究对比,试验选用 ETM 影像的 3,4,5,7 波段以及归一化差值植被指数(NDVI),第 1 主成分(PCA1)等 6 个波段进行组合。

2.2 城市建设用地信息提取

决策树算法是依据规则把遥感数据集一级级往下细分以定义决策树的各个分支。决策树由一个根结点、一系列内部结点及终极结点组成,每一结点只有一个父结点和二个或多个子结点。在“原级”与“终级”之间形成一个分类树结构,在树结构的每一分叉结点处,可以选择不同的物质用于进一步有效的细分类。这就是决策树分类器特征选择的基本思想^[15]。

试验采用基于 RULEGEN 的决策树进行分类。RULEGEN 基于 ENVI 开发的一个决策树插件,预测变量既可以是离散变量,也可以是连续变量。预测离散变量的算法有两种:CRUISE 与 QUEST 算法。预测连续变量的算法有一种:GUIDE 算法。试验中选用预测离散变量的 QUEST(quick, unbiased, efficient statistical tree)算法。QUEST 是 Loh 等^[16]于 1997 年提出的建立决策树的一种新的二叉树算法,该算法将变量选择和分叉点选择分开进行,可以适用于任何类型的自变量。其原理公式为:

$$\sum_{k=1}^K a_k x_k \leq C \quad (2)$$

式中: x_k ——参与分类的各变量分量; a_k ——各分叉点的阈值选取,其值为 $\{a_1, a_2, \dots, a_k, C\}$ 。

结合研究目的与实际情况,将研究区分为城市建筑用地、植被、水体、裸地 1(有少许植被覆盖)、裸地 2(基本无植被覆盖)、其他等 6 类;选取一定数目的训练样本,利用 ENVI 软件中的计算 ROI 可分离性工具(compute ROI separability)计算任意类别间的统计距离,这个距离用于确定两个类别间的差异性程度。统计距离是基于 Jeffries—Matusita 距离和转换分离度来衡量训练样本的可分离性。统计距离值的范围为 0~2,>1.9 说明样本之间可分离性好,属于合格样本;<1.8,需要重新选择样本;<1,可将两个样本

合成一类样本。经过反复试验,选取的 3 期影像分类训练样本的类别间统计距离均 >1.9 ,符合试验要求。

选用基于预测离散变量 QUEST 算法进行分类时,选择所采集的分类训练样本依次生成决策树,然后运用所生成的分类决策树对 3 期影像分类,得到 3 个时期的土地覆被分类图。

为了更客观地评价分类精度,本试验采用部分研究区数据以及多处实地调查数据建立验证数据样本的混淆矩阵,计算出总分类精度、Kappa 系数等分类精度指标。以 2010 年为例,总体精度为 89%,Kappa 系数为 0.855 7,分类精度较高,满足试验要求。

2.3 城市建设用地信息统计

针对研究区山区城市的特点,本研究采用象限统计法来统计研究区建设用地信息。具体以核心商业区为中心,做半径为 26 km 的圆形缓冲区。将其均等的划分为 8 份,即北、东北、东、东南、南、西南、西、西北 8 个象限,2010 年土地覆被分类情况如附图 1 所示。

统计各时期影像在各方位的建设用地信息(表 1),从表中可以看出,研究区在各时期内的各个方向的发展状况有显著差别。按 2 个时段来分可直观的显示出城市在各时间段内各方位的增长情况(表 2)。

表 1 昆明市主城区各方位建设用地面积统计

km²

年 份	各方位建设用地面积							
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
2002 年	10.28	13.02	12.54	36.95	17.00	12.19	14.83	11.57
2006 年	16.00	18.50	21.15	47.26	20.88	15.26	18.29	15.22
2010 年	20.07	18.85	29.74	73.69	30.45	15.37	18.96	16.50

表 2 昆明市主城区各方位建设用地增长面积统计

km²

年 份	各方位建设用地增长面积							
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
2002—2006 年	5.72	5.48	8.61	10.31	3.88	3.07	3.46	3.65
2006—2010 年	4.07	0.35	8.59	26.43	9.57	0.11	0.67	1.28

3 城市空间扩张分析

本研究在进行区域空间扩张研究的总体思路为:首先依据遥感探测出的研究区建设用地面积测算出城市扩张的理论增长值,其次应用皮尔逊卡方检验和香农熵模型来评定城市扩张的自由度和蔓延度,最后从模式、进程、总体状况等 3 个方面分析城市增长状况。

