

城市景观遥感影像融合质量对小波基选取的响应

陈颖彪¹, 郭冠华¹, 吴志峰^{1,2}, 魏建兵²

(1. 广州大学地理科学学院, 广东 广州 510006; 2. 广东省生态环境与土壤研究所, 广东 广州 510650)

摘要:应用 IHS 和小波变换结合的融合算法时, 小波基的选取是影响融合图像质量的关键, 而且包含不同地物信息的影像融合质量对小波基的响应特征有待深入探讨。该文以 SPOT 全色和多光谱影像为数据源, 选取大量高、低密度建筑城市景观影像样本, 用信息量、平均梯度和偏差指数 3 个指标定量评价融合质量, 分析不同小波簇下两类融合图像之间的质量差异。研究表明: 融合质量与影像所含地物特征密切相关; 相对于其它小波簇, $rbioNr, Nd$ 表现出较强的变异性; 两类融合图像在各小波簇上的波动性差异明显, 并呈分段特征; 根据质量需求和具体景观特征影像, 可以在分解层数固定的情况下选取最佳小波基, 以获取高质量融合图像。

关键词: 影像融合; 高、低密度建筑城市景观; 小波变换; 小波基

中图分类号: TP75 文献标识码: A 文章编号: 1672-0504(2011)04-0098-05

0 引言

在景观生态研究中, 一个基本的前提是对研究区进行景观类型制图, 从遥感影像上获取现实的景观信息是目前广泛采用的途径。然而, 从单一影像上提取的景观信息往往会遗漏很多分类细节, 因此, 进行遥感信息融合对充分发掘不同影像的空间信息与光谱信息以及获取高精度的景观分类信息具有重要意义^[1,2]。在众多融合算法中, IHS 和小波变换结合的方法是有效途径^[3-5]; 然而, 影响该算法性能的因素很多, 如小波基、分解层数、小波系数的选择规则及影像特征等。程坚等^[6]探讨了 SAR 与可见光图像融合中小波基的选择问题, 陈木生等^[7]讨论了多聚焦图像融合中最佳小波分解层数的选取, 龚建周等^[8,9]针对 IHS 和小波变换融合图像质量对小波基和分解层数及影像面积大小的响应进行了有益的探索, 但是, 鲜见关于小波基的选取与不同景观特征影像关系的研究。

城市不同空间位置上的地物信息特征也不同, 即光谱信息和纹理特征的差异。不同景观特征影像具有不同的图像特征, 加上不同小波基的紧支性、消失距及正交性等性质差异, 在进行变换后小波系数的时频特征也不同, 最终反应到重构图像上。研究表明, 不存在一种小波基对所有类型图像的处理效果都优于其他小波基^[10], 因此, 应针对不同景观特征影像和应用需要动态选取小波基, 使得融合效果最优。本文

基于 SPOT 全色与多光谱数据, 以高密度建筑城市景观(下文简称 A 景观)和低密度建筑城市景观(下文简称 B 景观)为典型影像, 分别选取大量样本进行融合实验, 分析两种景观影像融合质量对小波基选取的响应特征, 最后针对不同城市景观影像和融合质量需求选取最佳小波基。本研究有利于促进该算法的应用, 并可根据需要快速选取高效的小波基提供参考。

1 实验数据

1.1 数据源处理

以覆盖广州市大部分区域的两景 SPOT 影像(成像时间为 2009 年 1 月 1 日, 轨道号为 284-303 和 284-304)为数据源, 分别对全色和多光谱影像进行拼接处理; 因两幅影像是同传感器、同时相获取的, 所以融合前不需进行几何精校正。除影像拼接、样本裁剪和人工目视解译在 ERDAS9.1 中完成外, 融合算法实现及质量指标求算均在 Matlab R2008a 中通过编程完成。

1.2 影像样本采集及景观类型划分

在多光谱影像中随机裁剪出 50 个 $2\text{ km} \times 2\text{ km}$ 的影像样本, 然后对其进行人工目视解译, 得到景观类型面积比重。根据 A 景观与 B 景观的地物组合特征, 确定景观类型划分如下: 建筑用地面积占样本总面积 80% 以上的为 A 景观; 建筑用地面积占样本总面积 40% ~ 80% 的为 B 景观。最终得到两类景观影像样本各 10 个, 各种图像质量指标计算取其平

