

基于波谱角分类的土地利用动态监测

于 龙¹, 周宇峰¹, 丁丽霞¹, 邹红玉²

(1. 浙江农林大学 浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室, 浙江 临安 311300; 2. 浙江农林大学 天目学院, 浙江 诸暨 311800)

摘要: 为合理利用土地资源, 针对山地城市土地利用状况监测的需要, 采用波谱角分类方法, 通过选取不同图像子区域的同一地物不同变异端元来消除端元变异性对分类精度的影响, 对 1994 年、2002 年、2010 年 3 个时相的专题绘图仪(TM)和增强型专题绘图仪(ETM+)进行土地利用分类, 得到 3 期浙江省临安市市区土地利用类型的面积及空间分布信息。在此基础上, 分析了临安市区 16 年间的土地利用变化状况。结果表明: 波谱角分类方法对山地城市用地分类具有较好的可应用性, 3 期影像的总体分类精度都在 92% 以上, Kappa 系数在 0.70 以上。近 10 多年来, 临安市区城市用地数量不断增加, 耕地面积不断减少, 临安市正处于人地矛盾凸显的快速城市化进程中。图 8 表 6 参 11

关键词: 土地资源管理; TM/ETM+影像; 土地利用动态; 波谱角分类; 临安市

中图分类号: S758; F301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2014)03-0386-08

Dynamic monitoring of land-use classification based on spectral angle mapping (SAM)

YU Long¹, ZHOU Yufeng¹, DING Lixia¹, ZOU Hongyu²

(1. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 2. Tianmu College, Zhejiang A & F University, Zhuji 311800, Zhejiang, China)

Abstract: To use the land rationally and to meet the requirement of monitoring land-use conditions in the mountain city of Lin'an, Zhejiang Province, the spectral angle mapping (SAM) method was used. Endmembers of the same type were selected to reduce endmember variation and to obtain classification for the years 1994, 2002, and 2010 with Thematic Mapper(TM)/ Enhanced Thematic Mapper Plus(ETM+) images. Then the land-use structure for Lin'an City was produced to show urban land-use changes. Results showed that the SAM method was applicable for classification of a mountain city, and the accuracy of the three images was greater than 92% with Kappa>0.70. The primary land-use structure for Lin'an City was woodland with urban land increasing as arable land declined. The images showed that Lin'an City has entered a period of rapid urbanization, so an increase in land conflicts may be encountered. [Ch, 8 fig. 6 tab. 11 ref.]

Key words: land resource management; TM/ETM+ image; change in land-use; spectral angle mapping (SAM); Lin'an City

土地是社会经济活动的载体。国民经济各部门的活动都要落实到土地上, 土地利用的广度、深度及

收稿日期: 2013-03-07; 修回日期: 2013-06-07

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划项目(61190114); 浙江省重点科技创新团队项目(2010R50030); 浙江农林大学科研发展基金资助项目(2009FK30, 2009FK69)

作者简介: 于龙, 从事土地利用遥感及林业遥感等研究。E-mail: 357970747@qq.com。通信作者: 周宇峰, 实验师, 从事森林碳汇监测研究。E-mail: zhoyyf@zafu.edu.cn

合理程度客观地反映了经济各部门的合理程度^[1]。20 世纪以来，随着人口激增及可利用土地资源的减少，人地矛盾日益突出。土地利用动态监测有利于确定土地利用是否合理。利用遥感手段进行土地利用动态监测具有快速、及时、准确等优点而被广泛的运用^[2]。遥感图像的分类是土地利用动态监测分类后比较法的基础^[3]，主要是对遥感图像上的地物进行属性上的判读，提取地物相关信息。遥感图像分类的准确性直接影响土地利用动态监测的准确性。然而，在实际的分类过程中，由于实际情况的复杂性，光照、地形、气候气象等因素所导致的混合像元状况的存在，及同谱异物、同物异谱现象存在，从而导致错分、漏分现象的出现，大大降低了监督分类的分类精度^[4]。1993 年 Kruse 等^[5]提出了光谱角填图算法(spectral angle mapping)，该方法通过将像元值及参考光谱投影到 N 维向量空间中，通过计算影像波谱与参考光谱间的夹角(光谱角)来对影像像元进行分类。光谱角越小，两者的地物特性就越相似，从而是同种地物的可能性就越高。Kruse 等认为，光照度的改变只会影响地物像元在向量空间中的“长度”，而不会影响其“方向”，所以该方法对未知的增益系数不敏感，可以剔除光照和地形的影响，从而提高地物识别能力。波谱角分类方法在实际应用中，对波谱比较接近的农田和林区，分类结果较好^[5-7]。本研究利用波谱角填图方法对 3 期遥感影像处理，获取浙江省临安市市区土地利用的时空变化信息，为评价临安市市区土地利用的变化动态提供依据。本研究的区域处于山地地区，受地形影响较大，林地及耕地面积较大且交错分布，光谱角填图方法能较好地解决这些因素在分类过程造成的精度低问题。