3.1 理论增长值测算处理

为进一步了解区域增长的差异性,可将观测值与理论增长值进行对比分析。其中,城建区的预期增长

值可由预期增长模型获得,即微观变量与宏观变量的比值^[12]。将表 2 视为一矩阵 M ,元素为 M_{ij} ,其中 $i=1,2,\dots,n$ (表示特定时间段,即表中的行), $j=1,2,\dots,m$ (表示特定区域,即表中的列)。则第 i 行第 j 列的预期增长值 M_{ij}^E 可由公式(3)计算出,结果见表 3。

$$M_{ij}^E = \frac{M_i^s \times M_j^s}{M_g} \quad (3)$$

式中: M_{ij}^E ——第 i 行第 j 列的预期增长值; M_i^s —— i 行总值; M_j^s —— j 列总值; M_g ——各行各列总值, $m=8, n=2$ 。

表 3 昆明市主城区各方位建设用地预期增长值

km²

年 份	各方位建设用地预期增长值							
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
2002—2006 年	4.54	2.70	7.98	17.04	6.24	1.47	1.92	2.29
2006—2010 年	5.25	3.13	9.22	19.70	7.21	1.71	2.21	2.64

通过比较观测值与理论值的差异,可以看出各方位扩张的偏差程度。其中,E 和 SE 方向的观测值与预期值的偏差较大,表明这两个方向有较高的自由性,对其他方向向量的依赖性小。

3.2 空间自由度扩张分析

皮尔逊卡方检验揭示的是观测值偏离预期值的程度,即自由度。该方法可用来检验同类别土地覆被变化的自由程度。本研究利用城市扩张的观测值与预期

理论值,应用公式(4)可得到各时间段的卡方检验值(x_i^2),2002—2006 年为 10.55,2006—2010 年为 9.15。

将公式(3)中的 i 和 j 互换, m 换成 n ,即将行列互换,便可得到各全区域的自由度值(x_j^2),为更为直观的体现研究区内各方位扩张相对自由程度,可选取 8 个区域中最大的自由度值做分母,将各方位自由度

值归算到 0~1 的范围内,结果见表 4。

$$x_i^2 = \sum_{j=1}^m \frac{(M_j - M_j^E)^2}{M_j^E} \tag{4}$$

式中: x_i^2 ——第 i 时间段的自由度; M_j ——相应时间段第 j 列的观测值; M_j^E ——相应时间段第 j 列的预期值。

表 4 昆明市主城区各方位建设用地自由度

项目	各方位自由度							
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
自由度	0.57	5.33	0.09	4.96	1.67	3.24	2.31	1.51
相对自由度	0.11	1.00	0.02	0.93	0.31	0.61	0.43	0.28

总体自由度可通过公式(5)计算,结果为 19.67。

$$x^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{(M_{ij} - M_{ij}^E)^2}{M_{ij}^E} \tag{5}$$

式中: x^2 ——总体自由度; M_{ij} ——第 i 行第 j 列的观测值; M_{ij}^E ——第 i 行第 j 列的预期值。

从表 4 中可看出,研究区在两个时段的自由度都比较高。N,E,S,NW 区域的自由度较低,而 NE,SE,SW,W 区域的自由则较高,其中 NE 方向具有 8 个方向中的最大值。

高的总体自由度说明城市在总体规划时权重不均衡且缺乏连贯性,而高的区域自由度则表明该区域发展过程中存在不持续性迹象。研究区各时段自由度均较高,表明各区域间在时间维度上的相对自由性较高。高的自由度并不表示蔓延,只能体现区域增长模式或进程的差异性。

3.3 空间蔓延状况分析

香农熵是一种用于确定城市蔓延状况的较好方法^[11]。熵值的大小可评定区域的蔓延程度,阈值区

间为 0 到 $\ln(m)$ 。 $\ln m$ 值为 0 表示该区域是紧凑的,值靠近 $\ln(m)$ 表示区域分布呈蔓延状。本研究利用各区域于各时段的增长比例数据,应用香农熵计算公式(6)可得到各时段的香农熵(H_i),2002—2006 年为 2.00,2006—2010 年为 1.61,两者均大于最大限值的半值(时段香农熵最大限值为 2.08)。将公式(6)中的 i 和 j 互换, m 换成 n ,即将行列互换,便可得到各区域的香农熵(H_j),为直观显示区域蔓延程度,可计算相对熵值,即将香农熵的阈值范围归算到 0~1,相对熵(H_i')的可由公式(7)计算,各方位的香农熵、相对香农熵值计算结果见表 5。

$$H_i = - \sum_{j=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \tag{6}$$

$$H_i' = [- \sum_{j=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} / \ln m] \tag{7}$$

