

基于区域特性选择的遥感图像融合方法

马艳军 石爱业 徐立中

(河海大学计算机及信息工程学院, 南京 210098)

摘要 提出了一种新的遥感图像融合方法,其基本思想是首先对多光谱遥感图像(MS)进行IHS变换得到IHS色彩空间的 I 、 H 、 S 分量;然后将高分辨率全色图像和MS的 I 分量进行3层小波变换,并采取基于区域特性选择的融合算子对小波系数进行选择,然后经小波逆变换重构得到新的强度分量 I' ;最后将 I' 、 H 、 S 进行IHS逆变换得到融合后的图像。此外,文中引入了相关系数,相对平均光谱误差指数(RASE),相对整体维数综合误差(ERGAS)对融合图像的光谱质量进行评价,使用将融合图像与高分辨率全色图像分别经过拉普拉斯滤波器的滤波以提取细节信息,然后计算相关系数的方法对融合图像的空间细节质量进行评价。实验结果表明,本文算法在光谱质量的改善方面明显优于IHS及一些经典的小波变换遥感图像融合算法。

关键词 遥感图像融合 小波分解 IHS变换 区域特性选择 融合性能评价

中图分类号: TP751 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2007)02-0228-06

Fusion of Remote Sensing Images Using Region-based Selection Operator

MA Yan-jun, SHI Ai-ye, XU Li-zhong

(College of Computer & Information Engineering of HoHai University, Nanjing 210098)

Abstract In this paper, a novel hierarchical image fusion scheme is presented. The main idea is to perform a intensity-hue-saturation(IHS) transform of multispectral image(MS), then achieve 3 layers wavelet decomposition of the I weight of MS and Panchromatic image(PAN), at the same time, adopt the fusion arithmetic operator of region selection and weighted average operator to select the wavelet coefficient. Thus the fused I weight(I') is got by taking inverse wavelet transform. Finally the fused image is obtained by inverse IHS transform of I' weight and the H , S weights of MS. In addition, this paper uses the correlation coefficient, relative average spectral error index(RASE), and relative global dimensional synthesis error(ERGAS) to evaluate the performance of the fusion image. The experimental results show that the fusion scheme put forward in this paper is better than IHS and some other classical fuse methods based on wavelet transform in improving spectrum quality of remote sensing image.

Keywords fusion of remote sensing image, wavelet decomposition, IHS transform, region-based selection

1 引言

有效的融合高分辨率全色遥感图像和低分辨率多光谱遥感图像,均衡融合结果中的空间细节信息和光谱信息两项特征指标,是多源遥感图像融合技术的研究热点。由于IHS变换融合方法会导致融合图像的色彩畸变^[1,2],而小波变换在变换域具有良

好的分频特性,小波分解系数的统计特性反映了遥感图像的边缘、线和区域等显著特征^[3,4]。因此本文提出了一种基于区域特性选择的遥感图像融合方法,该方法有效地综合了光谱信息和空间分辨率两项特征指标,得到了较好的融合结果。另外,文中利用相关系数,相对平均光谱误差指数(RASE),相对整体维数综合误差(ERGAS)等参量对该融合方法的融合性能进行了评价与分析。实验结果证明了该

基金项目:国家自然科学基金项目(60374033);江苏省自然科学基金项目(BK2002064);江苏省高新技术研究重大项目(BG2006003)

收稿日期:2006-10-13;改回日期:2006-11-03

第一作者简介:马艳军(1981~),男,河海大学计算机及信息工程学院信号与信息处理专业硕士研究生。主要研究方向为多源信息融合。E-mail: mayanjuan@hhu.edu.cn

方法的有效性。

2 基于区域特性选择的融合方法

基于区域特征选择与加权平均相结合的融合方法的具体步骤^[2]:

(1) 将高分辨率全色图像 PAN 配准到低分辨率多光谱图像 MS 上;

(2) 对多光谱图像 MS 进行 IHS 变换,分别得到在 IHS 色彩空间的色度 H 、饱和度 S 和强度分量 I ,然后对 I 进行 3 层小波分解;

(3) 将 PAN 与 MS 的 I 分量进行直方图匹配得到 PAN_1 ,然后进行小波分解,分解层数为 3 层;