1 研究区概况

浙江省临安市市区位于 29°56'~30°23'N，118°51'~119°52'E。境内地势自西北向东南倾斜，地貌以中低山丘陵为主，其下辖 5 个街道(锦南街道、锦北街道、玲珑街道、锦城街道、青山湖街道)，是临安市经济发展的热点地区，也是土地利用变化较快的区域，具有代表意义。

2 数据及预处理

2.1 数据来源

本研究采用的数据来自于国际科学数据服务平台 (<http://datamirror.csdb.cn/admin/dataLandsatMain.jsp>)(表 1)。

2.2 遥感影像辐射校正

利用光谱角分类方法需要利用准确的地物波谱，因此对上述 3 期遥感数据分别采用 ENVI 软件的 FLAASH 大气校正模型进行绝对辐射校正，获得表观反射率数据。图 1 是 1994 年大气校正前后遥感影像水体、建筑及植被的同一像素点波谱曲线对比。由图像可以看出校正后的遥感影像光谱曲线得到明显的改善。

表 1 数据说明

Table 1 Data declaration

传感器类型	获取时间	行列号
TM	1994-05-12	119/39
ETM+	2002-05-26	119/39
TM	2010-05-24	119/39

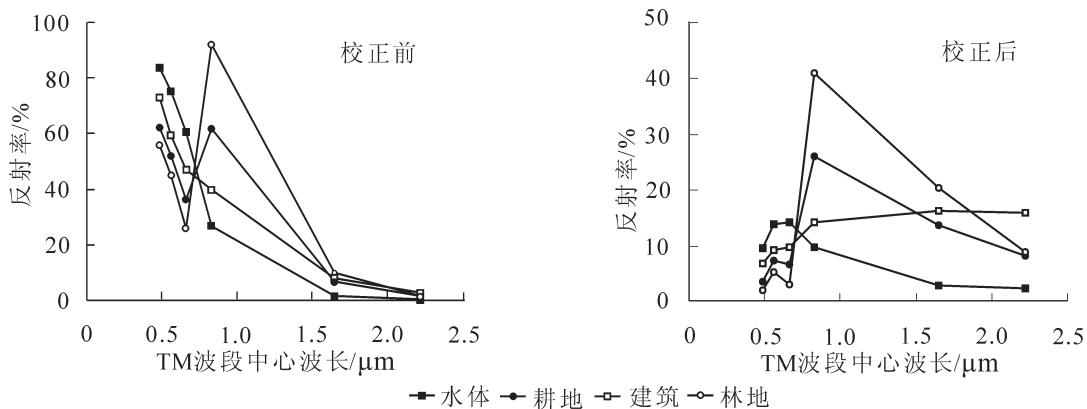


图 1 大气校正前后对比

Figure 1 Comparison of spectrum before and after FLAASH

2.3 遥感影像几何配准

利用 ENVI 4.8 软件对 3 期图像数据几何配准, 将 2002 年的增强型专题绘图仪 (ETM+) 影像作为基准影像, 分别对 1994 年及 2010 年的影像进行坐标匹配 (表 2)。校正模型采用二次多项式模型, 选取 30 个控制点, 重采样方式采用双线性内插法。控制点残差值均在 0.2 个像元内, 符合土地利用动态监测的要求^[8]。

表 2 遥感影像几何配准

Table 2 Geometric correction of remote sensing image

基准影像	待配准影像	投影方式	控制点个数	残差值
2002 年 ETM+	1994 年 TM	WGS-84	30	0.193 7
2002 年 ETM+	2010 年 TM	WGS-84	30	0.175 6