式中: H_i ——各时段的香农熵; H_i' ——各时段的相对香农熵; p_{ij} ——特定时段的某一区域增长比例值与该时段增长比例总和的比值,即第 i 行第 j 列元素与第 i 行元素总和的比值。

表 5 昆明市主城区各方位香农熵值

项目	各方位香农熵值							
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
熵值	0.62	0.18	0.66	0.64	0.64	0.13	0.40	0.51
$\ln m$	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69
$1/2 \ln m$	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
相对熵值	0.90	0.26	0.96	0.93	0.93	0.19	0.58	0.74

总体香农熵(H)可通过公式(8)计算,结果为 2.51。

$$H = - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \tag{8}$$

式中: H ——总体香农熵; P_{ij} ——某一时段的某一区域增长比例值与总体增长比例值的比值,即第 i 行第 j 列元素与所有元素总和的比值。

从表 5 中可看出,区域 N,E,SE,S,W,NW 这 7

方向的熵值均远高于最大限值的半值(相对熵值为 0.5),表明这几个区域的增长呈明显的蔓延状态,尤其是 E,SE,S 方向最为突出,其值接近最大阈值,呈高度蔓延状。整体区域只有 NE 和 SW 方向为非蔓延状。此外,研究区各时段的香农熵值均远大于最大限值的半值,因而可判定研究区增长呈蔓延状态,但是这种蔓延状发展状态呈下降趋势,由 2002—2006

年时段的 2.00 下降到 2006—2010 年时段的 1.61。此结果表明研究区的发展逐渐向紧凑型靠拢。需要说明的是,下降的蔓延趋势并非增长不再蔓延,而是其蔓延速度变缓,只有当熵值位于最大极限值的半值之下时,才表明城市增长是非蔓延状的。

3.4 结果讨论

选用 8 个空间象限划分研究区域,相较于采用行政界限划分而言,其优点是能够更加直观地了解、分析城市各方位的空间扩张情况。试验选取研究区核心商业区为象限中心,以最近一期遥感影像(2010 年影像)所体现出的扩张状况为基础选取象限半径。试验运用遥感探测方法获取研究区 8 a 中建设用地的变化过程如图 1 所示。从图 1 中可以看出,研究区各方位均有不同程度的增长,尤其是 E,SE 和 S 方向的增长较为明显,而 SW 和 W 方向增长则较为缓慢、基本持平。其客观因素为 W 和 SW 为滇池区域,可发展空间小,发展基本饱和,体现出地形因素对城市发展的制约性。E,SE,S 等区域的发展较为迅猛,其原因是受到建设呈贡新区政策的影响。

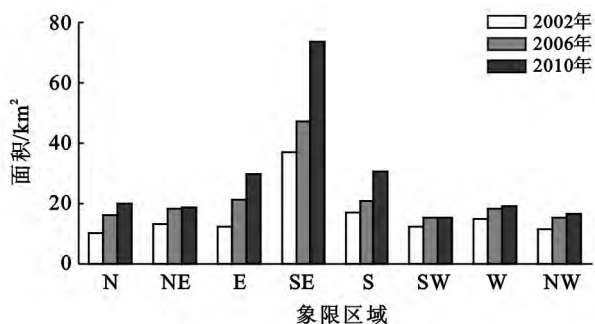


图 1 昆明市主城区各方位建设用地面积统计

试验选用皮尔逊卡方检验和香农熵两个统计模型来分析其扩张的自由度和蔓延度,从而进一步分析城市空间扩张规律及其隐含的发展趋势(图 2)。

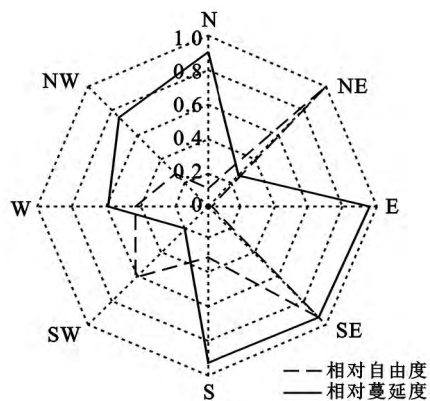


图 2 昆明市主城区各方位相对自由度、蔓延度雷达图

NE 方向具有极高的自由度(8 个方向区域中最高)和较低的蔓延度,表明其发展自由性较高,但区域受地形影响较大,导致该区域发展速度缓慢、趋于紧凑化。NW,N,E,S 这 4 个方向有较低的自由度和较高的蔓延度,表明区域受外在导向性影响较大,区别是:S 扩张在增速而 NW,N,E 的扩张速度存在不同程度下降。SE 方向的自由度和蔓延度均较高,表明其发展较为自由,而且发展呈蔓延状。该区域扩张增速明显,表明其目前呈现粗放型发展状况。N 方向有极低的自由度、较高的蔓延度,说明该区域受外在影响较大,其发展是循序渐进的,即人为的有序利用,且区域扩张呈增速趋势。