收稿日期: 2010-12-06; 修订日期: 2011-04-20

基金项目: 中国科学院资源与环境信息系统国家重点实验室开放研究基金项目(A0710、2010KF0006SA); 国家自然科学基金项目(40871229); 广东省自然科学基金项目(9151065003000000)

作者简介: 陈颖彪(1969-), 男, 博士, 教授, 主要从事 GIS 与 RS 应用技术研究。E-mail: chenynb@21cn.com

均值。A 景观与 B 景观典型影像(SPOT RGB413)如图 1 所示(见封 3)。

2 融合方法及质量评价

2.1 IHS 与小波变换结合融合方法

通常认为,RGB 不适合于图像融合,而色度空间则相反。IHS 变换是像素级融合的代表,可用于分辨率和特征差异大的数据之间融合^[11]。IHS 变换能提高影像的空间信息表现能力,但经变换后 I 分量被全色影像全部替换会造成光谱信息丢失,使得融合图像光谱失真严重。IHS 和小波变换结合的融合方法是对全色影像和 I 分量分别进行小波分解,用全色影像的细节信息替代 I 分量的细节信息,重新组合 I 分量的小波系数后经 IHS 反变换得到融合图像。小波 IHS 能够有效增加融合图像的纹理信息,同时保留光谱信息,使图像信息量更加丰富。

2.2 常用小波基特性

小波分析的基(小波基)不是唯一存在的,所有满足小波基条件的函数都可以作为小波基^[12]。不同景观特征影像,甚至同一幅影像在采用不同的小波基进行变换时,由于小波基的支撑区间、对称性等性质的差异,其变换系数具有不同分布^[13],因此,针对不同景观特征影像选取合适的小波基成为一个重要问题。

本研究使用 Matlab R2008a 进行融合实验,根据软件中预定义的小波基和融合需要,选择以下小波簇: 1) Daubechies 小波簇。该系列小波简称为 dbN,其中 N 表示阶数,db 是小波名字的前缀,它是一种具有紧支撑的正交小波。2) SymletsA (symN) 小波簇。sym 小波的构造类似于 db 小波簇,区别在于 sym 小波具有更好的对称性,更适合图像处理。3) Bior-Splines(biorNr. Nd) 小波簇。Nr 和 Nd 分别是重构和分解滤波器长度的相关参数。Biorthogonal 小波簇为半正交小波(双正交小波),其主要特征是具有线性相位,广泛应用于信号与图像重构中。4) Coiflets(coifN) 小波簇。该小波簇有更长的支集长度(6N-1)和更大的消失距(2N),比 dbN 小波簇有更好的对称性。5) ReverseBior(rbioNr. Nd) 小波簇。ReverseBior 小波由 BiorSplines 小波得到,性质也与 BiorSplines 相似。除 symN 小波簇 N= 26~ 45 因计算量过大而剔除外,其他小波簇不同序号下的小波基均被选用。

2.3 融合质量评价

对融合图像进行质量评价是多源遥感影像融合的重要步骤。客观评价指标有很多,本文从融合图像的信息量、清晰度和光谱保真度出发,分别选取信

息熵、平均梯度和偏差指数对融合图像进行定量评价。评价指标详细信息见文献[14, 15]。

3 图像融合结果与分析

3.1 融合图像质量评价

选取 5 种常用小波基,对两类影像样本进行 1 层小波分解融合,统计得到质量指标如表 1 所示。从表 1 可以看出,融合质量与原始影像的景观特征密切相关。B 景观原始多光谱影像的信息熵比 A 景观高,影像所携带的信息量更丰富,B 景观融合图像仍保持优势。在清晰度方面,A 景观全色影像平均梯度更高,其融合图像清晰度也更有优势。

