

引用格式:施慧慧,王妮,滕文秀,等.结合 Gabor 小波和形态学的高分辨率图像树冠提取方法[J].地球信息科学学报,2019,21(2):249-258. [Shi H H, Wang N, Teng W X, et al. Tree canopy extraction method of high resolution image based on Gabor filter and morphology[J]. Journal of Geo-information Science, 2019,21(2):249-258.] DOI:10.12082/dqxxkx.2019.180280

结合 Gabor 小波和形态学的高分辨率图像树冠提取方法

施慧慧¹, 王妮^{1,2*}, 滕文秀³, 刘玉婵^{1,2}

1. 滁州学院地理信息与旅游学院, 滁州 239000; 2. 安徽省地理信息智能感知与服务工程实验室, 滁州 239000;
3. 南京林业大学林学院, 南京 210037

Tree Canopy Extraction Method of High Resolution Image based on Gabor Filter and Morphology

SHI Huihui¹, WANG Ni^{1,2*}, TENG Wenxiu³, LIU Yuchan^{1,2}

1. School of Geographic Information and Tourism, Chuzhou University, Chuzhou 239000, China; 2. Anhui Engineering Laboratory of Geographical Information Intelligent Sensor and Service, Chuzhou 239000, China; 3. College of Forest, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

Abstract: As an important part of forestry economy and an important physiological structure of photosynthesis, tree canopy is also an important forest parameter and stand factor in the process of forest inventory such as growth monitoring and tree species identification. Accurate extraction of tree crown information can effectively provide support for forest inventory. With the development of remote sensing technology, the disadvantages of traditional forest survey methods are obvious, and they are gradually developing towards the direction of combining remote sensing information extraction with traditional forest inventory. In order to improve the accuracy of remote sensing information extraction, people began to use high spatial resolution remote sensing images, combined with computer automation technology, to develop remote sensing information automatic extraction methods. As the demand of the automatic extraction of remote sensing information continuously strengthen, based on high spatial resolution remote sensing data in Chuzhou HuangFu Mountain tree farm field as the study area, we proposed a method that combination of Gabor wavelet and morphology of canopy extraction. First we extracted texture features by Gabor filter, K-means clustering analysis was used to extract dense forest area from the texture feature by PCA (Principal Component Analysis) extracted broadleaf forest region, based on the morphological theory to reduce image noise, and used the prospect foreground markers of the watershed method extract individual tree crown. After comparing with the artificial interpretation canopy information found that the canopy precision automation method extracted in the dense forest area, segmentation accuracy is 79.59%, F measure reached 79.00%, and can accurately provide individual tree crown information, it

收稿日期:2018-06-11;修回日期:2018-11-29.

基金项目:国家自然科学基金项目(41601455);安徽高校省级自然科学研究重点项目(KJ2016A531);滁州学院大学生创新创业训练计划项目资助(201810377040、2018CXXL041). [**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China, No.41601455; College Natural Science Research Key Program of An Hui Province, No.KJ2016A531; College Students Innovation and Entrepreneurship Training Program Project Subsidy of Chuzhou University, No.201810377040, 2018CXXL041.]

作者简介:施慧慧(1996-),女,安徽亳州人,硕士生,研究方向为地理信息科学. E-mail: shihuihui899@163.com

*通讯作者:王妮(1984-),女,山东烟台人,博士,副教授,主要从事遥感与GIS研究. E-mail: wangni2009@163.com

has a certain practical significance of the development of forestry economic survey technology.

Key words: the extraction of individual tree canopy; Gabor filter; PCA; K-means clustering; marker-controlled watershed

***Corresponding author:** WANG Ni, E-mail: wangni2009@163.com

摘要:树冠信息的遥感提取能有效辅助森林参数反演、林分长势监测、树种识别等森林调查活动。随着遥感信息自动化提取的需求不断加强,本文基于高空间分辨率遥感数据,以滁州市皇甫山林场为研究区域,设计了一种结合 Gabor 小波和形态学的树冠提取方法。该方法首先采用 Gabor 小波提取出纹理特征,其次结合 K-means 聚类分析方法,对 PCA 降维后的纹理特征向量提取出阔叶林区,最后基于形态学理论降低影像噪声,并利用前景后景标记的分水岭方法进行单木树冠提取。经过与人工解译的树冠信息结果对比发现,在郁闭度较高的阔叶林区,该自动化方法提取树冠精度较高,分割准确率 A_d 为 79.59%, F 测度达到了 79.00% 能有效提供精确的单木树冠信息,为林业经济调查技术的发展具有一定的实践意义。

关键词:单木树冠提取; Gabor 小波; PCA; K-means 聚类; 标记分水岭

1 引言

树冠不仅是林业经济重要组成部分、林木光合作用的重要生理结构,也是长势监测、树种识别等森林调查过程中重要的森林参数、林分因子,因此树冠信息的精确提取能有效为林业调查提供支持。随着遥感技术的发展,传统的林业调查方法劣势显著,逐步向遥感信息提取与传统森林调查相结合的方向发展。为了提高遥感信息提取的精度,人们开始利用高空间分辨率遥感影像,结合计算机自动化技术,发展遥感信息自动化提取方法。国内外学者已提出多种方法提取重要森林参数,常见的方法有 K-Means、SVM、面向对象分割等^[1-3]。纵观多种方法,根据树冠分割的起始点不同,单木树冠提取的方法主要可以分为 2 类:① 基于对象识别的单木树冠分割,先分割对象,再判定单木树冠范围,如谷底跟踪法、模板匹配法、多尺度分割等^[4-6]方法。② 基于像元生长算法的单木树冠边界生成方法,这类方法先探测树冠位置,如局部最大值法、多尺度分析法、3D 模型法等^[7-9],再由像元点逐步生长至树冠边界,如分水岭分割^[10-13]、种子区域生长法^[14-16]、局部射线法等。这些方法主要是对郁闭度较低的林地或者针叶林树冠进行提取,精度较高,但在普适性、郁闭度较高的林冠提取精度方面都存在一定的问題。其中,局部最大值法是目前应用最为广泛的单木探测方法,考虑到阔叶林形状不规则,该方法能有效探测到多个局部最大值点,故该方法主要对针叶林的单木树冠提取精度更高。而郭昱杉等^[7]利用标记控制分水岭的方法进行的树冠提取,相比 Jing 等^[17]通过高斯滤波和分水岭分割所得结果精确度更高,但对于郁闭度较高的阔叶林区,提取精度较低,