4 结论

研究区有较高的总体自由度且呈蔓延状增长,但是两者都呈减缓趋势,城市发展趋于紧凑化。2002—2006 年,城市发展受政策、规划等因素的约束较小,有高度的自由化,发展呈现较高的蔓延态势。2006—2010 年,城市增长速度有所加快,但自由性和蔓延性有较为明显的下降,城市在快速发展的同时逐渐向紧凑型、集约型方向靠拢,符合现代城市的可持续发展趋势。

本研究引用的分析模型所存在的局限在于没有充分考虑政策因素的导向性影响,尽管计算出的城市预期增长值是依据过去以及现在的增长情况来确定,可间接体现已有政策的延续性,但缺乏预期政策因素的预期导向性影响。因而在分析大型城市时,计算预期增长值要添加预期政策导向权重系数来体现其导向性。此外,分析过程没有考虑城市交通网络布局、地形等因素带来的影响。因此,收集更为全面的资料,设定各方面影响要素的合理权重将会得出更为详尽、准确的分析结果。

[参 考 文 献]

- [1] 何丹,蔡建明,周璟. 天津城市用地时空扩展研究[J]. 水土保持通报,2009,29(3):56-60.
- [2] 陈红顺,夏斌. 快速城市化地区土地利用变化及驱动因素分析[J]. 水土保持通报,2012,32(1):54-59.
- [3] Hedblom M, Soderstrom B. Woodlands across Swedish urban gradients: status, structure and management implications [J]. Landscape and Urban Planning, 2008,84 (1):62-73.
- [4] Maktav D, Erbek F S, Jurgens C. Remote sensing of urban areas [J]. International Journal of Remote Sensing, 2005,26(4):655-659.

(下转第 149 页)

表 6 不同降雨条件下红椿沟泥石流风险

泥石流 编号	体积/ 10 ⁴ m ³	降雨量/ (mm·d ⁻¹)	一次淤积最长 距离/m	危害性 <i>D</i>		危险性 <i>H</i>		风险等级
				<i>D</i> 值	等 级	<i>H</i> 值	等 级	
①	3.136	37.19	782.33	402	较大级	0.000 89	低	低
②	5.425	64.34	843.94	551	重大级	0.002 93	低	中
③	8.849	104.94	909.30	620	重大级	0.011 86	中	高
④	14.301	169.61	984.67	709	重大级	0.072 25	高	高
⑤	23.841	282.74	1 079.32	861	重大级	0.284 22	很高	很高
⑥	41.379	490.74	1 201.25	1 100	特大级	0.810 00	很高	很高

3 结 论

(1) 本文将泥石流强度引入到风险计算公式,推导出基于强度指数的泥石流危险性计算公式 $H = P(L) \times I$,可以表征泥石流的规模和可能破坏能力。

(2) 山阳县城区,当 6 h 降雨量达到 198.4 mm 以上时,红椿沟发生泥石流的概率为 1,当 6 h 降雨量小于 198.4 mm 时,泥石流发生概率递减。同时提出山阳县城区周边泥石流的发生概率公式为 $P(L) = 0.051e^{0.015r}$,可以按照降雨量计算泥石流的发生概率。

(3) 根据危险性与危害性确定不同降雨条件下红椿沟风险: $H = 0.000\ 89, D = 402$,风险低; $H = 0.002\ 93, D = 551$,风险中; $H = 0.011\ 86, D = 620$,风险高; $H = 0.072\ 25, D = 709$,风险高; $H = 0.284\ 22, D = 861$,风险很高; $H = 0.81, D = 1\ 100$,风险很高。

(4) 泥石流强度指数没有提及地震等地质因素,希望在以后的研究中进一步完善。

[参 考 文 献]

[1] 吴树仁,石菊松,张春山,等.地质灾害风险评估技术指南初论[J].地质通报,2009,8(8):995-1005.