表 1 两类景观融合图像质量指标
Table 1 Quality of fusion images for tow kinds of images

		信息熵	平均梯度	偏差指数	
原始影像	A 景观	Pan	5. 8072	16. 7146	-
		SPOT	18. 5681	6. 2563	-
	B 景观	Pan	5. 9546	13. 7953	-
		SPOT	18. 7037	5. 0514	-
融合影像	A 景观	db5	16. 4587	16. 7984	0. 3963
		sym5	16. 4536	16. 7951	0. 3963
		bior3. 5	16. 4487	16. 7963	0. 3963
		coif5	16. 4510	16. 7965	0. 3963
		rbio3. 5	16. 4530	16. 7976	0. 3963
		Average	16. 4530	16. 7968	0. 3963
	B 景观	db5	16. 6382	13. 8961	0. 4161
		sym5	16. 6335	13. 8929	0. 4160
		bior3. 5	16. 6286	13. 8947	0. 4160
		coif5	16. 6299	13. 8947	0. 4160
		rbio3. 5	16. 6318	13. 8959	0. 4160
		Average	16. 6324	13. 8949	0. 4160

分析两类影像在质量改进程度上的差异。以各自 Pan 影像为基准,B 景观信息量提升能力更强,融合信息熵提高 179. 32%。在图像清晰度方面,B 景观也具有优势,融合后平均梯度提高 7. 22%,A 景观仅提高 4. 91%。分析两类融合图像的偏差指数发现,它们的光谱保证度差异更为明显,B 景观偏差指数无论是总体平均值还是个别小波基都比 A 景观大,表明对 A 景观影像光谱保真性更有优势。

3.2 融合图像质量对小波簇的敏感性差异

设定分解层数为 1,用变异系数刻画融合图像质量在不同小波簇中的离散程度,以此表征融合图像质量对各小波簇的敏感性,统计得表 2。

表 2 各小波簇下两类景观影像融合质量变异系数
Table 2 Variance coefficient of tow kinds of fusion images by different cluster of wavelets

景观类型	质量指标	dbN	symN	biorNr. Nd	rbioNr. Nd	coifN
A 景观	信息熵	0. 000124	0. 000163	0. 000088	0. 000215	0. 000133
	平均梯度	0. 000129	0. 000097	0. 000113	0. 000422	0. 000073
	偏差指数	0. 000157	0. 000178	0. 000247	0. 000257	0. 000022
B 景观	信息熵	0. 000124	0. 000155	0. 000098	0. 000218	0. 00018
	平均梯度	0. 000133	0. 000105	0. 000063	0. 000408	0. 000050
	偏差指数	0. 000132	0. 000138	0. 000181	0. 000200	0. 000016

3.2.1 信息熵 信息熵表征融合图像信息量, 信息熵越大, 图像信息越丰富。从表 2 可以看出, 总体上 B 景观熵值变异系数比 A 景观大。在各小波簇中, $rbioNr.Nd$ 的离散程度最大, $biorNr.Nd$ 离散程度最小。各小波簇的敏感性排序: A 景观为 $rbioNr.Nd > symN > coifN > dbN > biorNr.Nd$, B 景观为 $rbioNr.Nd > coifN > symN > dbN > biorNr.Nd$ 。根据各小波簇熵值的变异系数, 结合两类融合图像熵值在各小波簇上的波动性差异, 选取 dbN 和 $biorNr.Nd$ 进行分析。

图 2 为两类融合图像熵值响应曲线。从图 2a

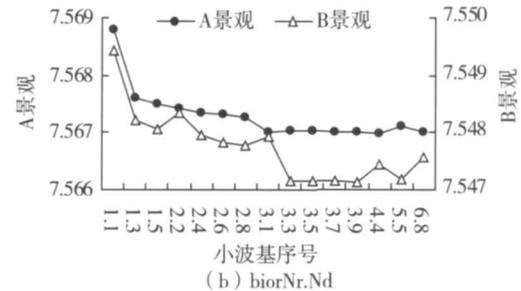
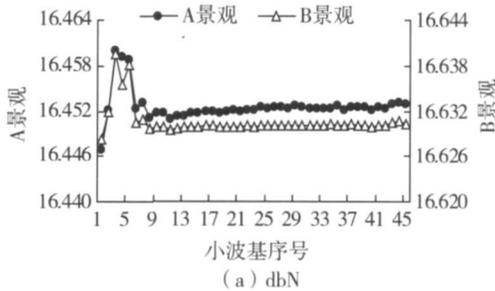