导致面向对象分类方法的自动化程度受限。

针对上述问题,本文提出了一种结合 Gabor 小波和形态学的高分辨率图像树冠提取方法,首先利用纹理特征和聚类分析先区分出阔叶林树冠信息,提出稳定的先验信息,其次通过基于前景背景标记的方法进行分水岭分割,自动提取树冠边界,提供了一种高效的阔叶林单木树冠提取方法,为林业调查提供技术支持。

2 研究区概况及数据源

2.1 研究区概况

皇甫山国家森林公园位于安徽省滁州市,地理坐标为 117°58' E-118°03' E、32°17' N-32°25' N。其地处北亚热带湿润性季风气候区,海拔 399.2 m,占地面积约为 3552 hm²,是皖东地区保存最完整、面积最大的原始次生林国家森林公园。保护区森林覆盖率达到 96%,区内建设有皇甫林场,以人工林著称,主要分布具备根系发达、树冠浓密、落叶丰富易分解、生长迅速、郁闭紧密等特点的树种,在江淮流域地区植被类型有一定代表性。其中,以松(*Pinus*)和麻栎(*Quercus acutissima*)为主,占总株数的 60% 左右,其他数量较多的树种还有刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、杨树(*Populus*)、柳树(*Salicaceae*)、枫香树(*Liquidambar formosana*),以及辅助经济树种,如桃树(*Persica*)等。

2.2 数据源

本文采用从 Google Earth 或缺的 2017 年 2 月空间分辨率为 0.25 m 的高分辨率遥感影像数据^[18]。在影像中选取一块具有较好代表性样地进行实验,影像大小为 2560 像元×2560 像元(图 1),区域无云



图1 研究区影像

Fig. 1 Image of study area

覆盖,质量较好,并选取一块样地作为单木树冠提取研究区,采用实地调查与目视解译相结合的方式勾绘树冠轮廓作为参考数据,验证树冠提取精度。

3 研究方法

本文首先利用 Gabor 小波获取影像的纹理特征,并利用 K-Means 聚类算法提取阔叶林信息,然后利用数学形态学方法计算前景背景标记,最后利用标记的分水岭方法提取单木树冠。本文算法流程图如图2所示。

3.1 阔叶林区提取

传统遥感图像的分类主要利用光谱特征的统计,而高分辨率遥感影像中光谱波段较少,具有丰富的纹理特征,传统的基于光谱特征的分类方法不适用于高分辨率遥感影像分类。因此,本文利用纹理特征对高分辨率遥感影像进行分析,提取林区影像。

3.1.1 纹理特征获取

现有主要纹理特征提取方法包括小波变换、灰度共生矩阵(GLCM)等,而 Gabor 滤波器有与生物视觉系统相近的特点,具有易于调谐的方向和径向频率带宽以及易于调谐的中心频率的优势,可以在频域和时域同时达到最佳分辨率,适合高分辨率遥感影像的纹理特征提取。从物理意义上来看, Gabor 小波变换是灰度分布变换为频率分布函数,在提取图像特征的局部空间和频率域信息方面具有

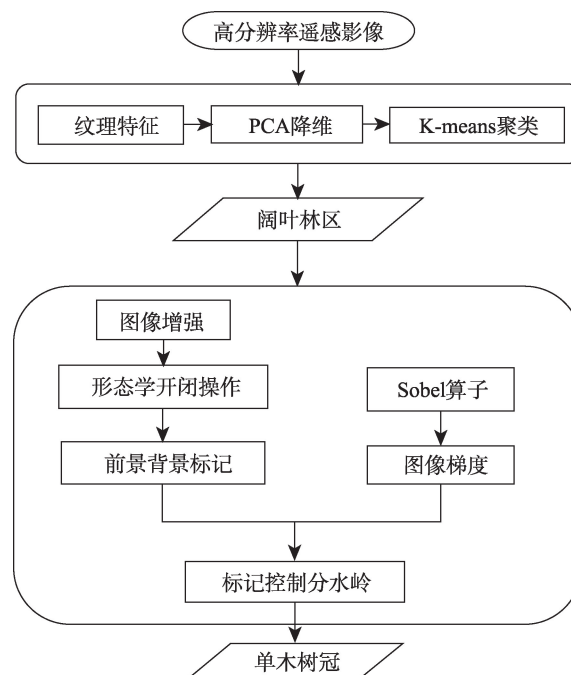


图2 算法流程

Fig. 2 Algorithm flow chart of this study

良好的特性。本文采用的是二维 Gabor 滤波器,它是由一个高斯核函数和正弦平面波的乘积构成,分为实部和虚部。

实部:

$$g(x, y; \lambda, \theta, \psi, \sigma, \gamma) = \exp\left(-\frac{x^2 + \gamma^2 y^2}{2\sigma^2}\right) \times \exp\left(i\left(2\pi\frac{x'}{\lambda} + \psi\right)\right) \quad (1)$$

虚部:

$$g(x, y; \lambda, \theta, \psi, \sigma, \gamma) = \exp\left(-\frac{x^2 + \gamma^2 y^2}{2\sigma^2}\right) \times \cos\left(2\pi\frac{x'}{\lambda} + \psi\right) \quad (2)$$

式中: λ 决定了 Gabor 滤波的波长; θ 表示 Gabor 核函数的方向。本文采用 5 个频率 ($\lambda=0, 1, \dots, 4$), 8 个方向 ($\theta=0, 1, \dots, 7$), 共 40 个核函数(图3), 由此多尺度、多方向便可有效地提取出纹理特征。