2.4 研究区域裁切

利用 ENVI 软件将临安市市区矢量边界文件转换成感兴趣区域, 对原始图像裁切后, 得到 3 期市区遥感图像 (图 2)。

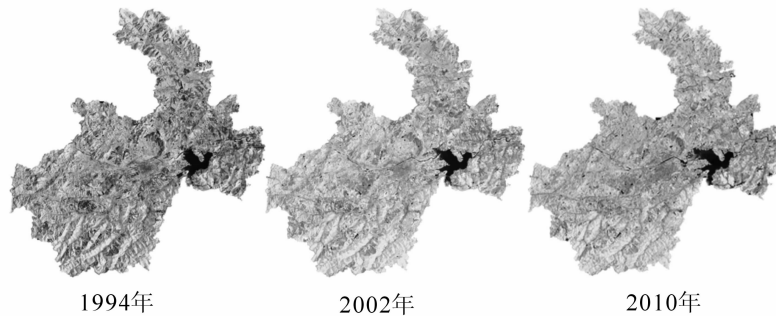


图 2 研究区 3 期 TM543 图像

Figure 2 TM543 image in study area

3 图像分类

3.1 分类系统确立

结合全国土地分类标准及对遥感图像本身特征目视解译判读, 将研究区定义为 3 个大类 5 个小类^[9]。由于研究区内园地极少, 没有牧草地, 故农用地的二级类仅保留耕地及林地。建设用地的二级类中的各类地物在专题绘图仪 (TM) 光谱上相似性较高, 区分困难, 故此类不作细分 (表 3)。

表 3 土地利用分类系统

Table 3 System of land use classification

一级类	二级类	描述
农用地	耕地	灌溉水田、望天田、水浇地、旱地、菜地
	林地	有林地、灌木林地、疏林地、未成林造林地、迹地、苗圃
建设用地	建设用地	商服用地、工矿仓储用地、公用设施用地、公共建筑用地、住宅用地、交通运输用地
未利用地	未利用土地	裸地、裸岩石砾
	水域	河流水面、湖泊水面

3.2 波谱角填图法分类

首先对预处理后的数据进行最小噪声分离变换, 对数据去噪去相关处理, 在此基础上利用像元纯净指数及二维散点图在数据的光谱特征空间中寻找端元, 将寻找到的端元作为参考光谱对原始图像波谱角填图分类。

3.2.1 最小噪声分离变换 (minimum noise fraction, MNF) 最小噪声分离变换 (MNF) 是由 Boardman 和 Kruse 等在 1994 年运用于确定影像内在维数, 去除噪声^[10]。其本质上是 2 次的主成分变换, 第 1 次变换基于估计噪声的协方差矩阵, 分离数据中的噪声, 第 2 次对白化的噪声进行标准主成分变换。利用 ENVI 软