[2] 张茂省,唐亚明.地质灾害风险调查方法与实践[J].地质通报,2008,27(8):1205-1216.

[3] United Nations Department of Humanitarian Affairs. Mitigating Natural Disasters: Phenomena, Effects and Options: A Manual for Policy Makers and Planners [M]. New York: United Nations, 1991:1-164.

[4] 唐川,Jorg Grunert.滑坡灾害评价原理和方法研究[J].地理学报,1998,53(S):149-157.

[5] 刘希林,莫多闻.泥石流风险评价[M].成都:科学技术出版社,2003:1-100.

[6] Jonkman S N, van Gelder P H A J M, Vrijling J K. An Overview of Quantitative Risk Measures for Loss of Life and Economic Damage [J]. Hazardous Materials, 2003, 99(1):1-30.

[7] Fell R, Ho K K S, Lacasse S, et al. A Framework for Landslide Risk Assessment and Management[C]//Landslide Risk Management. Vancouver, Canada: A A Balkema Publishers, 2005.

(上接第 120 页)

[5] 杨亮洁,牟乃夏,薛重生.城市遥感图像的地理分析与空间格局演变研究[J].测绘科学,2005,30(3):70-72.

[6] 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.

[7] 曾磊,宗勇,鲁奇.保定市城市用地扩展的时空演变分析[J].资源科学,2004,26(4):96-103.

[8] 汪小钦,徐涵秋,陈崇成.福清市城市时空扩展的遥感监测及其动力机制[J].福州大学学报:自然科学版,2000,28(2):111-115.

[9] 范作江,承继成,李琦.遥感与地理信息系统相结合的城市扩展研究[J].遥感信息,1997(3):12-16.

[10] Bonham-Carter G F. Geographic information systems for geoscientists: Modelling with GIS[M]. Ontario: Pergamon Press, 1994.

[11] Yeh A G O, Li X. Measurement and monitoring of urban sprawl in a rapidly growing region using entropy [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2001,67(1):83-90.

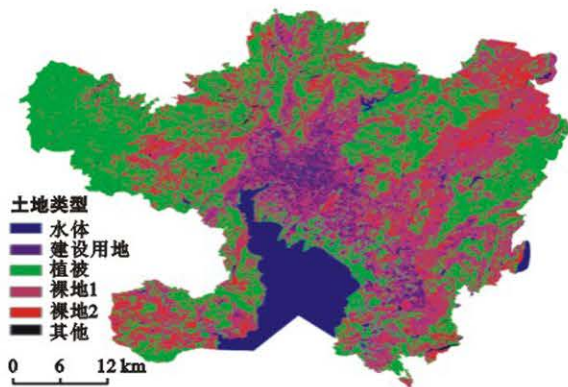
[12] Almeida C M, Monteiro A M V, Mara G, et al. GIS and remote sensing as tools for the simulation of urban land-use change[J]. International Journal of Remote Sensing, 2005,26(4):759-774.

[13] Kumar J A V, Pathan S K, Bhanderi R J. Spatio-temporal analysis for monitoring urban growth:A case study of Indore City[J]. Journal of Indian Society of Remote Sensing, 2007,35(1):11-20.

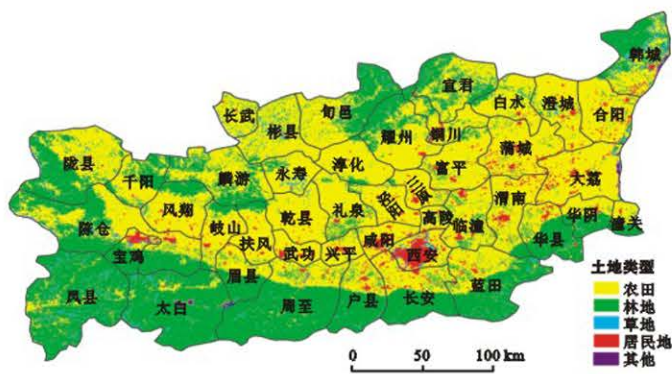
[14] 郭凯,孙培新,李卫国.利用 ERDAS IMAGINE 从遥感影像中提取植被指数[J].西部探矿工程,2005(6):210-212.

[15] Fried M A, Brodeley C E. Decision tree classification of land cover from remotely sensed data[J]. Remote Sensing of Environment, 1997,61(3):399-409.