(4) 按照融合规则对各个分解层的图像进行融合,小波逆变换重构得到强度分量 I' ;

(5) 将 I' 、 H 、 S 进行 IHS 逆变换,得到融合后的图像 F 。

融合过程如图 1 所示。

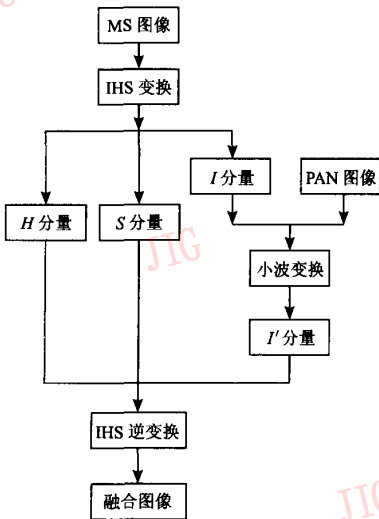


图 1 融合过程

Fig. 1 Fuse process

3 融合规则及融合算子

目前广泛采用的融合规则基本上可概括为“基于像素”的融合规则,但是由于图像的局域特征往往不是由一个像素所能表征的,它是由某一局域的多个像素来表征和体现的;同时,通常图像中某一局部区域内的各像素间往往有较强的相关性,因此,基

于像素的简单融合规则具有其片面性,其融合效果有待改善。基于以上考虑,为了获得视觉特性更佳,细节更丰富、突出的融合效果,这里给出了一种基于区域特征选择的融合规则和融合算子:

(1) 对分解后图像的低频部分(位于最高分解层)取 MS 图像 I 分量的小波分解系数,以尽可能的保持光谱特性,减少色彩畸变;

(2) 对于高频分量,采用基于区域(矩形窗口)特征选择的算子,融合算子的确定方法如下:

① 首先定义对应分辨率上局部区域 Q 的能量^[1,3]

$$E(A, p) = \sum_{q \in Q} w(q) C_j^2(A, q) \quad (1)$$

式中, $C_j(A, q)$ 表示图像 A 在 q 点的小波系数, $w(q)$ 表示权值,且有:

$$\sum_{q \in Q} w(q) = 1 \quad (2)$$

q 点离 p 点越近,权值越大。 Q 为 p 点的一个邻域,本文采用 3×3 的邻域,邻域各点和 p 点的距离都为 1,所以取权值 $w(q) = 1/9$ 。

② 同理可得, $E(B, p)$ 然后定义一个匹配矩阵

$$M(p) = \frac{2}{E(A, p) + E(B, p)} \sum_{q \in Q} w(q) C_j(A, q) C_j(B, q) \quad (3)$$

匹配矩阵中各点的值在 0 和 1 之间变化,越接近 1 表示相关程度越高。

③ 定义一个阈值 T (通常取在 0.5 ~ 1 之间),本文中取 0.6。

④ 最后定义融合算子:若 $M(p) < T$ 则

$$C_j(F, p) = \begin{cases} C_j(A, p) & E(A, p) \geq E(B, p) \\ C_j(B, p) & E(A, p) < E(B, p) \end{cases} \quad (4)$$

否则

$$C_j(F, p) = \begin{cases} W_{\max} C_j(A, p) + W_{\min} C_j(B, p) & E(A, p) \geq E(B, p) \\ W_{\min} C_j(A, p) + W_{\max} C_j(B, p) & E(A, p) < E(B, p) \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中

$$W_{\min} = 0.5 - 0.5 \left(\frac{1 - M(p)}{1 - T} \right)$$

$$W_{\max} = 1 - W_{\min}$$

对于③步中阈值 T 的选择会对融合结果有较大影响,通常 T 值取在 0.5 ~ 1 之间。因为当匹配度小于 0.5 时,一般可以认为两个像素点的相关程度不高应该根据邻域能量选择其中之一;当匹配度大于 0.5 时则认为两个像素点的相关程度较高可以通过

加权平均的方法来尽可能的同时保留两者。一般 T 值取得越小越有利于光谱的改善,但会损失一定的空间信息;相反 T 值取得越大对空间信息的提取能力会相应的提高,但不利于保留光谱信息。综合考虑空间信息和光谱信息两个方面的因素,发现 0.6 是一个比较好的均衡点,所以本文试验中取 $T=0.6$ 。在具体的应用中 T 值应该根据实际情况做相应的调整。