件的 MNF 变换功能，对 3 期遥感影像 MNF 变换，变换后的 MNF 数据各波段之间的相关性及内部噪声都得到去除，大部分信息集中在前几个波段。

3.2.2 端元获取及地物参考光谱曲线获取 目前，端元获取的途径主要有 2 种；一种是从野外实测光谱建立光谱库获取，另外一种是从遥感影像中直接获取^[11]。第 1 种方法理论上较精确，但是由于受大气、地形及传感器等多种因素影响，遥感影像的光谱即使经过各种的处理，仍和实测光谱有较大区别，从而导致影像解译的精度不高。第 2 种方法较简单、工作量小，精度也符合要求。本研究的端元获取途径为从图像上直接获取。一般比较常见的图上端元获取方法有 2 种：一种是在 MNF 变换图像上计算像元纯净指数(PPI)后，在 N 维特征空间中获取端元；另一种通过 MNF 变换后的散点图在光谱特征空间寻找端元。①PPI 端元选择。以 2010 年 TM 数据端元选择为例简述 PPI 选择过程。2010 年 MNF 数据 87.02% 的信息都集中在前 4 个波段，因此，以前 4 个波段进行像元纯净指数(PPI)计算。在 ENVI 软件 PPI 选择工具中设置迭代次数为 1.5 万次，阈值为 2.5。PPI 迭代计算后，纯净像元的个数基本处于稳定状态，基本选择出全部的潜在端元。把 PPI 值大于 30 的像元输出到 MNF 变换后的图像光谱特征空间中，利用 ENVI 的 N 维可视化工具选择端元并输出端元波谱曲线。利用端元波谱曲线及目视解译相结合的方法可以确定端元类别。运用获得的端元对原始影像进行分类，得到分类结果。在分类后处理过程中发现，本研究区运用 PPI 方法选择的端元在分类过程中精度不高，尤其是耕地，其与林地及建设用地错分严重。这主要是由于地物光谱的变异性所造成的。同物异谱及同谱异物现象严重影响了分类精度。另外，在实际的端元选择过程中，建筑(图 3,图 4)所对应的纯净像元数目较少，在 ENVI 可视化工具中难于选择，端元要尽量选择在那些在可视化工具中凸面几何体的几何顶点处聚在一起的像元。有些在第一、二、三主成分光谱特征值相近的地物会在显示上聚在一起。这样地物就难于区分，选择时主观性较大，从而造成端元波谱的输出不准确。单纯的用 PPI 方法选择端元，难于选择出正确的端元，所以本研究通过散点图方法来补充选择端元。②子区域散点图端元选择。为解决端元变异性问题，通过目视解译

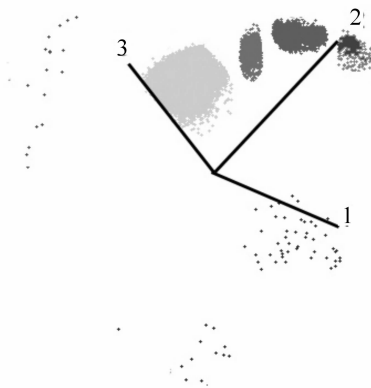


图 3 N 维可视化工具选取端元
Figure 3 N -dimensional visualization tool to select endmember

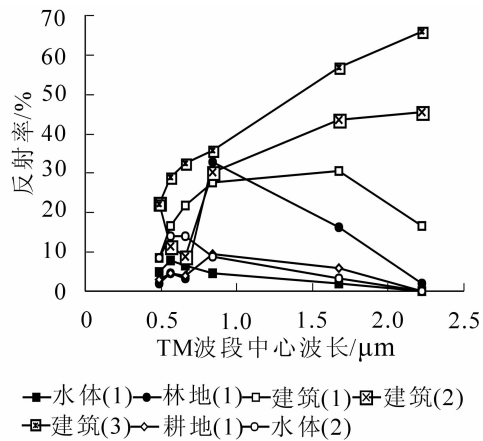


图 4 PPI 方法所获端元波谱曲线
Figure 4 Curve of endmember with PPI

将图像划分为若干小的子区域，子区域范围的标准是尽量使每个子区域内存在的地物类型不大于 3 种，这样便能较容易在光谱特征空间像元形成的三角形角点上选取端元。这样同一种地物也会有较多种端元，然后利用这些端元对原始图像进行分类，再将相同地物的小类进行合并，最终得到最后的分类结果。MNF 影像的前 3 个波段任意 2 个波段进行组合并在二维散点图上显示后提取端元，图 5 为原始影像 MNF 变换后不同区域同一种上的二维散点图，近似呈现三角形，三角形的顶点为地物端元，4 幅图对应图像的不同区域。图 6 为图 5 所获各种端元的平均光谱曲线，从图中可以看出即使同一种地物的光