图 2 dbN 和 $biorNr.Nd$ 小波簇下两类景观融合图像信息熵波动性特征
Fig. 2 Entropy curves of tow kinds of fusion images by dbN and $biorNr.Nd$

3.2.2 平均梯度 平均梯度表征图像的清晰度, 平均梯度越大, 图像清晰度越高, 从图像上分辨出的细节信息就越多。从表 2 中可以看出, 两类影像在 $rbioNr.Nd$ 上的变异系数最大。A 景观融合图像平均梯度变异系数排序为 $rbioNr.Nd > dbN > biorNr.Nd$ 。

$Nd > symN > coifN$, B 景观为 $rbioNr.Nd > dbN > symN > biorNr.Nd > coifN$ 。根据各小波簇平均梯度变异系数特征, 结合两类融合图像平均梯度在各小波簇下的波动性差异, 选取 $symN$ 和 $rbioNr.Nd$ 进行分析。

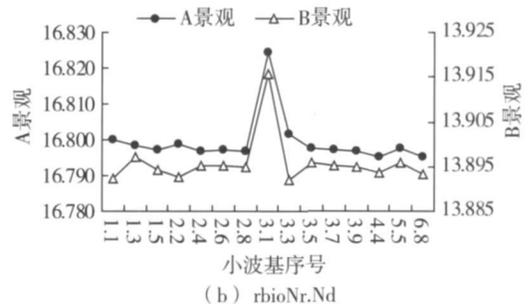
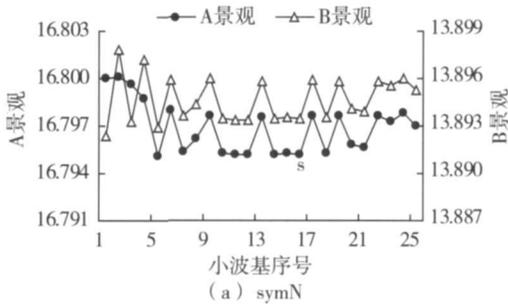


图 3 $symN$ 和 $rbioNr.Nd$ 小波簇下两类景观融合图像平均梯度波动性特征
Fig. 3 Average gradient curves of tow kinds of fusion images by $symN$ and $rbioNr.Nd$

从图 3a 可以看出, 两类景观在 $symN$ 上都有很强的波动性, 但二者差异呈现分段特征: $sym1 \sim 3$ 差异明显, $sym4 \sim 25$ 响应特征相似。分析 $sym1 \sim 5$: A 景观在 $sym2$ 处小幅上升后到最大值 16.8000, 后缓慢下降至 $sym5$ 处至最小值 16.7951; 而对于 B 景观, 该范围内曲线波动则十分剧烈: 最小值在 $sym1$ 处, 最大值出现在 $sym2$, 在 $sym3 \sim 5$ 间平均梯度值升降急速。从图 3b 看出, 两类景观在 $rbioNr.Nd$ 下的响应曲线呈帽型, 二者均在 $rbio3.1$ 处达最大值, 两端曲线变化相对平稳。但二者在某些小波基处呈

现相反的特征: B 景观在 $rbio2.2$ 和 $rbio3.3$ 处出现相对低值, 而 A 景观则出现相对高值。

3.2.3 偏差指数 偏差指数表征融合图像对原始多光谱影像光谱信息的保留程度, 偏差指数越大, 光谱保真度越差。从表 2 可以看出, 在各个小波簇上 A 景观偏差指数的变异系数都最大, 表明 A 景观的离散程度更强, 对小波基的选取更为敏感。对于两类景观而言, 变异系数最大为 $rbioNr.Nd$, 最小是 $coifN$ 。两类融合图像偏差指数在各小波簇下排序一致: $rbioNr.Nd > biorNr.Nd > symN > dbN >$

coifN。根据各小波簇偏差指数变异系数特征, 结合两类融合图像偏差指数在各小波簇下的波动性差异, 选取 biorNr. Nd 和 coifN 进行分析。

从图 4a 可以看出, 整体上两类融合图像偏差指数波动特征相似, 用 bior1. 1 进行融合时偏差指数最大, 光谱保真性最差, bior1. 3 处指数值迅速下降, 后变