4 融合实验及性能评价

实验采用的 MS 图像为 Landsat5TM (Thematic Mapper)图像(分辨率 30m),PAN 图像为 SPOT 图像(分辨率 10m),这两类图像融合的结果应该是 10m 分辨率的 MS 图像,但是由于实验条件的限制,并没有分

辨率为 10m 的理想 MS 图像作为参考图像,来衡量融合算法的性能。为了克服这个问题,做如下设计:

- (1) 把原始的 30m 分辨率多光谱 TM 图像(其由 2,3,4 波段组成分别记作 B 波段、G 波段、R 波段)作为参考图像,记为 TM1;
 - (2) 将 TM1 重采样到 120m 分辨率变为降质图像,然后再将该降质图像重采样到 30m 分辨率,并记为 TM2;
 - (3) 将 10m 分辨率的全色 SPOT 图像,采样到 30m 分辨率,并记此图像为 SPOT2;
 - (4) TM2 和 SPOT2 经过几何配准,大小为 356×356 。
- 其中, TM1、SPOT2、TM2 分别如图 2,图 3,图 4 所示。

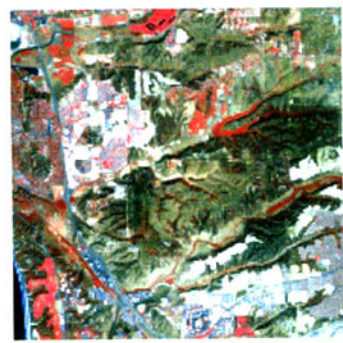


图2 TM1(原始 MS 图像,即参考图像)
Fig.2 TM1(original MS image)



图3 TM2(降质 MS 图像)
Fig.3 TM2(resample MS image)



图4 SPOT2(高分辨率 PAN 图像)
Fig.4 SPOT2(panchromatic image)

下述的 IHS 融合方法、基于小波的直接替换法(WTR)、基于小波变换的绝对值最大值法(WTM)、基于小波变换的方差最大值法(WTS)以及本文方法的实验都是针对 TM2 和 SPOT2 进行融合的,其中 WTR、WTM、WTS 和本文算法中所采用的小波都是双正交小波(这是考虑到双正交小波具有对称性、线性相位性与正则性的优点)滤波器系数如表 1 所示,实验中小波分解的层数都选为 3,窗口大小为 3×3 。各算法的融合图像分别如图 5 所示。

表 1 双正交小波的滤波器系数
Tab.1 Biorthogonal wavelet filter coefficients

| 滤波器 | 系数 | | | | |
|-----|----------|----------|----------|---------|----------|
| LD | -0.176 8 | 0.353 6 | 1.060 7 | 0.353 6 | -0.176 8 |
| HD | 0.353 6 | -0.707 1 | 0.353 6 | 0 | 0 |
| LR | 0.353 6 | 0.707 1 | 0.353 6 | 0 | 0 |
| HR | 0.176 8 | 0.353 6 | -1.060 7 | 0.353 6 | 0.176 8 |

观察图 5,从主观效果上看各融合结果图在空间分辨率上相差不多,并且与融合前的多光谱图像 TM2 相比均有了明显的提高。另外,可以看出 IHS、WTR、WTM 的融合结果图都有很明显的色彩畸变, WTS 和本文算法相对较好,而本文算法的融合结果图比 WTS 更接近于参考图像 TM1。可见在保证一定的空间细节质量的条件下本文算法可以更好的保持多光谱图像中的光谱信息。

下面利用客观评价方法从融合图像的光谱质量和空间细节质量两个方面对融合结果加以分析比较。

4.1 融合图像的光谱质量

引入如下衡量融合图像光谱质量的参数:
相关系数(correlation coefficient, CC),是指融合图像的 B、G、R 波段和参考图像 TM1 的对应波段之间相关系数,融合结果光谱信息保持越多,CC 越接近于 1,理想的情况应该是 1。