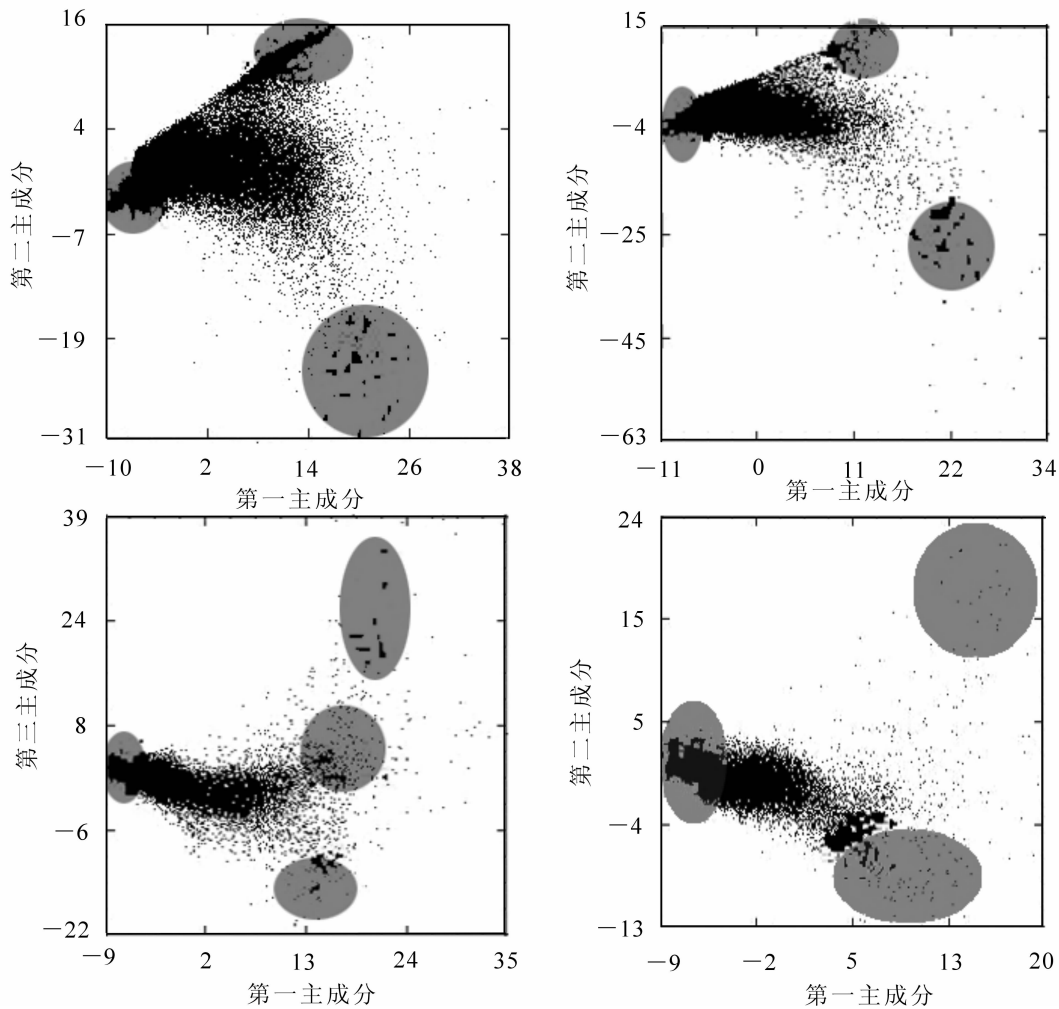


图5 2010年TM子区域二维散点图选取端元

Figure 5 Endmember selection with 2-D scatter

谱曲线在同一图像的不同区域也有一定的差异，表现出地物光谱的空间变异性。

3.2.3 分类及分类后处理 光谱角填图算法 (spectral angle mapping, 简称 SAM)

计算公式为： $a = \cos^{-1} \frac{\sum_{i=1}^n t_i r_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (t_i)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (r_i)^2}}$ 。其中： t_i 为测试地物光谱， r_i 为参考端元光谱， n 为波段数。计算结果值为 $0 \sim \pi/2$ ，值越接近0，表示测试像元与参考光谱越接近。

对于一个像元光谱，与所有的参考光谱都计算光谱角，其所属地物类别即为所有计算结果中 α 最小参考光谱所代表的地物类别。以简单的2个波段图像为例，参考端元光谱与测试光谱关系如图7所示，测试光谱属于参考光谱1。由于参考光谱与测试光谱间相似性度量只考虑角度而不考虑向量长度，所以不受增益效果影响，这一点在光谱上可以减少地形因素的影响。利用ENVI软件光谱角分类方法对3期影像进行分类，利

