

# 基于 PCA 与 EM 算法的多光谱遥感影像变化检测研究

吴柯<sup>1</sup> 牛瑞卿<sup>1</sup> 王毅<sup>1</sup> 杜博<sup>2</sup>

(中国地质大学地球物理与空间信息学院 武汉 430074)<sup>1</sup>

(武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室 武汉 430079)<sup>2</sup>

**摘要** 变化检测技术能够从观测数据中有效地提取各种变化信息。以多时相的多光谱遥感影像作为主要研究对象,就基于直接比较像元特征的变化检测中两方面的关键问题——差异影像的构造和变化阈值的提取来开展研究,具体采用 PCA 结合差值比较的方法构造差异影像,采用 EM 自动确定变化阈值以提取变化区域。通过与传统变化检测方法的实验比较,证明了该方法的有效性。

**关键词** 变化检测,主成分变换,EM,多光谱,遥感影像

中图分类号 TP75 文献标识码 A

## Change Detection of Multi-spectral Remote Sensed Images Based on PCA and EM Algorithm

WU Ke<sup>1</sup> NIU Rui-qing<sup>1</sup> WANG Yi<sup>1</sup> DU Bo<sup>2</sup>

(Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)<sup>1</sup>

(State Key Laboratory for Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China)<sup>2</sup>

**Abstract** Change detection can get useful changed information from the observed data about the earth. In this paper, a new technology aimed at two aspects in the directly compared way is based on pixel's characters in the multi-spectral and multi-temporal remote sensed images, which are "build the different image" and "threshold determination". In our method, an exact difference image can be made by PCA method, and then the threshold from the EM algorithm is used to obtain changed area, which can be seen as the result. Compared with the traditional method, the proposed method has a higher accuracy, and is more effective.

**Keywords** Change detection, Principal component analysis, EM, Multi-spectral, Remote sensed images

近年来,随着全球环境变化研究的兴起,特别是土地利用和土地覆盖变化研究计划的提出,应用多时相遥感影像对各种地表变化进行识别和提取已成为遥感技术发展的重要方向和热点领域之一<sup>[1]</sup>,并逐渐形成了一些变化检测和识别的方法。总结起来,主要可以归结为分类后比较和直接比较像元光谱两大类,其中,前者直接给出了有关地物的属性,但受到分类器制约的影响非常大,而后者是目前实际应用中更常用的方法,在遥感影像变化检测中得到了广泛的研究和应用<sup>[2]</sup>,比如算术差分、回归分析、K-T 变换、Chi-Square 变换、变化向量分析等,本文主要讨论了第一种方法,它的技术流程图如图 1 所示。



图 1 直接比较像元光谱法流程

中分辨率星载多光谱遥感影像所获取的数据具有合适的空间、光谱和时相分辨率,以及相对低廉的获取和使用成本,

因此在土地覆盖变化研究中占有重要的地位。但是,在这一类数据的处理上,Ridd 的研究结果表明没有任何一种算法具有绝对的优势<sup>[3]</sup>。这主要体现在:多时相多光谱遥感影像包含多个光谱通道,各个通道上的信息之间存在着一定程度的相关和冗余,这会给变化分析带来较大的困难。要全面地检测不同时相之间发生的变化,就必须首先将这些变化信息通过变换有效地集中到少数几个变量中,构造出不同时相之间的差异影像<sup>[4,5]</sup>;此外,确定“差异影像”上各变化类型的阈值非常关键。传统方法根据经验通过人工或半自动地选定变化阈值来提取变化区域,这样做通常效率不高,可靠性也难以保证<sup>[6]</sup>,以 TM 影像差值法为例,虽然国外有关研究文献给出了 TM 各波段差值影像的变化阈值,但受研究区域、遥感数据特征等因素的影响,具体的变化阈值往往存在着差异。更值得注意的是,差值影像中不同类型的地表覆盖变化像元的灰度值统计特征并不相同,甚至相差很大,确定差值影像变化阈值不可能是简单的差值影像整体灰度值统计问题<sup>[7]</sup>,因此,急需寻求能够自动确定的解决办法。

到稿日期:2009-04-20 返修日期:2009-07-13 本文受国家 863 计划资助项目(2007AA12Z160),国家自然科学基金(40672205),中科院海洋环境与波动重点实验室开放基金(KLOCAW0906)资助。