通过 Gabor 能量信息可以较好表达出纹理信息,但考虑到仅是能量信息会造成分类误差^[9],故基于 Gabor 小波的方法,采用均值和标准方差获取图像纹理特征。其以 $M(v, \zeta)$ 表示图像的均值,以 $V(v, \zeta)$ 表示图像的标准方差,定义 T 为 Gabor 纹理特征向量,则可得 $T(v, \zeta) = \{M_{0,0}, V_{0,0}, M_{0,1}, V_{0,1}, \dots, M_{v-1, \zeta-1}, V_{v-1, \zeta-1}\}$, 结果包括实部特征、虚部特征、5 个频率、

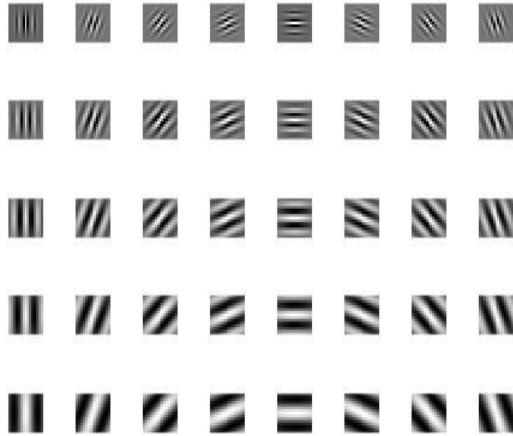


图3 5个频率、8个方向 Gabor 滤波器组

Fig. 3 Gabor filter of 5 frequency and 8 direction

8个方向、均值、标准方差,得到纹理特征向量的维数应该为: $2 \times 5 \times 8 \times 2 = 160$,即为该像元点的纹理特征。为提高分类精度,对图像进行纹理特征提取的同时,本文采用了滑动邻域的方法,以某个像元点为中心建立 15×15 的滑动窗口(图4为其中一个滑动窗口进行的 Gabor 变换)对图像使用 Gabor 滤波器进行遍历(边界处则采用0填充)。

Gabor 小波在图像处理上有独特的优势,但是 Gabor 小波变换提取得到的纹理特征维数太高,如果直接利用 Gabor 纹理特征提取遥感影像中的阔叶林区,会出现维数灾难,降低算法运行速率,故将特征向量利用主成分分析方法(PCA)进行降维处理。通过线性投影将高维数据映射到低维空间表示,并期望在所投影维度上数据的方差最大,使用较少的数据维度来保留较多原数据的特性。在此方法中,将 n 维特征映射到 d 维上($d < n$),所得到的 d 维特征是重新构造出来的特征,而并非简单的从原

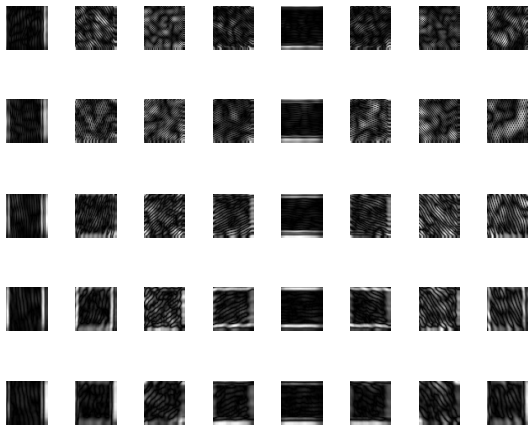


图4 Gabor处理图像显示

Fig. 4 The image of Gabor processing

数据减去 $n-d$ 维特征。

为了实现对高维特征向量的降维,需要计算出协方差 C (式(3)),但协方差是一种度量2个变量关系的统计量,即是用来处理二维数据,而对于高维 n 数据则应计算 $\frac{n!}{(n-2)! \times 2}$ 个协方差。因此,可以通过协方差矩阵 C (式(4))组织数据,其中 Dim_i 表示 i 的维数, Dim_j 表示 j 的维数。

$$\text{cov}(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{n-1} \quad (3)$$

$$C_{n \times n} = (c_{i,j}, c_{i,j} = \text{cov}(Dim_i, Dim_j)) \quad (4)$$

根据式(4)所得的协方差矩阵 C ,对其进行特征值分解便可计算出特征值 λ ,并降序排序: $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq \dots \geq \lambda_n$;通过贡献率的大小取得前 d 个特征值所对应的特征向量 $w = (w_1, w_2, \dots, w_d)$ 构成变换矩阵 Tm ,利用变换矩阵 Tm 得到 d 维全新特征。

基于该方法得到主成分得分和累计得分如图5所示(图左侧纵坐标代表主成分得分,右侧代表累计得分百分比),第一主成分得分为39.41,第二主成分得分为23.47,第三主成分得分为13.45,第四、第五主成分得分分别为5.81、4.14,前9个主成分累计得分为96.71,通常认为累计贡献超过95%即可较好地保留原输入信息,因此本文选取主成分因子为9对纹理特征进行降维。

3.1.2 树冠范围获取

为提高从高分辨率遥感影像中提取冠幅的自动化程度,基于 Gabor 纹理特征,利用一种无监督分类方法提取阔叶林区。K-Means 聚类分割是目前较为成熟的一种聚类分析方法,而且在植物分割图像中广泛应用^[20]。依据数据首先确认每个聚类的中心,根据最小距离准则对研究对象的特征数据进

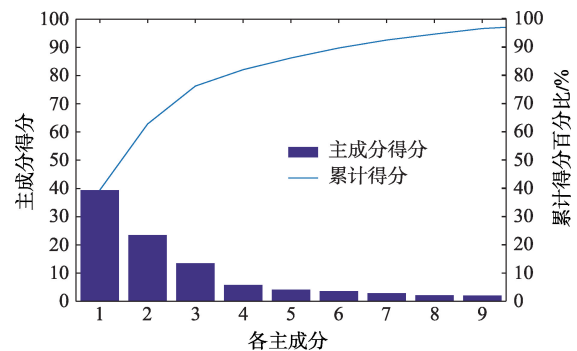


图5 主成分得分

Fig. 5 Scores of principal component

行聚类^[21]。当2个对象的距离越近,其相似度就越大,即被认为属于同一类。

在使用K-means进行图像分割时需要预先指定聚类数目 K ,根据研究区地物种类判断和实验总结,认为 K 取值为5时得到最佳分割效果。通过实验发现,直接对图像进行聚类分割会有建筑物、水域错分到阔叶林区,而基于纹理特征的聚类分割则较好的将阔叶林区从影像中分割出来,能够有效地消除错分问题,故在基于纹理特征的基础上进行聚类分割远比直接基于图像进行分割效果好(图6)。