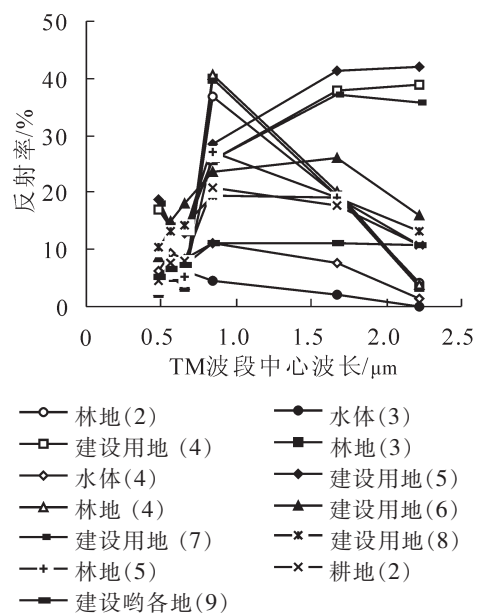


图6 散点图补充端元波谱曲线

Figure 6 Supplementary endmember spectre with scatter chart

用之前建立的端元光谱曲线，调整角度差值，对影像进行分类。分类完成后，通过目视解译对明显错误地区进行修改，然后对分类图像进行“去椒盐”处理，最终得到的分类结果如图 8。

3.3 分类结果评价

利用 ERDAS 软件的精度评价功能，随机生成 256 个样点，结合目视判读对分类结果开展精度评价，结果见表 4。各土地利用类型的分类精度普遍较高，但未利用土地的分类精度较低，主要是因为其光谱特征与建设用地及裸地相似，导致错分漏分现象。

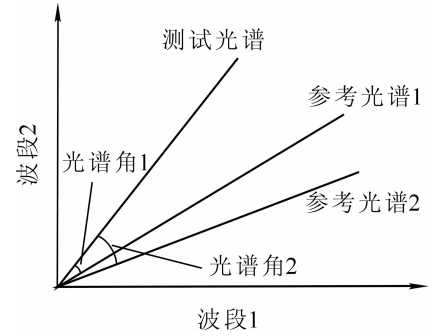


图 7 波谱角方法示意图

Figure 7 Sketch map of SAM

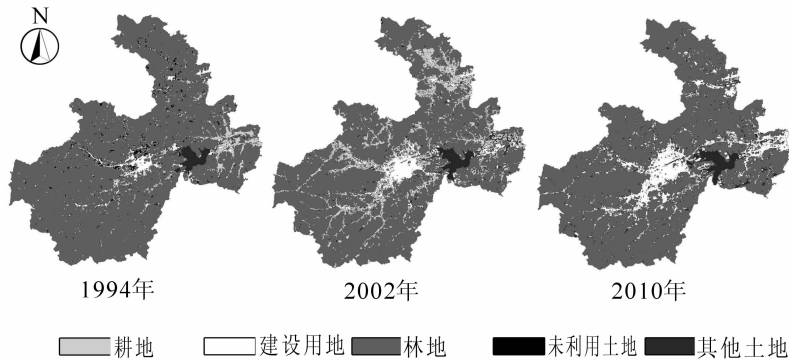


图 8 3 期临安市市区土地利用分类图

Figure 8 Landuse classificatin of Jincheng in Lin'an City

4 结果分析

4.1 土地利用结构分析

土地利用结构的定义为在一定区域内，各种土地利用类型和(或)土地覆被之间在数量上的比例关系，以各种土地利用类型和(或)土地覆被占该区域土地总面积的比重表示。土地利用结构能够在很大程度上反映出一个区域的经济状况。合理的调整土地利用结构，布局用地，能够为经济和社会的发展提供良好的用地条件。

表 4 分类精度验证

Table 4 classification accuracy

林地类型	1994 年		2002 年		2010 年	
	生产精度/%	用户精度/%	生产精度/%	用户精度/%	生产精度/%	用户精度/%
耕地	52.94	81.82	78.57	76.74	60.00	81.20
林地	98.67	95.28	95.92	98.43	97.00	96.04
建设用地	75.00	100.00	93.33	73.68	85.71	78.95
未利用土地	100.00	60.00	87.50	87.50	62.50	62.50
其他土地	33.33	100.00	100.00	100.00	91.67	100
总体精度/%	94.14		92.08		92.22	
Kappa 系数	0.701 4		0.833 3		0.816 0	

