

基于无人机多光谱影像特征的最佳波段组合研究

赵庆展^{1,2} 刘伟^{1,2} 尹小君^{1,2} 张天毅^{1,2}

(1. 石河子大学信息科学与技术学院, 石河子 832000; 2. 兵团空间信息工程技术研究中心, 石河子 832000)

摘要: 针对卫星遥感影像分辨率低、时间周期长、波段冗余信息多等问题,利用无人机多光谱数据获取便捷、成本低、周期短的优势,以玛纳斯河畔为研究区,使用固定翼无人机搭载 Micro MCA12 Snap 多光谱传感器获取高分辨率多光谱影像。通过对多光谱影像数据标准差及相关性进行分析排序,结合 OIF 方法得到原始波段最佳组合,使用多种植被及水体指数、主成分分析、灰度共生矩阵确定信息量最大的光谱特征与纹理特征波段,提出将光谱特征、纹理特征信息与最佳波段指数结合的方法来确定地物分类最佳波段组合。实验结果表明,针对 Micro MCA12 Snap 多光谱传感器,可选择波段 1、6、11、NDVI、NDWI 以及灰度共生矩阵中的 Mean 参量作为其地物分类的最佳波段组合。感兴趣区域内非监督 IsoData 分类精度从 83.57% 提升到 89.80%,监督的 SVM 分类精度从 95.58% 提升到 99.76%。研究结果可为无人机多光谱遥感最佳波段组合选择提供借鉴和参考。

关键词: 无人机; 多光谱传感器; 最佳波段组合; 光谱特征; 纹理特征

中图分类号: TP751; S23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)03-0242-07

Selection of Optimum Bands Combination Based on Multispectral Images of UAV

Zhao Qingzhan^{1,2} Liu Wei^{1,2} Yin Xiaojun^{1,2} Zhang Tianyi^{1,2}

(1. College of Information Science and Technology, Shihezi University, Shihezi 832000, China

2. Geospatial Information Engineering Research Center, Xinjiang Production and Construction Corps, Shihezi 832000, China)

Abstract: With the rapid development of unmanned aerial vehicle(UAV), it is widely used in the field remote sensing which is different from the satellite remote sensing, and has many advantages such as more convenient, lower cost, and shorter revisit cycle. However, effective information cannot be extracted from the multispectral images of UAV easily because of the high-resolution multi-band redundant data which can increase the complexity of data processing and consume a lot of computational resources. Therefore, the purpose of this research is to study the optimum bands combination which can be extracted by multispectral image. Manas's riverside in Shihezi, Xinjiang was selected as research area. Fixed-wing UAV equipped with Micro MCA12 Snap was used to obtain high-resolution multispectral images. Based on this system, a method was proposed to select the optimum bands combination for topographical objects classification. First, the standard deviation and correlation coefficient of the multi-spectral image's gray value were analyzed; the original bands combinations were got with the OIF method. Then, the most informative spectral feature bands and texture feature bands were determined respectively by using variety methods, such as vegetation and water index, principal component analysis, and GLCM. Finally, the original bands combination, spectral feature bands and texture feature bands were combined to obtain the final result. According to the analysis, bands 1,6,11, NDVI, NDWI and the mean parameter of GLCM combination of Micro MCA12 Snap multi-spectral sensors were selected as the optimum bands combination for topographical objects classification. After the selection of the bands combination,

收稿日期: 2015-12-05 修回日期: 2015-12-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(31260291)和新疆生产建设兵团科技计划项目(2015BA006)

作者简介: 赵庆展(1972—),男,副教授,主要从事农业信息化、空间信息系统集成与服务研究,E-mail: zqz_inf@shzu.edu.cn

unsupervised classification and supervised classification methods were used to verify the classification accuracy with the optimum bands combination respectively. The classification accuracy with IsoData of ROI (region of interest) was increased from 83.57% to 89.80%, when it comes to SVM, the accuracy was increased from 95.58% to 99.76%. In addition, the study also provides effective reference for the selection of optimum bands combination with UAV multispectral images.

Key words: unmanned aerial vehicle; multi-spectral sensors; optimum bands combination; spectral feature; texture feature

引言

随着无人机(Unmanned aerial vehicle, UAV)技术和轻型多光谱相机的发展,基于无人机的低空多光谱遥感越来越被人们所关注。以无人机为飞行平台的遥感系统^[1]具有起降灵活、低空飞行、低成本、易维护^[2-3]的特点,可获得高空间分辨率、高光谱分辨率及高时间分辨率的多光谱影像^[4-5]。无人机遥感的先天性优势也使得其在国土测绘^[6-7]、环境灾害^[8-9]、农情监测^[10-15]等方面得到广泛应用。