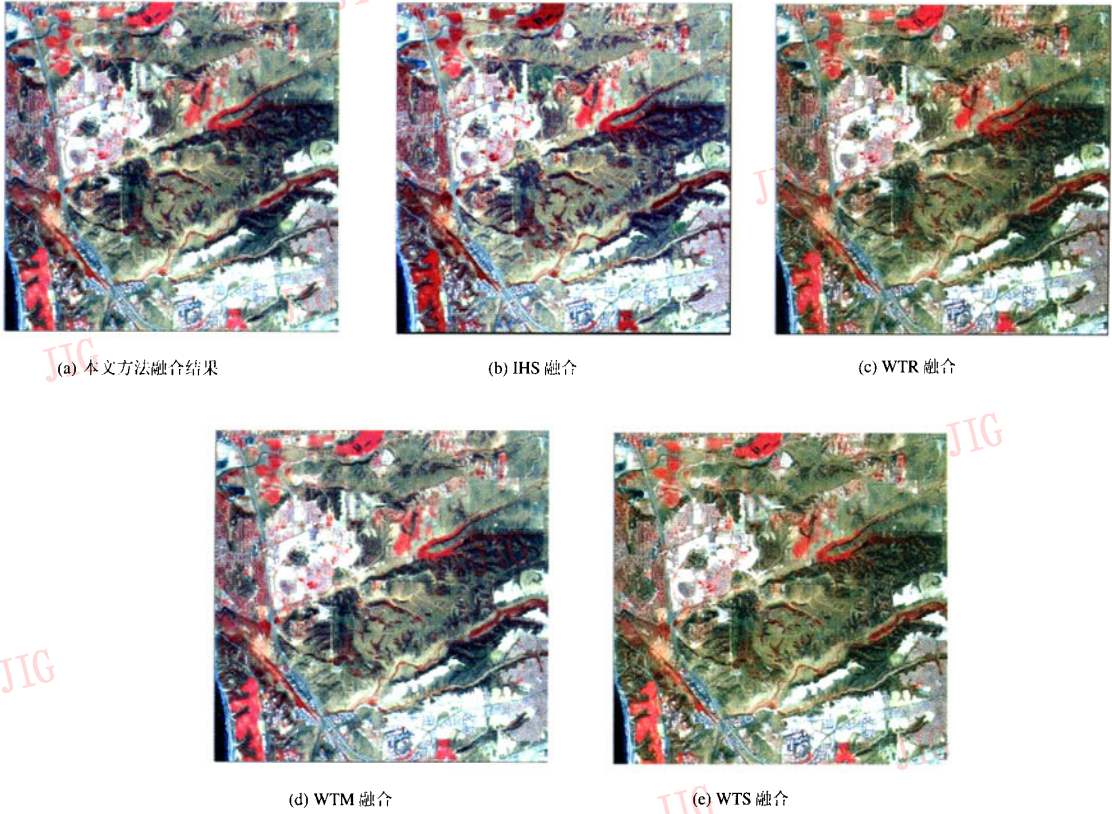


图 5 融合结果
Fig. 5 Fused images

相对平均光谱误差指数(RASE)^[6]定义如下:

$$RASE = \frac{1}{M} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N RMSE^2(X_i)} \quad (6)$$

式中, M 是参考图像 TM1 所有波段的中值; N 是参考图像 TM1 波段数目, 实验中 $N=3$; $X_i (i=1, 2, 3)$ 分别对应于 B、G、R 波段; $RMSE(X_i)$ 是 X_i 波段的均方根误差; 其中 $RMSE(X_i)$ 定义如下:

$$RMSE^2(X_i) = bias^2(X_i) + SDD^2(X_i) \quad (7)$$

式(7)中的中值偏差 $bias$ 是参考图像的一个波段的中值与融合图像对应波段的中值的偏差; 标准方差偏差 SDD 是参考图像一个波段的标准方差与融合图像对应波段的标准方差的偏差;

RASE 用百分数表示, 融合图像的光谱质量越高, 则 RASE 越低, 理想情况应该是 0;

相对整体维数综合误差^[6] (ERGAS)

$$ERGAS = 100 \frac{h}{l} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{RMSE^2(X_i)}{M^2(X_i)} \right)} \quad (8)$$