吴柯(1981—),男,讲师,主要研究方向为图像处理、遥感应用等,E-mail:tingke2000@126.com;牛瑞卿(1969—),男,副教授,主要研究方向为遥感信息处理、地质灾害等;王毅(1979—),男,讲师,主要研究方向为图像处理等;杜博(1983—),男,博士生,主要研究方向为高光谱遥感影像处理。

综上所述,本文以中分辨率多光谱遥感影像作为主要研究对象,针对光谱通道间的相关性问题,引入主成分分析(PCA)与传统差值法相结合的模式来获取“差异影像”,实现最大限度地消除各光谱通道之间的相关性,以便有效地集中和突出不同时相之间的差异信息;然后,假设变化强度图像中的像元值符合混合高斯分布模型,利用期望最大(EM)算法和贝叶斯信息准则求出最佳的混合高斯分布模型,利用贝叶斯判别准则确定出各变化类型的变化阈值,获取变化检测的结果。

## 1 差异影像提取技术

提取差异影像是指:根据研究区域的实际情况和特点,选择合适的算术运算波段或波段组合,使得变化信息在差异影像中可以充分地表现出来。有些研究者认为简单的分类前比较法(如图像差值法、图像比值法)效果好于复杂方法(如矢量分析法,支持向量机等)<sup>[6]</sup>,因此,依靠人为经验进行定性分析判断来选择符合变化信息提取要求的差值计算波段,仍是这一过程目前普遍采用的方法。例如影像差值法(Image Differencing)的原理如下:设  $X$  和  $Y$  分别代表同一传感器在不同时相  $t_1$  和  $t_2$  对地表上同一位置进行观测所获得的遥感影像的同一波段的像元灰度值,在理想情况下,变化表现为  $X$  和  $Y$  之间的差值  $\Delta g = Y - X$ 。对于差异影像,像元值通常近似服从正态分布,在影像灰度直方图上,未变化的像元聚集在均值周围,而变化的像元分布在远离均值的两边。

但是,一般的差值法更加适合单波段灰度图像的变化检测,对于多波段的遥感数据,要全面地检测不同时相之间发生的变化,就必须首先将这些变化信息通过变换有效地集中到少数几个变量中。主成分分析(Principle Component Analysis, PCA)作为一种经典的数学变换方法,广泛应用于多光谱或多维遥感数据的信息提取。主成分变换的目的就是要把原来多个波段中的有用信息集中到数目尽可能少的新的成分图像中,并使这些成分之间互不相关<sup>[9,10]</sup>。这样,既提取了有效特征信息,又大大减少了数据冗余。主成分分析方法可用变换矩阵表示如下:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中,  $[y_1 \ y_2 \ \cdots \ y_n]^T$  为主分量变换后图像的  $n$  维向量,  $[x_1 \ x_2 \ \cdots \ x_n]^T$  为主分量变换前图像的  $n$  维向量,变换矩阵由原始图像的协方差矩阵的特征向量组成,特征向量按其对应的特征值由大到小的顺序重新进行排列而成。第一主成分集中了最多的信息量,据经验常常占到 80% 以上。第二主成分、第三主成分的信息量依次很快递减,到了第  $n$  主成分,信息量几乎为零。主成分变换对信息的集中能力使得它非常适合于多时相多波段遥感影像的变化检测,它较影像差值法前进了一步,能够很好地消除波段之间的相关性。因此,本文的差异影像提取方法是:首先对两时相影像分别做主成分变换,再对其计算对应主成分分量间的差值,这里称为主成分差值分析法。

## 2 阈值选择

获取差异影像后,根据差异影像中像元值的分布规律,确定合适的变化阈值。确定变化阈值的目的是从差异影像中界定出变化像元,提取变化区域。假设变化强度图像中的像元值

符合混合高斯分布模型,利用期望最大(EM)算法和贝叶斯信息准则求出最佳的混合高斯分布模型;然后基于贝叶斯判别准则确定出各变化类型的变化阈值,获取变化检测的结果。

### 2.1 最大期望算法

最大数学期望算法(EM; Expectation-Maximization Algorithm)是一种对不完整数据问题进行最大似然估计的常用算法,它无需任何外来数据和先验知识,仅从观测数据本身得到参数的估计值<sup>[11]</sup>。标准的 EM 算法是一个迭代的过程,每次迭代由求期望值和期望最大化两个步骤组成,前者根据待估计参数的当前值,从观测数据中直接估计概率密度的期望值,后者通过最大化这一期望来更新参数的估计量,这两步在整个迭代过程中依次交替进行,直至迭代过程收敛。