化不大, 仅在 bior5. 5 处出现小幅上升。但 A 景观在 bior3. 1 处出现明显次高值, 说明对这两类景观影像进行融合时, 选取 bior3. 1 会对融合图像质量产生较大影响。图 4b 为两类融合图像在 coifN 上的偏差指数曲线, 发现两曲线特征相似, 用 coif2 进行融合都能得到高保真度的融合图像, 其他小波基效果相对较差。

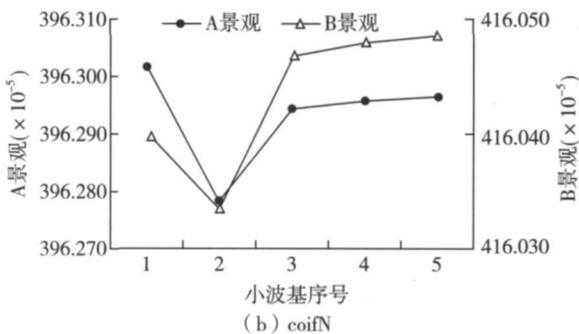
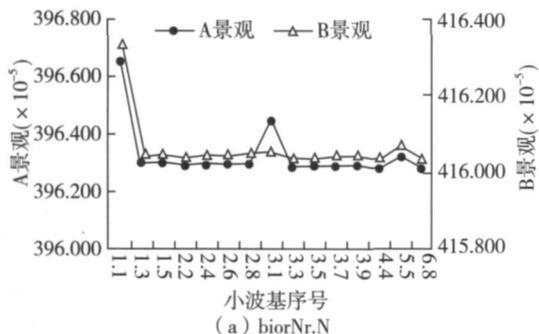


图 4 biorNr. N 和 coifN 小波簇下两类景观融合图像偏差指数波动性特征
Fig. 4 Deviation index curves of tow kinds of fusion images by biorNr. N and coifN

综上所述, 两类景观融合图像在不同的小波簇下敏感性存在明显差异。相对于其它小波簇而言, rbioNr. Nd 在 3 个质量指标中都表现出较强的变异性, 所以选用 rbioNr. Nd 中的小波基进行融合需要特别注意。融合图像质量的波动差异主要出现在某段小波序号范围内, 在该序号范围内两类景观融合图像波动曲线会出现较大甚至相反的变化趋势。

3.3 最佳小波基选取

IHS 和小波变换结合的融合方法能通过调节小波基、小波分解层数及小波系数选取规则来灵活动态权衡融合图像的质量, 因此, 根据本研究分析结果可针对不同的应用需要选取最佳小波基, 使融合质量最优。表 3 是分解层数为 1 时两类景观影像在各小波簇下的融合质量极值(信息熵和平均梯度取最大值, 偏差指数取最小值)。因为两种融合图像的偏差指数差异都很小, 表 3 偏差指数项因小数点保留问题过滤了一些细微差别, 后文分析仍会考虑到这些差别, 从中选择最佳小波基。

表 3 各小波簇下两类景观融合图像质量极值(分解层数为 1)
Table 3 The best value of tow kinds of fusion images by different cluster of wavelets under one decomposition level

	dbN	symN	bioNr.Nd	coifN	rbioNr.Nd	最佳小波基	
信息熵	A景观	16.4599	16.4599	16.4517	16.4559	16.4562	db3(sym3)
	B景观	16.6396	16.6396	16.6346	16.6368	16.6375	db3(sym3)
平均梯度	A景观	16.8092	16.8001	16.8024	16.7986	16.8243	rbio3.1
	B景观	13.9054	13.8978	13.8961	13.8952	13.9156	rbio3.1
偏差指数	A景观	0.3963	0.3963	0.3963	0.3963	0.3966	bioNr.4
	B景观	0.4160	0.4160	0.4160	0.4160	0.4163	db12