3.2 树冠信息提取

3.2.1 图像预处理

在郁闭度较高的林区,由于阔叶林树冠内部不规则,若直接提取树冠标记则容易产生伪树冠和噪声,导致严重地过分割,因此在选取标记之前对图像进行预处理。在图像转为灰度图之后,采用图像增强方式从而扩大图像中不同物体特征之间的差别。但图像仍存在大量噪声,传统的线性滤波器如均值滤波,通过邻域的平均值代替每个像元的灰度,从而达到图像平滑的目的,但在图像平滑的同时,图像边缘模糊程度较大,对于后续单木树冠提取有影响。相对于传统的线性滤波器,形态学的非线性滤波更适合图像分割及与图像几何特性相关方面的应用^[7]。形态学滤波可以对图像去噪处理,

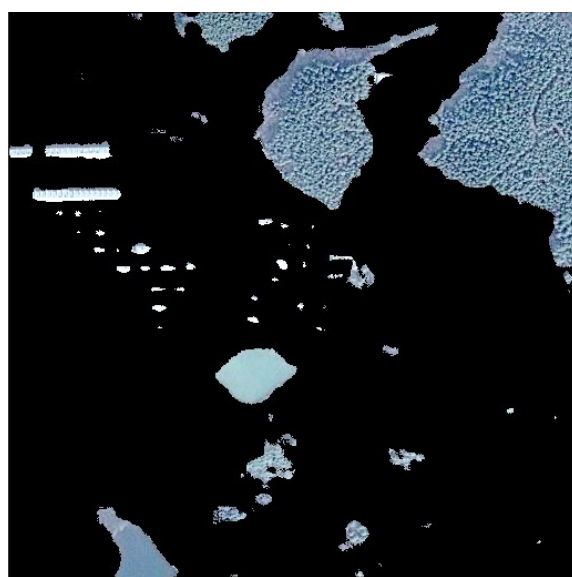
同时还可较好地保留轮廓信息,因此选用形态学滤波对图像进行平滑。

在树冠提取部分,本文采用部分阔叶林区影像进行分析。基于形态学开闭运算对图像进行预处理,排除图像纹理细节和一些噪声对实验的影响,基于该图像进行二值化。标记分水岭一般针对于梯度图像进行,由于梯度值总是在物体边缘处较高,内部较低,故可探测树冠边界。本文利用Sobel算子基于横向、纵向模板获取梯度幅值图像,并同样采用形态学开闭运算对梯度图像进行重建,如图7所示。

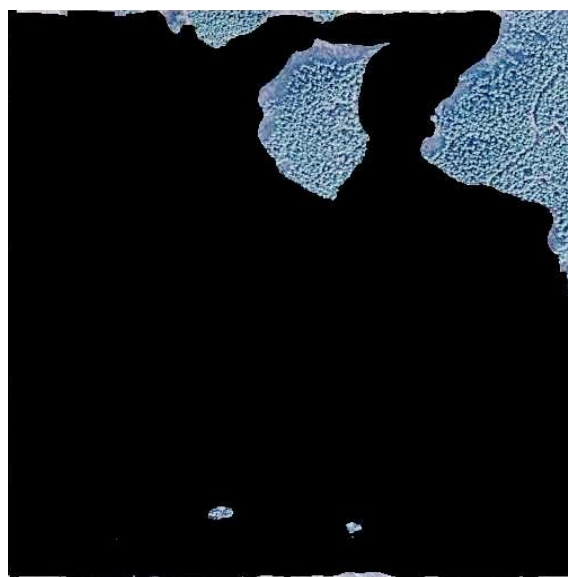
3.2.2 标记生成

通过形态学滤波后的图像消除大量噪点,在此基础上预先在图像中寻找一些标记引导分割,可有效提高分割精度。本文采用前景背景标记对梯度图像进行改进,从而达到更理想的分割结果。

根据树冠的光谱特征与高分影像,可以判断树冠的顶部具有较高的亮度值,而树冠的边缘则亮度值较暗,由此根据亮度值提取出感兴趣区,并在形态学腐蚀的基础上获得前景标记。腐蚀后的结果可以较好地将所感兴趣的区域分割出来,但物体的形状、面积会受到影响,因此再对图像进行背景标记的提取。通过将灰度图像转换成背景像元为0,树冠像元为1得到的二值图像,对其进行距离变换的结果进行分水岭分割,进而得到区域间的分界线构成背