假设差值后的影像上未变化的像元类  $\omega_n$  和变化的像元类  $\omega_c$  的概率密度函数即  $p(x/\omega_n)$ ,  $p(x/\omega_c)$  服从高斯密度函数,其分布如式(2)所示:

$$p(x|\omega_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i^2}} \exp\left\{-\frac{(x-m_i)^2}{2\sigma_i^2}\right\} \quad i \in \{n, c\} \quad (2)$$

未变化的像元类  $\omega_n$  和变化的像元类  $\omega_c$  的均值和方差分别用  $m_n, \sigma_n^2, m_c, \sigma_c^2$  来表示。在上述假设条件下,将有 4 个未知参数,需要从差值影像中估计得到。采用 EM 算法来估计未变化像元类别  $\omega_n$  统计分布参数的计算公式如下所示:

$$p^{t+1}(\omega_n) = \frac{\sum_{X(i,j) \in X_d} \frac{p^t(\omega_n) p^t(X(i,j)/\omega_n)}{p^t(X(i,j))}}{I * J} \quad (3)$$

$$m_n^{t+1}(\omega_n) = \frac{\sum_{X(i,j) \in X_d} \frac{p^t(\omega_n) p^t(X(i,j)/\omega_n)}{p^t(X(i,j))} X(i,j)}{\sum_{X(i,j) \in X_d} \frac{p^t(\omega_n) p^t(X(i,j)/\omega_n)}{p^t(X(i,j))}} \quad (4)$$

$$(\sigma_n^2)^{t+1}(\omega_n) = \frac{\sum_{X(i,j) \in X_d} \frac{p^t(\omega_n) p^t(X(i,j)/\omega_n)}{p^t(X(i,j))} [X(i,j) - m_n^t]^2}{\sum_{X(i,j) \in X_d} \frac{p^t(\omega_n) p^t(X(i,j)/\omega_n)}{p^t(X(i,j))}} \quad (5)$$

上面 3 式估计的分别是先验概率、均值和标准偏差,其中的  $t$  和  $t+1$  分别代表了当前和下一次迭代所用的估计值,  $I, J$  分别代表了差值影像的行数和列数,  $X(i, j)$  表示差值影像中第  $i$  行  $j$  列的像元值,类条件概率  $p(X(i, j) | \omega_n)$  的计算如式(2)所示,全概率  $p(X(i, j))$  的值如式(6)所示:

$$p(x) = p(x|\omega_n) p(\omega_n) + p(x|\omega_c) p(\omega_c) \quad (6)$$

变化类  $\omega_c$  的相关参数先验概率  $p(\omega_c)$ 、均值  $m_c$  和标准偏差  $\sigma_c$  的估计方法同上。

### 2.2 初始值选取

应用 EM 算法的一个关键问题是如何确定待估计的参数的初始值。根据差值影像的自身特点,采用了一种选取合理阈值以构造高置信度像元子集,从中估计待定参数初始值的策略<sup>[12]</sup>。根据差值影像的直方图(如图 2 所示)可以看到,未变化的像元值较小,主要集中在直方图左边界附近,而变化类别的像元值较大,分布在靠近直方图右边界的范围上。

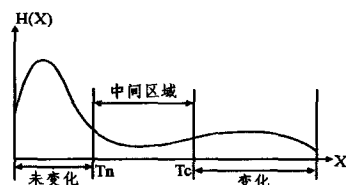


图 2 差值影像直方图

基于这一特点,可以在直方图上选取左右各一个阈值

$T_n, T_c$ , 其中  $\alpha \in (0, 1)$  为权重调节因子。选取的方法如下:

$$T_n = (1 - \alpha)M_d \quad (7)$$

$$T_c = (1 + \alpha)M_d \quad (8)$$

$$M_d = \frac{1}{2}(\max(X_D) - \min(X_D)) \quad (9)$$

以两个像元子集  $S_n = \{X(i, j) | X(i, j) < T_n\}$  和  $S_c = \{X(i, j) | X(i, j) > T_c\}$  分别作为未变化和变化两类像元的初始典型样本集, 而没有被这两个子集所包含的像元则被记为无标识样本, 即  $S_u = \{X(i, j) | T_n \leq X(i, j) \leq T_c\}$ 。然后分别在这两个子集上按以下公式计算先验概率、均值和标准偏差的初始值。