式中, h 全色图像的空间分辨率, 实验中为 30m; l 降

质 MS 图像的空间分辨率, 实验中为 120m; $M(X_i)$ 是融合图像 X_i 波段的中值; 融合图像的光谱质量越高, 则 ERGAS 越低, 理想情况应该是 0;

表 2 列出了上述各种算法的融合图像与参考图像 TM1 对应波段间的光谱质量参数的数值, 为了更好地进行分析比较, 在表 2 中的第 1 行, 给出了降质的多光谱图像 TM2 与参考图像 TM1 间的光谱参数值, 而最后一行给出了理想的融合图像与参考图像 TM1 间的光谱参数值。

由表 2 可以看出 HIS 方法的 RASE 和 ERGAS 都较大, 另外与降质图像相比, 光谱参数比降质图像也差, 这表明融合图像有严重的光谱失真, 即所谓的色彩畸变。这是由于在 IHS 变换融合方法中, 直接采用全色图像替换多光谱图像的强度分量, 尽管用于替换多光谱图像强度分量的高分辨率全色图像在替换前进行了图像的统计特性的匹配, 但是仍然存在匹配误差, 而且强度分量的光谱特性与全色图像的光谱特性并不完全一致从而导致了色彩的畸变。

表 2 融合图像的光谱质量比较

Tab.2 Compare spectrum quality of fused images

| 融合方法 | CC | | | RASE (%) | ERGAS |
|------|---------|---------|---------|-------------|---------|
| | B 波段 | G 波段 | R 波段 | | |
| 降质 | 0.920 2 | 0.918 4 | 0.913 3 | 3.24 | 0.786 7 |
| IHS | 0.861 5 | 0.909 0 | 0.747 9 | 3.25 | 0.797 3 |
| WTR | 0.923 6 | 0.921 6 | 0.837 1 | 1.37 | 0.362 8 |
| WTM | 0.929 9 | 0.928 9 | 0.863 3 | 2.16 | 0.545 2 |
| WTS | 0.925 7 | 0.923 8 | 0.853 6 | 1.52 | 0.397 7 |
| 本文算法 | 0.930 0 | 0.940 7 | 0.854 0 | 0.95 | 0.274 7 |
| 理想 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |

表 2 可以看出 WTR 方法、WTM 方法、WTS 方法以及本文的融合算法,除了 R 波段的 CC 比降质图像略差外,其他的光谱参数的值都比降质图像有所改善;另外这几种方法从总体上看光谱质量都优于 IHS 变换方法;就本文的融合算法而言,参数 CC 较其他的融合算法都高,更接近于 1;而对于 RASE、ERGAS 这两个参数,本文算法比其他算法的值都小,也更接近于 0;尤其是反映光谱质量综合指标的 RASE 以及 ERGAS,本文算法分别仅为 0.95%、0.274 7,也更接近于 0,比其他融合算法的值都小,以上的分析表明本文算法在光谱质量的改善方面优于其他算法。

4.2 融合图像的空间细节质量

衡量一个融合算法的融合图像的空间细节质量的高低就是考虑 PAN 图像的空间细节信息“注入”到整个 MS 图像的多少。为了提高融合图像的空间细节质量,要把 PAN 图像的空间细节信尽可能多地“注入”到 MS 图像。

为了评估融合图像的空间细节质量,采用 Zhou 提出的方法^[7],即融合图像与 PAN 图像分别经过拉普拉斯滤波器的滤波以提取细节信息,采用的拉普拉斯滤波模板为

$$\begin{vmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{vmatrix}$$

记经过拉普拉斯滤波以后的图像波段分别为 B_h 波段、 G_h 波段、 R_h 波段,则拉普拉斯滤波后的融合图像的 B_h 波段、 G_h 波段、 R_h 波段与拉普拉斯滤波后的 PAN 图像的对应波段间的相关系数 CC 越高,就表明在融合过程中,有更多的 PAN 图像的空间信息“注入”到 MS 图像。为进行比较,表 3 中的