(a) 直接进行K-means分割



(b) 基于纹理特征进行K-means分割

图6 提取阔叶林区

Fig. 6 The result for the dense forest area

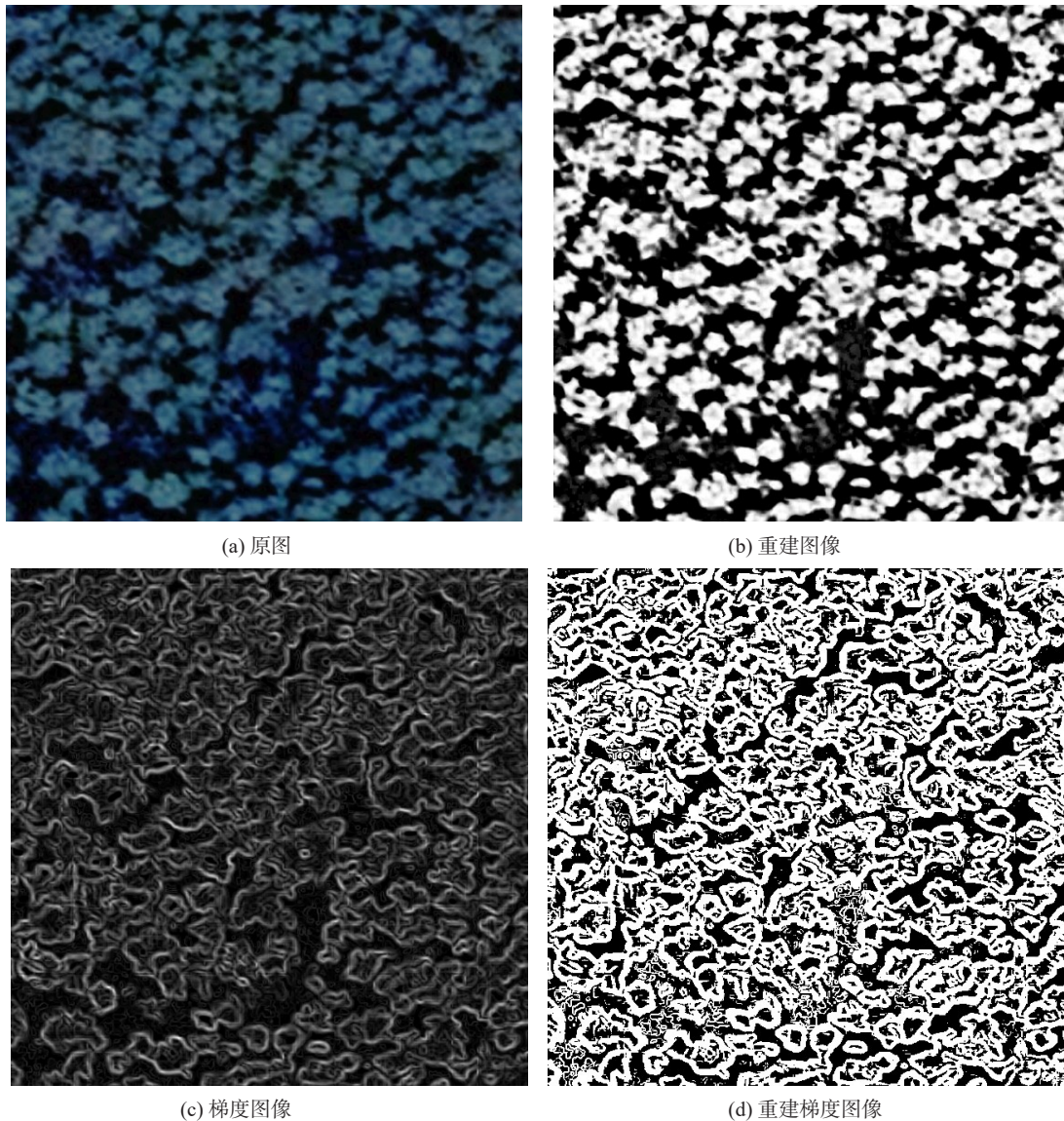


图7 图像预处理过程

Fig. 7 Processes of image preprocessing

景标记。距离变换是指计算二值图像中零值像元与其最邻近的非零值像元间的距离,即计算目标物体边缘与背景间的距离,其可定义为^[22]:

$$D(p, q) = \min\{dis(p, q), p \in \sigma, q \in \sigma'\} \quad (5)$$

式中: p, q 代表图像中的像元点; σ 代表目标对象; σ' 代表背景; $dis()$ 为距离计算函数。

结构元素是形态学中很重要的一个概念,在各种形态学的变换中起关键作用。它是根据实际实验对象所设计出来与输入图像进行各种形态学的运算,可设为圆盘状、方形、线型、椭圆体等,并且它的形状、大小设计的是否合理将直接影响实验结果。根据树冠形状,结构元素选用圆盘形,而其大小参数设定通过实验发现,当固定腐蚀元素尺寸为

13,将结构元素设为15与10相比较。由图8(a)、(b)中红框标记可发现,结构元素为10会产生标记丢失的问题,故可以确定形态学滤波的结构元素尺寸为15可以达到更好的实验结果。

当固定形态学结构元素尺寸为15,对腐蚀元素尺寸大小设置进行实验。由图9(a)、(b)中红框标记可发现腐蚀元素为15时,由于腐蚀会将标记面积减小,因此当腐蚀程度过大则会产生标记丢失情况,由此产生欠分割现象,确定腐蚀元素尺寸为13可以达到更好的实验结果,能够有效避免标记丢失情况。综合上述,当结构元素设为15、腐蚀元素设为13时,依此结构元素对图像进行图像开运算,可以较好地获取图像标记。