由表 5 可知：1994 至 2010 年的 16 a 间，临安市市区各土地利用类型面积虽有变化，但土地结构中林地一直占主要地位，耕地次之，再次是建设用地。

4.2 土地利用动态变化特征

利用 ARCGIS 9.3 的栅格计算器得到临安市市区的土地利用转移矩阵，行表示土地利用的起始状态，列表示土地利用的终止状态。面积转换及面积转换率表示初始类别转换为该列类别的面积及占该列初始

类别的百分比。面积差表示2个时相该用地类别的面积差，变化面积与初始时相面积的百分比。

从表5及表6可知，临安市市区林地面积占整个用地类型的比例最大，均达到了70%以上，且变化的面积总量也最大，在1994-2002年主要转化为耕地及建设用地，在2002-2010年间，主要转化为建设用地，而有一部分耕地重新转为林地，从而使林地面积有所提升。耕地面积占各用地类型的面积比例变化较大，数量变化幅度也较大。在1994-2002年耕地面积大量增加，主要来源为林地。但它也有一部分转为建设用地。在2002-2010年间，耕地面积迅速减少，转为林地及建设用地。建设用地面积一直处于增加状态，且占总用地的面积的比例上升较快。在1994-2010年这16a间，由于林地及耕地的转入，面积增加了3倍多。未利用土地及其他土地面积占整个地区的面积比例较小。

表5 1994-2002 临安市市区土地利用转移矩阵

Table 5 Matrix of Jincheng landuse transformation (1994-2002) of Lin'an City

类别	耕地/hm ²	林地/hm ²	建设用地/hm ²	未利用土地/hm ²	其他土地/hm ²	1994年面积合计/hm ²	1994年各用地类型比率比例/%
耕地	984.15	258.84	533.25	12.06	224.37	2 012.67	4.64
林地	6 047.10	30 115.98	1 141.65	24.84	163.71	37 493.28	86.45
建设用地	298.26	64.80	1 263.42	13.05	119.97	1 759.50	4.06
未利用土地	410.40	408.60	394.20	2.52	30.69	1 246.41	2.87
其他土地	26.28	29.97	62.82	1.08	739.91	860.06	1.98
2002年面积合计	7 766.19	30 878.19	3 395.34	53.55	1 278.65	43 371.92	100.00
2002年各种用地类型比例/%	17.91	71.19	7.83	0.12	2.95	100.00	
面积转换	6 782.04	762.21	2 131.92	51.03	538.74		
面积转换率/%	87.33	2.47	62.79	95.29	42.13		
面积差	5 753.52	-6 615.09	1 635.84	-1 192.86	418.59		
变化率/%	285.87	-17.64	92.97	-95.70	48.67		

表6 2002-2010 临安市市区土地利用转移矩阵

Table 6 Matrix of Jincheng landuse transformation of Lin'an City

类别	耕地/hm ²	林地/hm ²	建设用地/hm ²	未利用土地/hm ²	其他土地/hm ²	2002年面积合计/hm ²	2002年各用地类型比率比例/%
耕地	673.56	4 731.30	2 122.38	76.77	162.18	7 766.19	17.91
林地	272.70	29 182.59	1 151.73	81.63	185.76	30 878.41	71.20
建设用地	199.08	521.01	2 481.48	29.43	164.34	3 395.34	7.83
未利用土地	3.42	19.44	14.76	0.18	13.23	51.03	0.12
其他土地	49.50	186.66	179.64	14.15	848.70	1 278.65	2.95
2010年面积合计	1 198.26	34 641.00	5 949.99	202.16	1 374.21	43 365.62	100.00
2010年各种用地类型比例/%	2.76	79.88	13.72	0.47	3.17	100.00	
面积转换	524.70	5 458.41	3 468.51	201.98	525.51		
面积转换率/%	43.79	15.76	58.29	99.91	38.24		
面积差	-6 567.93	3 766.59	2 554.65	151.13	95.56		
变化率/%	-84.57	12.20	75.24	296.16	7.47		