从表 3 可以看出, 当小波分解层数为 1 时, 两类融合图像信息熵最大值出现在 dbN 和 symN 内, 选取 db3 或 sym3 能得到高信息量融合图像, 且其熵值

相等, 这与其小波基特性相似有关。选取 rbio3. 1 则使两类融合图像清晰度最高。然而, 当分解层数为 1 时使用 rbioNr. Nd 小波基会得到光谱保真度较差的融合图像, 特别是 rbio1. 1, 这时偏差指数都达最大值; 而且在信息熵和平均梯度方面都有优势的 rbio1. 5 和 rbio3. 1 偏差指数都比较高, 特别是 rbio3. 1 指数值仅次于 rbio1. 1。对于偏差指数, 选用除 rbioNr. Nd 外的小波簇均能得到光谱保真度较好的融合图像, 考虑上述细微差别, 分别选用 bior4. 4 和 db12 能使两类融合图像偏差指数达到最小。

4 结论

应用 IHS 和小波变换结合的融合算法时, 针对不同景观特征影像和质量需求选取高效小波基是一个重要问题。本文基于该算法进行了小波基对城市景观中的高密度建筑景观和低密度建筑景观影像融合质量影响分析。研究表明: 当分解层数为 1 时, 两类景观影像因其所含地物信息的差异, 在不同小波基上融合质量差异明显, 其差异特征因质量指标而异; 两类融合图像质量在不同小波簇下波动性存在差异, 这种差异表现出分段特征。在 3 种质量指标中, 信息熵和平均梯度的响应曲线波动特征差异较大, 偏差指数较为相似。根据这些差异, 在分解层数固定的情况下结合具体景观特征图像和质量指标需要, 可以选出最佳小波基, 如对高密度城市景观影像进行融合时, 选取 db3 和 rbio3. 1 能得到高信息量和高清晰度的融合图像。

除小波基外, 分解层数的设定也是影响融合质

量的重要因素,为了突出小波基的重要性,本文限定了分解层数(1层)。已有研究表明,使用 $rbio3.1$ 在分解层数大于 3 的情况下会出现平均梯度虚高的重构图像失真现象^[8]。本文实验过程中将分解层数设为 3,发现两类融合图像都出现失真。融合中各质量指标可以同时改进,但不能使各方面都同时达到最优。换言之,融合图像的信息熵、平均梯度和偏差指数之间存在相互制约关系。在实际应用中可以权衡不同指标要求,通过一定的优化算法得到特定景观特征影像的最佳小波基和最佳分解层数,使融合图像质量最佳,这也是有待深入研究的问题。

参考文献:

- [1] SHIMONI M, BORGHYS D, HEREMANS R, et al. Fusion of PolSAR and PolInSAR data for land cover classification[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2009, 22(11): 169–180.
- [2] 康停军,张新长,王海鹰.ETM+ 影像 IHS 融合算法改进及其土地覆盖分类实验比较[J]. *地理与地理信息科学*, 2009, 25(4): 64–67.
- [3] 刘丽娟,范文义.基于 MATLAB 的 IHS 变换与小波变换影像融合与应用[J]. *地球信息科学*, 2008, 10(5): 670–677.
- [4] ZHANG Y, HONG G. An IHS and wavelet integrated approach to improve pan sharpening visual quality of natural colour IKONOS and QuickBird images[J]. *Information Fusion*, 2005, 6(3): 225–234.
- [5] CHIBANI Y, HOUACINE A. The joint use of IHS transform and redundant wavelet decomposition for fusing multispectral and panchromatic images[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(18): 3821–3833.
- [6] 程坚,王敬东,李鹏. SAR 与可见光图像融合中小波基选择的研究[J]. *红外技术*, 2008, 30(3): 158–162.
- [7] 陈木生,狄红卫.多聚焦图像融合的最佳小波分解层研究[J]. *光电工程*, 2004, 31(3): 64–67.
- [8] 龚建周,刘彦随,夏北成,等.小波基及其参数对遥感影像融合图像质量的影响[J]. *地理与地理信息科学*, 2010, 26(2): 6–10.
- [9] 龚建周,刘彦随,夏北成,等. IHS 和小波变换结合多源遥感影像融合质量对小波分解层数的响应[J]. *中国图象图形学报*, 2010, 15(8): 1269–1277.
- [10] SAHA S, VEMURI R. Adaptive wavelet filters in image coders—How important are they[A]. *Proc. IEEE IECON'99 [C]*. San Jose, California, 1999, 2: 559–564.
- [11] 霍宏涛,游先祥.小波变换在遥感图像融合中的应用研究[J]. *中国图象图形学报*, 2003, 8(5): 551–556.
- [12] 高志,余啸海. *Matlab 小波分析工具箱原理与应用*[M]. 北京:国防工业出版社, 2005.
- [13] 毕迎春,王相海.小波基和图像分解层数对不同类型图像 EZW 算法的性能的影响[J]. *计算机科学*, 2006, 33(6): 232–235.
- [14] 魏俊,李弼程.基于 IHS 变换、小波变换与高通滤波的遥感影像融合[J]. *信息工程大学学报*, 2003, 4(2): 46–50.
- [15] 胡子付,曾志远,张振龙,等.小波和 IHS 变换结合实现 ETM 图像波段融合[J]. *地球信息科学*, 2005, 7(4): 29–32.

Response of Urban Landscape Images Fusion to the Wavelet Basis Selection

CHEN Ying-biao¹, GU O Guan-hua¹, WU Zhi-feng^{1,2}, WEI Jian-bing²

(1. School of Geographical Sciences, Guangzhou University, Guangzhou 510006;

2. Guangdong Institute of Eco environment and Soil Sciences, Guangzhou 510650, China)

Abstract: Wavelet basis selection plays an important role in the fusion algorithm of integration of wavelet transform and IHS in remote images fusion. However, response of remote images which contain various land use or landscape information to the wavelet basis selection should obtain more attention when this fusion method is used. In this paper, to deeply explore the difference performance of fusion results from different landscape images by diversified clusters of wavelet and wavelet basis, lots of high and low density buildings of urban landscape images samples were cut out from SPOT panchromatic data and multi spectral data. The integration of wavelet transform and IHS was adopted and several indices for images performance including entropy, average gradient and deviation were calculated. Results showed that the fusion images performance have a close relationship to the landscape information included in the raw images, and the performance showed quite different according to indices. The variability of performance with $rbioNr$. Nd using showed more remarkable than the others clusters of wavelet to these two kinds of landscape images. The fluctuate characteristic of indices curves for tow types landscape images showed obvious difference. And those differences just arise in the given series of wavelet basis. With the analysis giving from this paper, the best wavelet basis could be chose when the specific landscape images and composition level was set. This paper supports better understanding of the fusion algorithm and makes its application simpler.

Key words: images fusion; high/low density buildings urban landscape; wavelet transform; selection of wavelet basis