$$p(\alpha_t) = \frac{\|S_t\|}{IJ}$$

$$m_t = \frac{\sum_{X(i,j) \in S_t} X(i,j)}{\|S_t\|} \quad (10)$$

$$\sigma_t^2 = \frac{\sum_{X(i,j) \in S_t} [X(i,j) - m_t]^2}{\|S_t\|} \quad t \in \{n, c\}$$

得到分布的参数初始估计后, 带入式(3)一式(5)迭代计算, 更新参数直到收敛。当得到变化类和没变化类的参数后, 根据公式可得到阈值  $T_0$  的计算公式如下:

$$(\sigma_n^2 - \sigma_c^2) T_0^2 + 2(m_n \sigma_c^2 - m_c \sigma_n^2) T_0 + m_c^2 \sigma_n^2 - m_n^2 \sigma_c^2 - 2\sigma_c^2 \sigma_n^2 \ln \left[ \frac{\sigma_n p(\alpha_n)}{\sigma_c p(\alpha_c)} \right] = 0 \quad (11)$$

若  $X(i, j) > T_0$ , 则  $X(i, j) \in \alpha_c$ , 归属到变化像类, 否则  $X(i, j) \in \alpha_n$ , 归属到未变化像元类, 根据上式求出阈值后, 就可以通过简单的判断准则得到变化检测结果图。

### 3 实验结果

本文采用 1996 年的 Landsat5 TM 数据和 2000 年的 Landsat7 ETM+ 数据进行变化检测的实验。分别取 3, 2, 1 波段生成合成图像, 进行相对辐射纠正和几何校正后, 截取长江边上覆盖沙湖区域的大小为  $243 \times 246$  个像元, 如图 3 和图 4 所示。该地区由湖水、长江、陆地、植被 4 类典型地物组成, 对变化监测实验的研究比较有代表性。从 1996 年到 2000 年沙湖面积减小, 周边的人工建筑物增加。



图 3 1996 年 TM 数据 (3, 2, 1 波段合成)

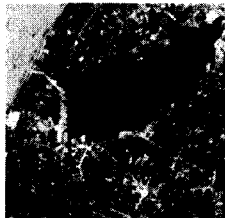


图 4 2000 年 ETM 数据 (3, 2, 1 波段合成)

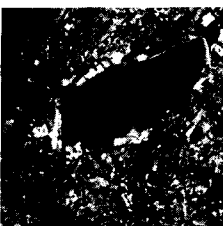


图 5 本文方法差异影像结果图



图 6 本文方法的变化检测结果

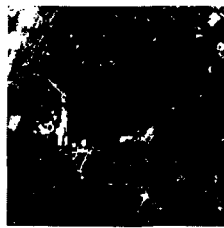


图 7 利用 CVA 变化检测结果



图 8 采用分类后处理的变化检测结果

首先, 采用 PCA 方法分别对两个数据进行主成分信息提取, 提取的主要信息集中在变化后的第一波段, 分解图像中后面的几个提取图像多为噪声, 可以忽略不计。将包含主要信息的两个波段值相减, 获取差异影像的结果图, 如图 5 所示, 这个图像可以看作是由符合变化和未变化两类混合分布的像元组成, 采用这个变化强度影像来进行阈值确定的试验, 设定  $\alpha$  取值为 0.5, 利用第 3 节中的公式求出 EM 算法的变化阈值为 83。那么, 大于该阈值的像元都被认为是发生了变化, 图 6 即为本文方法获取的变化结果, 其中白色的区域表示变化的部分, 黑色表示没有变化的部分。为了更好地对比分析本文方法, 选择了两种传统的变化检测方法: 变化矢量分析法和分类后处理法, 其中, 对分类后处理算法的类别个数选择为 4, 依次获取到的结果如图 7, 图 8 所示。这里定义一个检测变化率的概念: 变化率等于检测出的变化像元与总像元的比值, 3 种方法检测出来的总变化率分别为 9.8%, 7.5% 和 36.4%。通过检测率和视觉效果比较, 可以得出如下结论: 采用分类后处理的变化检测结果是最差的, 从检测的效果图来看, 分类后处理检测出的变化太多, 虚假信息干扰大, 效果不好; CVA 变化检测方法视觉效果均很好, 但仍存在一些孤立的点和离散不连通的区域, 同时也有比较大的误判情况, 比如对长江的判定; 而本文提出来的算法与两种传统的方法相比, 尽管检测出来的变化率较少, 但检测的结果中孤立的点和离散不连通的区域也明显较少, 而且基本上变化信息都能够检测出来, 比如沙湖周边的变化等, 更加符合实际情况, 检测的结果较为理想。