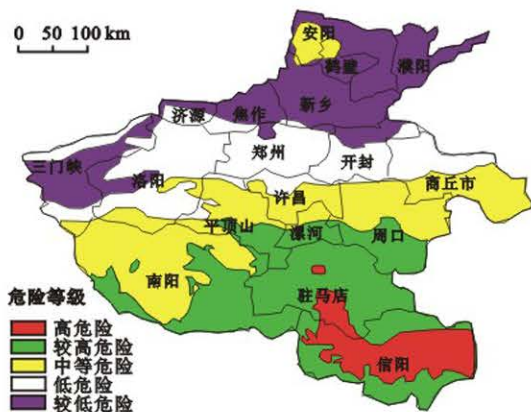
[16] Loh W Y, Shih Y S. Split selection methods for classification trees[J]. Statistica Sinica, 1997(7):815-840.



附图1 云南省土地覆被类型



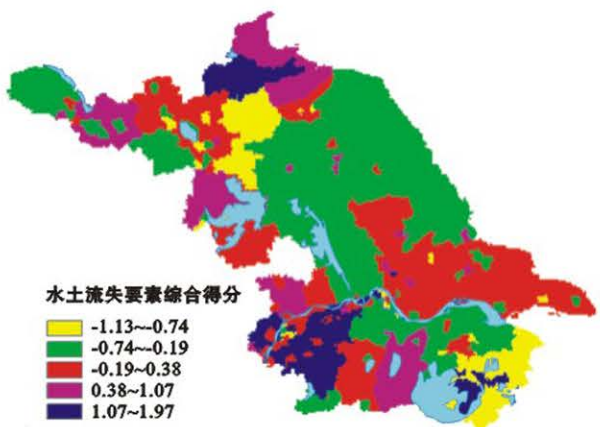
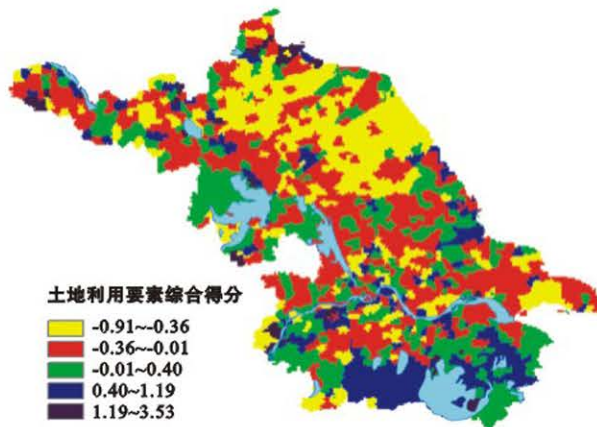
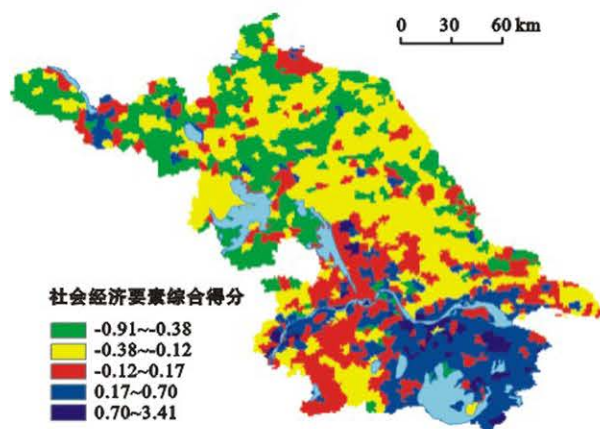
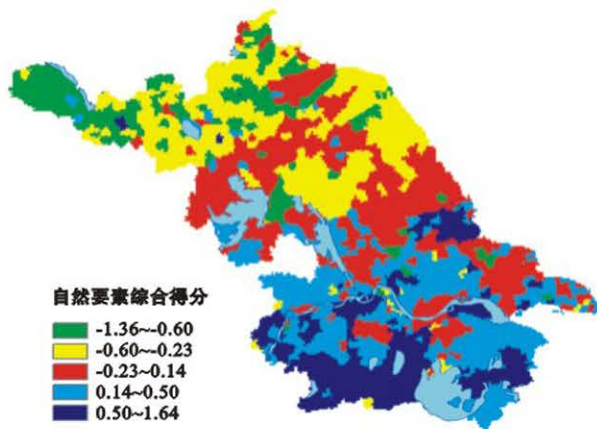
附图2 陕西省关中地区土地覆被类型



附图3 河南省洪水危险等级分布



附图4 河南省洪灾风险等级分布



附图5 江苏省水土保持指标体系中的自然要素、社会经济要素、土地利用要素、水土流失要素空间分布