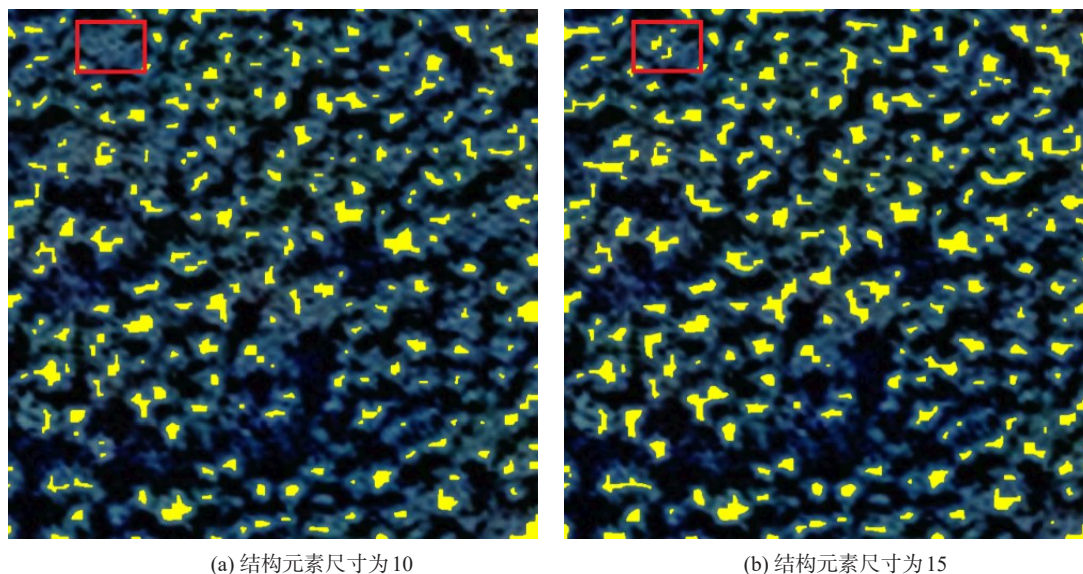


图 8 形态学结构元素尺寸的选择

Fig. 8 The selection of morphological structure size

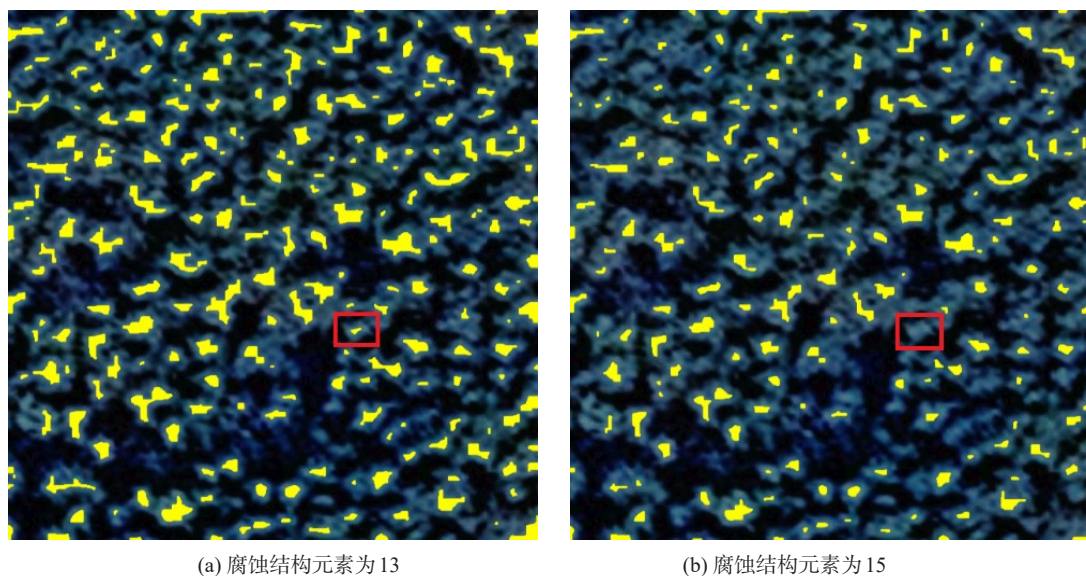


图 9 腐蚀元素尺寸的选择

Fig. 9 The selection of corrosion size

3.2.3 分水岭分割

传统分水岭分割法是基于拓扑理论、形态学理论的分割方法,通过将图像看作是测地学上的拓扑地貌,类似于将图像看作为一幅地形图。图像每个像素点的灰度值看作该点代表的海拔高度,而每个局部极小值及其影响区域称为集水盆,而集水盆的边界为分水岭。分水岭分割在很多领域都得到广泛应用,但该分割方法易产生过分割。而面对大量相连的树冠,传统的分水岭算法得到的结果精度不能满足当前需

求。故为了解决过分割问题,在分水岭分割的基础上在图像上寻找一些标识进行引导分割。

通过本文上述步骤得到的梯度图像和标记图像(图 10)后,可以采用最小覆盖算法进行图像重建。该方法进行的重建使局部最小区域仅发生在标记的位置,若需要移动这些位置,则其他像素值需要进行上推,进而使其余的局部极小值不再存在,接着对重建的梯度幅值图像进行分水岭分割便得到最终树冠分割结果。

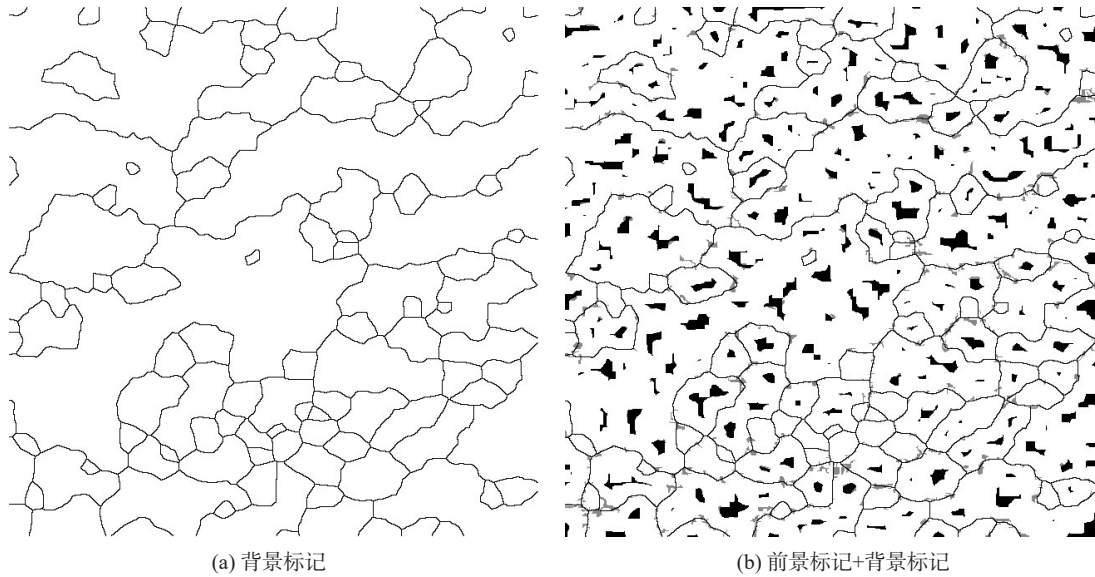


图10 标记图像

Fig. 10 The marking of images

4 结果与分析

4.1 实验结果

在上述对高分辨率遥感影像提取出林冠范围的基础上,采用本文所述的基于标记分水岭算法对树冠进行分割,得到最终提取结果如图11所示。

4.2 精度评价

由于缺少地面调查数据,但正因为本文所提出的方法是用来代替人工进行解译过程,因此通过采用目视解译的方法使用ArcGIS 10.2进行人工勾绘树冠,人工解译结果如图11(a)所示。以人工解译的结果图作为参考图,对自动分割出的结果一一比对,根据差异性进行精度评价。由于位于边缘处的