**结束语** 多时相多光谱的遥感影像变化检测在区域尺度的土地利用和土地覆盖变化研究中占有重要地位, 而基于这类遥感影像数据的变化检测中仍有不少问题尚待研究解决, 如何获得最优的检测效果值得深入展开研究。本文在传统遥感图像变化检测方法的基础上, 提出了主成分差值法结合 EM 自动提取阈值的模型。通过试验证实, 利用该模型能够更准确地获得变化检测结果, 与传统的两种检测方法相比, 本文的方法更加具有优势。同时, 算法也有一些不足, 如: (1) 计算量相对较大; (2) 根据差值图像实现的变化检测对土地变化类型无法判断。这些内容有待于将来进一步开展研究。

### 参考文献

[1] Singh A. Digital change detection techniques using remotely sensed data [J]. Int. J. Remote Sensing, 1989, 10(6): 989-1003  
 [2] Coppin P, Lambin E, Jonckheere I, et al. Digital change detection methods in natural ecosystem monitoring; A review [C] // Proceedings of the First International Workshop on Multitemp 2001. World Scientific Publishing, 2001: 3-36

exchange based on feature semantics and geometry representation[C]//Proceedings of the CSCWD, Nanjing, 2006; 1-5

- [8] Guarino N, Welty C A. A formal ontology of properties[C]//Proceedings of the 12th European Workshop on Knowledge Acquisition, Modeling and Management. 2000; 97-112
- [9] Libkin L, Fagin D R, Kolaitis P, et al. Data exchange; semantics

and query answering [J]. Theoretical Computer Science, 2005, 336(1): 89-124

- [10] Libkin L. Data exchange and incomplete information [C]//Proceedings of the Twenty-fifth ACM SIGMOD-SIGACT-SIGART Symposium on Principles of Database Systems. Chicago, IL, USA, 2006; 60-69

(上接第 255 页)

- [4] Compton K, Hauck S. Reconfigurable computing; A survey systems and software[J]. ACM Computing Surveys, 2002, 34(2): 71-210
- [5] 汪斌强. 可重构路由器构件组研制(国家高技术研究发展计划项目课题申请书)[A]. 2007
- [6] Montz A B, Mosberger D, O'Malley S W, et al. Scout: A communications-oriented operating system [C]//Proc. of the 5th Workshop on Hot Topics in Operating Systems (HotOS-V). 1995; 58-61. [http://lahtermaher.org/pub/plan/xkernel/Papers/scout\\_hotos.ps](http://lahtermaher.org/pub/plan/xkernel/Papers/scout_hotos.ps)
- [7] Kohler E. The Click modular router [D]. Department of Electrical Engineering and Computer Science, MIT University, 2001
- [8] Decasper D, Dittia Z, Parulkar G, et al. Router plugins: A software architecture for next generation routers[J]. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2000, 8(1): 2-15
- [9] Lee D C, Midkiff S F. Reconfigurable Routers; a New Paradigm for Switching Device Architecture[OL]. <http://www.ccm.ece.vt.edu/papers/>, 1998

- [10] Lee D C, Harper S J, Athanas P M, et al. A stream-based reconfigurable router prototype [A]//Proceedings of the IEEE International Conference on Communications [C]. Vancouver, B. C., Jun 1999
- [11] Albrecht C, Foag J, Koch R, et al. DynaCORE-a dynamically reconfigurable coprocessor architecture for network processors [A]//Proc. of the 14th Euromicro Conference on Parallel, Distributed and Network-based Processing (PDP 2006) [C]. IEEE Computer Society, Montbeliard-Sochaux, France, 2006; 101-108
- [12] Houidi I, Louati W, Zeghlache D. An extensible software router data-path for dynamic low-level service deployment[C]//IEEE Workshop on High Performance Switching and Routing 2006. Poland, June 2006; 161-166
- [13] Reussner R H, Becker S, Firus V. Component composition with parametric contracts[C]//Proceedings of the Net. Object Days, 2004; 155-169
- [14] Bracciali A, Brogi A, Canal C. A formal approach to component adaptation[J]. Journal of Systems and Software, 2005, 74(1): 45-54