5 讨论与结论

临安是山地城市，适合耕种及居住的平原面积较少。1994-2002年间，临安市市区虽然未充分发展，但已具备了发展的潜力。随着人口的增长，对居住及耕种的需求逐渐加大，这时平原上林地的砍伐开垦就成为了解决人地冲突的办法之一，所以这段时间表现为林地的减少、耕地及建设用地的增加。另一方面，未利用土地也逐渐被充分利用，进行耕种及作为建设用地使用。随着人口的增长，经济的发

展, 无论是居住还是工业等都需要足够的建设用地。但受自然条件的影响, 临安市市区内的平原地区面积有限, 人地矛盾逐渐凸显, 可利用的平原用地不足, 所以在 2002–2010 年, 耕地迅速转化为建设用地, 城市的扩展必然要取代周边的农田。由于临安市国家森林城市建设项目的全面启动, 林地面积在 2002–2010 年不但没有减少, 反而还有所增加。

本研究利用波谱角制图方法对 1994 年、2002 年、2010 年等 3 个时相的遥感数据进行土地利用分类, 得到了临安市市区 16 a 的土地利用变化信息。临安市市区土地利用方式以林地用地为主, 林地的面积比例分别为 1994 年 86.45%, 2002 年 71.2%, 2010 年 79.88%。建设用地面积不断增加, 1994–2002 年增加 1 635.84 hm², 2002–2010 年增加 2 554.65 hm², 增长率分别为 92.97% 及 75.24%。临安市市区范围内林业用地处于主导地位, 奠定了临安建设生态市的基础。临安市市区受自然条件尤其是地形的限制, 土地利用潜力不大, 而随着人口的增长和经济的快速发展, 临安市正处于人地矛盾的凸显时期, 如何有效地利用土地, 解决有限的可利用土地与社会、经济发展和人口增长间的矛盾, 成为临安市进一步发展的首要问题。

参考文献:

- [1] 汪卫民, 赵大晖. 论土地资源的永续利用[J]. 资源开发与市场, 1998, **14**(1): 26 – 29.
WANG Weimin, ZHAO Dahui. On the sustainable utilization of land resources [J]. *Resour Devel & Market*, 1998, **14**(1): 26 – 29.
- [2] 彭望碌, 余先川, 周涛. 遥感数字图像处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [3] 沙志刚. 数字遥感技术在土地利用动态监测中的应用概述[J]. 国土资源遥感, 1999(2): 7 – 11.
SHA Zhigang. The digital remote sensing techniques applied to land use change monitoring [J]. *Rem Fens Land & Resour*, 1999(2): 7 – 11.
- [4] 承继成, 郭华东, 史文中. 遥感数据的不确定性问题[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [5] KRUSE F A, LEFKOFF A B, BOARDMAN J W, *et al.* The spectral image processing system (SIPS): interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data [J]. *Remote Sens Environ*, 1993, **44**(2): 145 – 163.
- [6] 浦瑞良, 宫鹏. 高光谱遥感及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [7] 梁继, 王建, 王建华, 等. 基于光谱角分类器遥感影像的自动分类和精度分析研究[J]. 遥感技术与应用, 2002, **17**(6): 299 – 303.
LIANG Ji, WANG Jian, WANG Jianhua, *et al.* Study on automatic classification and accuracy analysis of remote sensing image based on SAM [J]. *Rem Sens Technol Appl*, 2002, **17**(6): 299 – 303.
- [8] DAI X, KHORRAM S. The effects of image misregistration on the accuracy of remotely sensed change detection[J]. *Geosci Rem Sens*, 1998, **36**(5): 1566 – 1577.
- [9] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 21010–2007 土地利用现状分类标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [10] LI L, USTIN S L, LAY M. Application of multiple endmember spectral mixture analysis(MESMA)to AVIRIS imageryforcoastalsaltmarshmappingacasestudyinChinaCamp, CA, USA [J]. *IntJ RemoteSens*, 2005, **26** (23): 5193 – 5207.
- [11] 李素, 李文正, 周建军, 等. 遥感影像混合像元分解中的端元选择方法综述[J]. 地理与地理信息科学, 2007, **23**(5): 35 – 42.
LI Su, LI Wenzheng, ZHOU Jianjun, *et al.* A review on endmember selection methods in the course of mixed pixel decomposition of remote sensing images [J]. *Geogr Geo-Inf Sci*, 2007, **23**(5): 35 – 42.