树冠不完整,故精度评价不包括边界上的树冠。

单木树冠提取结果如图11所示。从图11中3幅图的对比可直观地看出,本文算法单木树冠提取效果优于传统分水岭算法,由于树冠内部亮度变化不均匀,树冠大小不同,树冠形状不规则等原因,采用传统的标记控制分水岭算法提取单木树冠,欠分割现象较严重,多个树冠合并成一个树冠,并存在树冠丢失和错分问题。相比标记控制分水岭算法,本文算法欠分割问题明显减少,提取了大部分单木树冠。

为验证单木树冠提取精度,根据人工解译图与自动分割图比对关系,将分割结果分为5类:匹配、接近匹配、漏分、合并、错分。其中,“匹配”表示参考树冠和分割树冠的重叠面积各达到二者的50%以上;“接近匹配”表示参考树冠和分割树冠的重叠

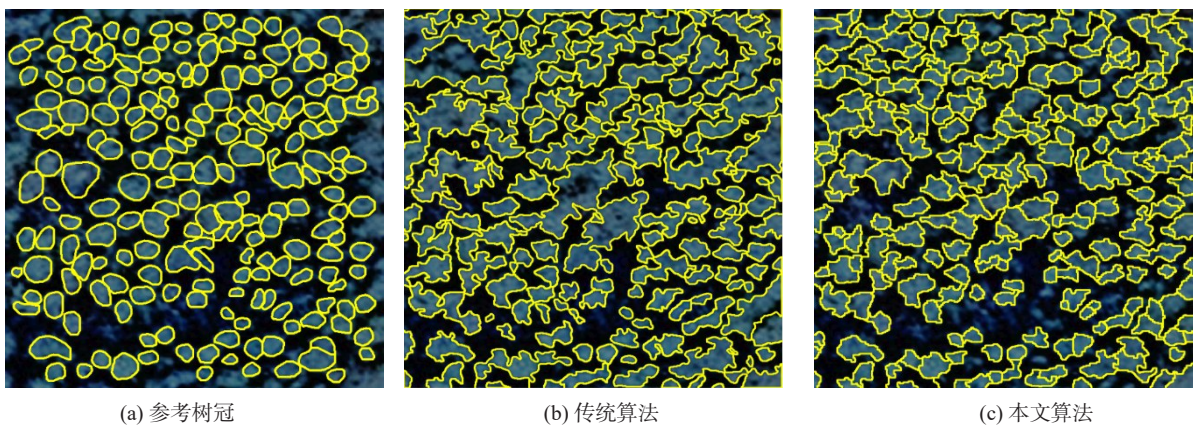


图11 树冠提取结果

Fig. 11 The results of artificial interpretation

面积达到其中一方的 50% 以上;“漏分”表示分割图像中无参考图像中对应的树冠区域;“合并”表示分割图像中将参考图像中的多个树冠划分成一个树冠;“错分”表示分割树冠中划分出了参考图像中没有的树冠对象。匹配和接近匹配被认为正确分割结果,漏分和合并被认为是漏分误差,错分被认为是错分误差。故分割准确率 A_d 、召回率 A_r 和 F 测度分别定义如式(6)–(8)所示。

$$A_d = \frac{T_c}{T_d} \times 100\% \quad (6)$$

$$A_r = \frac{T_c}{T_r} \times 100\% \quad (7)$$

$$F = \frac{2A_r A_d}{A_r + A_d} \quad (8)$$

式中: T_c 代表自动分割正确的树冠个数; T_d 代表自动分割结果中树冠总数; T_r 表示参考图中树冠总数。

由表 1 可得,标记控制分水岭与真实树冠的匹配结果为 66,而本文算法为 137,本文方法匹配了更多的树冠,树冠提取精度更高。根据式(6)–式(8)可计算出,本文方法进行的单木树冠提取的分割准确率 A_d 为 79.59%、召回率 A_r 为 78.39%, F 测度为 79.00%。相比标记控制分水岭方法,本文方法减少了合并问题,有效的抑制错分割问题。综上所述,本文算法是一种更有效的单木树冠提取方法。

表 1 精度评价表

Tab. 1 The accuracy assessments of segmentation results

算法	匹配	接近匹配	漏分	合并	错分	目视解译
标记控制分水岭	66	12	5	57	5	199
本文算法	137	19	11	36	4	199

5 结论

目前,单木树冠提取方法由于阔叶林树冠的不规则性,很难对阔叶林进行单木树冠提取,且自动化程度受限。本文通过纹理特征和聚类分析对阔叶林区进行提取,并在此基础上利用标记分水岭分割得到阔叶林单木树冠。实验表明:对于郁闭度较大的阔叶林区,整体树冠提取面积比例仅相差 2.4%,单木树冠提取 F 测度达到 79.00%,与郭昱杉等^[10]所提出的标记分水岭分割结合的方法相比精度有所提高,而且在此基础上利用 Gabor 小波和聚类分析提高了自动化程度,为林业调查技术的发展具有一定的实践意义。

本文实验结果中,大多误差来自于树冠合并严

重。在接下来的实验中,可着重研究阔叶林的树冠合并问题,从而达到更高的精度。随着遥感业的发展,发展生态经济的不断需求,树冠信息也将越来越被重视,相信基于高分辨率影像的单木树冠自动提取一定会得到快速的发展。

参考文献(References):