(上接第 281 页)

的自然分布,以实现中国水墨画的典型艺术效果。结果说明,本文算法比较真实地模拟了中国水墨画的部分典型特征,使得墨竹模拟效果比较逼真,能够较好地实现模拟要求。同时该算法还存在不完善的地方,如尚未充分分析柏林噪声函数的倍频和振幅的变化对水墨扩散效果产生的影响,这有待进一步研究。

### 参 考 文 献

- [1] Lansdown J, Schofield S. Expressive rendering; A review of non-photorealistic techniques [A]//IEEE Computer Graphics and Application[C]. 1995; 29-37
- [2] 俞剑华. 中国画论类编(上卷)[M]. 北京:人民美术出版社, 1986
- [3] 齐亚峰,孙济洲,商毅. 中国水墨画的基本艺术特征及其计算机仿真实现[J]. 中国图像图形学报, 2003, 5(8): 562-5
- [4] Strassmann S. Hairy brushes [A]//Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series[C]. ACM SIGGRAPH, D-

allas, 1986; 225-232

- [5] Lee J. Difusion rendering of black ink paintings using new paper and ink models[J]. Computers and Graphics, 2001, 25(2): 295-308
- [6] Way D L, Shih Z C. The synthesis of rock textures in Chinese landscape painting [A]//Proceedings of Eurographics' 2001 [C]. Manchester, 2001; 123-131
- [7] 石永鑫,孙济洲,张海江,等. 基于粒子系统的中国水墨画仿真算法[J]. 计算机辅助设计与图形学报, 2003, 6(15): 667-672
- [8] 焦景山,孙济洲. 中国水墨画效果的图形仿真[A]//见辜居一,主编. 数字化艺术论坛[M]. 杭州:浙江人民美术出版社, 2002; 190-204
- [9] 谭彬. 组物外观模拟的研究与设计[D]. 杭州:浙江大学, 2004
- [10] Perlin K. An Image Syntlesizer [C]//SIGGRAPH' 85. 1985; 287-296
- [11] 杨刚. 全景图拼接算法的设计与实现[J]. 重庆工学院学报:自然科学版, 2007, 21(19): 107-110

(上接第 284 页)

- [3] Ridd M K, Liu J. A comparison of four algorithms for change detection in an urban environment [J]. Remote Sens. Environ., 1998, 63(2): 95-100
- [4] Byrne G F, Crapper P F, Mayo K K. Monitoring land cover change by principle component analysis of multitemporal Landsat data [J]. Remote Sens. Environ., 1980(10): 175-184
- [5] 黎夏,叶嘉安. 利用主成分分析改善土地利用变化的遥感监测精度[J]. 遥感学报, 1997, 1(4): 282-289
- [6] 张路. 基于多元统计分析的遥感影像变化检测方法研究[D]. 武汉:武汉大学, 2004
- [7] 范海生,马蔼乃,李京. 采用图像差值法提取土地利用变化信息

方法——以攀枝花仁和区为例[J]. 遥感学报, 2001, 5(1): 75-80

- [8] Wang G. An Expert System for Forest Resource Inventory and Monitoring in the Frame of Multi-Source Data [M]. Helsinki, Finland: Helsinki Univ. Press, 1996
- [9] Lillesand T M, Kiefer R W. Remote Sensing and Image Interpretation [M]. New York: Wiley, 2000
- [10] Eklundh L, Singh A. A comparative analysis of standardized and unstandardized principal components analysis in remote sensing [J]. International Journal of Remote Sensing, 1993, 14(7): 1359-1370
- [11] 盛辉,廖明生,张路. 基于典型相关分析的变化检测中变化阈值的确定[J]. 遥感学报, 2004, 8(5): 451-457
- [12] 佃袁勇. 基于遥感影像的变化检测研究 [D]. 武汉:武汉大学, 2005