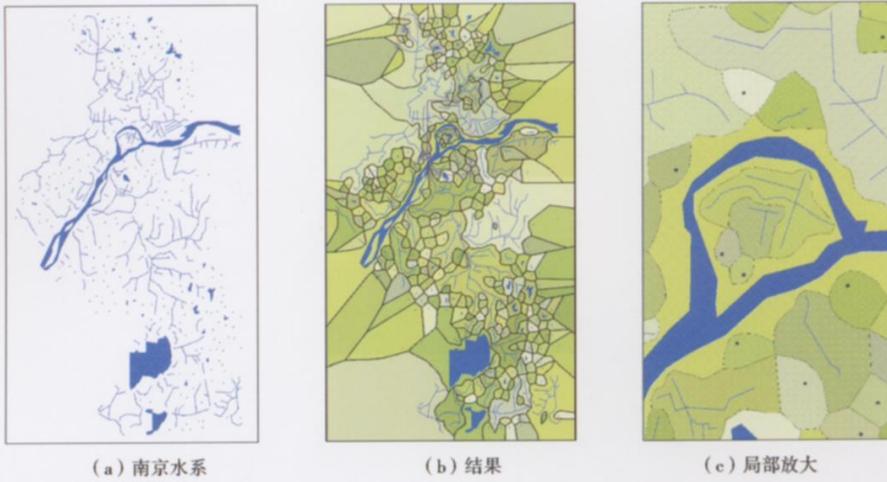


图 7 任意发生元 Voronoi 图实例
Fig. 7 Instances of Voronoi diagrams of general figures

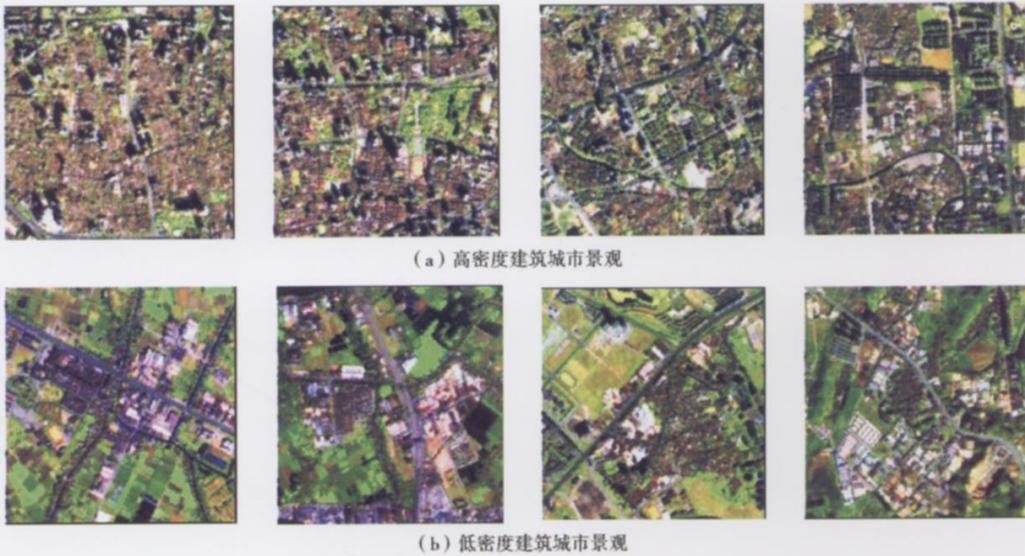


图 1 高密度建筑城市景观与低密度建筑城市景观的典型影像
Fig. 1 Images of high and low density buildings of urban landscape

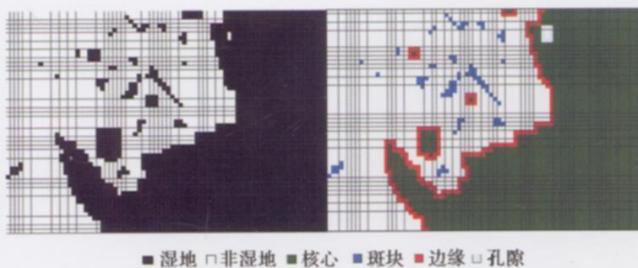


图 1 基于数学形态学的湿地景观格局分类示意(局部)
Fig. 1 Classification of wetland landscape pattern based on mathematical morphology

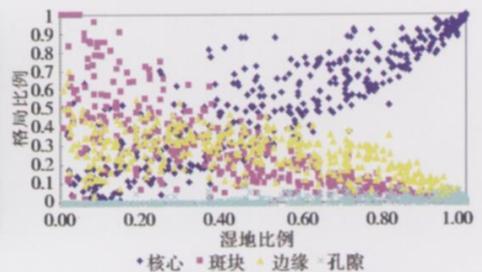


图 2 景观格局比例与湿地比例的关系
Fig. 2 The relationship between landscape pattern proportion and wetland proportion