- [1] 王平,周忠发,殷超.基于全极化 SAR 与多光谱的喀斯特山区农村林地提取[J].中国农业资源与区划,2017,38(7): 41-50. [Wang P, Zhou Z F, Yin C. Rural woodland extraction based on full polarization SAR and multispectral in karst mountain areas[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2017,38(7):41-50.]
- [2] 周艳飞,张绘芳,李霞,等.基于高分辨遥感数据的胡杨与柽柳树冠提取[J].遥感技术与应用,2015,30(3):510-517. [Zhou Y F, Zhang H F, Li X, et al. Extraction of tree-crown of *populous Euphratica* and *Tamarix Ramosissima* based on high resolution remote sensing data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2015,30(3):510-517.]
- [3] 李丹,柯樱海,宫辉力,等.基于高分辨率遥感影像的城市典型乔木树种分类研究[J].地理与地理信息科学,2016, 32(1):84-89,127. [Li D, Ke Y H, Gong H L, et al. Urban tree species classification with machine learning classifier using WorldView-2 imagery[J]. Geography and Geo-information Science, 2016,32(1):84-89,127.]
- [4] Colgeon F A. A crown-following approach to the automatic delineation of individual tree crowns in high spatial resolution aerial images [J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 1995,21(3):274-284.
- [5] Pollock R J. The automatic recognition of individual trees in aerial images of forests based on a synthetic tree crown image model[D]. Vancouver: The University of British Colombia, 1996.
- [6] 冯静静,张晓丽,刘会玲.基于灰度梯度图像分割的单木树冠提取研究[J].北京林业大学学报,2017,39(3):16-23. [Feng J J, Zhang X L, Liu H L. Single tree crown extraction based on gray gradient image segmentation[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2017,39(3):16-23.]
- [7] 张凝,张晓丽,叶栗.基于改进爬峰法高分辨率遥感影像分割的树冠提取[J].农业机械学报,2014,45(12):294-300. [Zhang N, Zhang X L, Ye S. Tree crown extraction based on segmentation of high-resolution remote sensing image improved Peak-climbing algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(12):294-300.]
- [8] 刘晓双,黄建文,胡红波.高空间分辨率遥感的单木树冠

- 自动提取方法与应用[J].浙江林学院学报,2010,27(1):126-133. [Liu X S, Huang J W, Hu H B. Research progress in the methods and applications of individual tree crown's automatic extraction by high spatial resolution remote sensing[J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 2010,27(1):126-133.]
- [9] 崔少伟.基于高分辨率遥感数据单木树冠提取研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2011. [Cui S W. Extraction research single tree crown based on high resolution remote sensing data[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2011.]
- [10] 郭昱杉,刘庆生,刘高焕,等.基于标记控制分水岭分割方法的高分辨率遥感影像单木树冠提取[J].地球信息科学学报,2016,18(9):1259-1266. [Guo Y S, Liu Q S, Liu G H, et al. Individual tree crown extraction of high resolution image based on marker-controlled watershed segmentation method[J]. Journal of Geo- information Science, 2016,18(9):1259-1266.]
- [11] Yang J, He Y, Caspersen J P, et al. Delineating individual tree crowns in an uneven-aged, mixed broadleaf forest using multispectral watershed segmentation and multiscale fitting[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing, 2016,10(4):1390-1401.
- [12] 滕文秀,温小荣,王妮,等.迭代H-Minima改进分水岭的高分影像单木树冠提取[J].激光与光电子学进展,2018,55(12):122802. [Teng W X, Wen X R, W N, et al. Iterative H- Minima improved watershed method for individual tree crown delineation in high spatial-resolution remote sensing image[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018,55(12):122802.]
- [13] Huang H, Li X, Chen C. Individual tree crown detection and delineation from very-high-resolution UAV images based on bias field and marker-controlled watershed segmentation algorithms[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing, 2018, 11(7):2253-2262.
- [14] 甄贞,李响,修思玉,等.基于标记控制区域生长法的单木树冠提取[J].东北林业大学学报,2016,44(10):22-29. [Zhen Z, Li X, Xiu S Y, et al. Individual tree crown delineation using maker-controlled region growing method[J].Journal of Beijing Forestry University, 2016,44(10):22-29.]
- [15] 吴见,王帅帅,谭靖.基于改进分割算法的退耕地树冠信息提取[J].南京林业大学学报(自然科学版),2016,40(2):167-172. [Wu J, Wang S S, Tan J. Tree-crown information extraction in returning farmland to forest land based on improved segmentation algorithm[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2016, 40(2):167-172.]
- [16] 姜仁荣,汪春燕,沈利强,等.基于高分辨率遥感图像的荔枝林树冠信息提取方法研究[J].农业机械学报,2016,47(9):17-22. [Jiang R R, Wang C Y, Shen L Q, et al. A method for lichee's tree- crown information extraction based on high spatial resolution image[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(9):17-22.]
- [17] Jing L, Hu B, Noland T, et al. An individual tree crown delineation method based on multi-scale segmentation of imagery [J]. Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2012,70(3):88-98.
- [18] <http://www.xiazaizhijia.com/soft/818.html>.
- [19] 赵洪伟,谢永芳,曹斌芳,等.基于Gabor小波和LPP的浮选过程泡沫纹理特征提取及应用[J].上海交通大学学报,2014,48(7):942-947. [Zhao H W, Xie Y F, Cao B F, et al. Extraction and application of forth texture feature based on Gabor wavelets and LPP in flotation process[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2014,48(7):942-947.]
- [20] 杨信廷,孙文娟,李明,等.基于K均值聚类 and 开闭交替滤波的黄瓜叶片水滴荧光图像分割[J].农业工程学报,2016(17):136-143. [Yang X T, Sun W J, Li M, et al. Water droplets fluorescence image segmentation of cucumber leaves based on K-means clustering with opening and closing alternately filtering[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016(17):136-143.]
- [21] 赵红丹,田喜平.基于K-means算法分割遥感图像的阈值确定方法研究[J].科学技术与工程,2017,17(9):250-254. [Zhao H D, Tian X P. Based on K-means algorithm of remote sensing image threshold segmentation method for determining the research[J]. Science Technology and Engineering, 2017,17(9):250-254.]
- [22] 卜帆,石玉立.机载LiDAR高差和高分影像的城市树冠提取比较[J].遥感技术与应用,2017,32(5):875-882. [Bu F, Shi Y L. The comparison of urban tree crown extraction based on airborne LiDAR elevation difference and high resolution imagery[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2017,32(5):875-882.]