第 1 列给出了降质图像 TM2 经拉普拉斯滤波后的各波段与 PAN 图像经拉普拉斯滤波后对应波段间的相关系数。

表 3 融合图像的空间质量比较

Tab.3 Compare space quality of fused images

| 融合算法 | CC | | |
|------|----------|----------|----------|
| | B_h 波段 | G_h 波段 | R_h 波段 |
| 降质 | 0.781 7 | 0.777 4 | 0.598 9 |
| IHS | 0.980 6 | 0.982 5 | 0.981 7 |
| WTR | 0.991 6 | 0.994 3 | 0.966 4 |
| WTM | 0.986 8 | 0.990 4 | 0.961 6 |
| WTS | 0.990 8 | 0.993 5 | 0.964 5 |
| 本文算法 | 0.978 5 | 0.980 7 | 0.978 0 |

由表 3 可以看出,IHS、WTR、WTM、WTS 以及本文的融合算法经过融合以后的图像,与降质图像相比,在空间细节质量方面都有很大的提高,而本文融合算法的空间细节质量总体上略逊于其他几种算法。

但如果仅从视觉上看图 5,很难判断哪种融合算法的结果有更好的空间细节质量,但是与降质的 TM2 图像相比(如图 3 所示),可以很明显看出,实验中所有的算法的融合图像在空间细节质量方面都好于 TM2,但是由于本文算法的融合图像光谱质量最好,而 MS 图像与 PAN 图像融合时,就是在提高融合图像的空间细节质量的同时,尽可能保持融合图像具有原始 MS 图像的信息,这表明本文算法是有效的。

5 结 论

本文给出了一种利用图像的 IHS 变换和多分辨率小波分解,采用基于区域特选择融合算子的遥感图像融合方法。并引入了相关系数,相对平均光谱误差指数,相对整体维数综合误差对融合图像的光谱质量进行评价,使用将融合图像与 PAN 图像分别经过拉普拉斯滤波器的滤波以提取细节信息,然后计算相关系数的方法对融合图像的空间细节质量进行评价。试验结果表明,本文算法在保证一定的空间细节质量的基础上,在光谱质量的改善方面明显优于 IHS、WTR、WTM、WTS 等经典算法,是一种有效的遥感图像融合算法。

另外,由于本文中采用的是经典实小波,它不具有平移不变性,方向选择性有待改善,进一步的研究可以采用多孔小波或双树复小波等方法估计有可能得到更理想的融合效果。

参考文献 (References)

- 1 Xiao Gang, Jing Zhong-liang, Li Jian-xun. Analysis of color distortion and improvement for IHS image fusion [A]. In: The Proceeding of 2003 IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems[C], Shanghai, 2003; 80 ~ 85.
- 2 Shi Ai-ye, Xu Li-zhong, Huang Feng-chen. An improved image fusion method based on wavelet transform[J]. Journal of Apparatus and Meter, 2004, 25(4): 690 ~ 691. [石爱业, 徐立中, 黄凤辰. 一种改进的基于小波变换的遥感图像融合方法[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(4): 690 ~ 691.]
- 3 Liu Gui-xi, Yang Wan-hai. A wavelet-decomposition-based image fusion scheme and ITS performance evaluation [J]. Journal of Autoimmunization, 2002, 28(6): 927 ~ 934. [刘贵喜, 杨万海. 基于小波分解的图像融合方法及性能评价[J]. 自动化学报, 2002, 28(6): 927 ~ 934.]
- 4 Wang Wen-jie, Tang Ping, Zhu Chong-guang. A wavelet transform based image fusion method [J]. Journal of Image and Graphics, 2001, 6(11): 1131 ~ 1138. [王文杰, 唐婷, 朱重光. 一种基于小波变换的图像融合算法[J]. 中国图象图形学报, 2001, 6(11): 1131 ~ 1138.]
- 5 Burt P J, Kolczynski R J. Enhanced image capture through fusion [A]. In: Proceedings of the Fourth International Conference on Computer Vision[C], Berlin, Germany, 1993; 173 ~ 182.
- 6 Maia Gonzalez-Audicana, Jose Luis Saleta, Raquel Garcia Catalan, et al. Fusion of multispectral and panchromatic images using improve IHS and PCA mergers based on wavelet decomposition [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(6): 1291 ~ 1299.
- 7 Zhou J, Civco D L, Silander J A. A wavelet transforms method to merge Landsat TM and SPOT panchromatic data [J]. International Journal of Remote Sense, 1998, 19(4): 743 ~ 757.