针对高空间分辨率及光谱分辨率的遥感影像分类一直是影像信息提取的重要步骤,也是研究热点之一。高精度的影像分类对植被覆盖度反演、地物识别、农田灾害监测等具有重要意义。由于光谱分辨率的提高,多光谱相机相邻波段之间的相关性也大大增加,因此多个波段之间就会有大量的信息冗余,这种冗余一方面增加了数据处理复杂度,另一方面消耗了大量的计算资源。因此在实际应用过程中通常采用最佳波段组合的方法对获得的数据进行降维预处理^[16-18]后再进行分析。刘春红等^[19]提出了自适应波段选择(ABS)的降维方法,充分考虑了高光谱图像的空间相关性和谱间相关性,通过计算各个波段的指数来选择信息量大并且与其他波段相关性小的波段。谭玉敏等^[20]使用子空间划分、波段指数选择以及 J-M 距离判别 3 种数据降维方法获得了最佳波段组合。张磊等^[21]提出了利用稳定系数进行波段初选择,根据相关系数选择波段组合生成新影像,并对新影像进行最佳指数因子(OIF)计算,得到 OIF 值最大的波段组合为最佳波段组合。姜小光等^[22]在综合考虑各波段的信息含量、波段间的相关性、波段的可分性以及地物光谱吸收特性等因素的基础上,提出了面向对象的选择成像光谱数据最佳波段的基本思路和方法。

综上所述,多光谱最佳波段的选择研究已有了很大的进展,也提出了很多新的方法和理论。但是以上方法均通过各种波段指数来进行最佳波段组合的选择,而未对高分辨率影像的纹理信息进行提取,造成了有效信息的丢失。本文通过计算最佳波段指

数以确定原始多光谱相机波段的最佳波段组合,再利用低空无人机多光谱遥感影像的特点获取纹理信息的特征量与光谱信息的指数特征量,将 3 组信息结合并选择出最佳波段组合(Optimal bands combination, OBC)。

1 研究区域数据获取及预处理

1.1 无人机平台

本研究所使用的无人机平台为背推式油动固定翼无人机(远征 6 系列),该无人机翼展 6 m,机身长 3.2 m,机身高度 0.9 m,有效载荷 20 kg,起飞质量 90 kg,巡航速度 90~150 km/h,续航时间 4 h,最大航程 600 km,升限海拔 5 000 m,抗风能力 5 级。配合加拿大的 MicroPilot 飞行控制器,可通过地面控制站预先编写程序使无人机按照预定航线进行自主飞行。

1.2 多光谱传感器

美国 Tetracam 公司生产的 Micro MCA12 Snap 多光谱相机具有质量轻、体积小及远程触发的特点,适合在中小型无人机上进行搭载。每个波段配备 1.3 兆像素 CMOS 传感器(6.18 mm×4.95 mm),图像分辨率为 1 280 像素×1 024 像素,光圈 F 3.2,焦距 9.6 mm,质量 1.3 kg,快门速度可调(1~3 s),可进行 12 波段(可自由选配)影像数据获取。表 1 为其获取波段的波长及波段特征,前 5 个波段位于可见光区域,波段 6、7 位于植被反射光谱曲线的红边区域,最后的 5 个波段位于近红外区域。其中波段 8、5、3、1 分别近似 TM 影像的 4、3、2、1 波段,可进行相应指数的计算。

1.3 数据获取及预处理

实验以玛纳斯河畔为研究区,数据获取目标区域长 8 km,宽 1 km,航高 500 m,巡航速度 120 km/h,共 8 条航线,航向重叠率为 83%,旁向重叠率为 54%,满足后期影像处理需求。使用 Pix4D Mapper 软件进行无人机影像的拼接处理^[23]。处理过程中首先进行自动空三加密后再通过相应的地面控制点数据进行 3 阶多项式模型对影像校正,最终输出数字正射影像(Digital orthophoto map, DOM),对得到

表 1 Micro MCA12 Snap 传感器波长及波段特征

Tab.1 Wavelength and band features of Micro MCA12 Snap			
波段	波长/nm	波宽/nm	波段特征
1	470	10	区分植被和土壤岩石表层
2	515	10	可见光光谱中的绿波波段
3	550	10	对水质浊度变化敏感
4	610	10	植被光谱反射曲线中红光初始波段
5	656	10	重新归一化植被指数
6	710	10	植被光谱反射曲线的初始上坡位置
7	760	10	植被光谱反射曲线的近红外初始波段
8	800	10	归一化植被指数、重新归一化植被指数
9	830	10	区别植被种类
10	860	10	与植物总叶绿素含量显著相关
11	900	20	计算特定作物水分敏感指数
12	950	40	计算水波段指数

的影像再利用 ENVI 软件对其进行几何校正。预处理结束后最终选取玛纳斯河畔附近地物类别明显约 0.123 km² 的 2 块对照区域(地面分辨率为 0.226 m)进行最佳波段组合的研究,研究区地物大致可分为:耕地、林地、水体、砂石、裸地及建筑物 6 类,如图 1 所示。图 2 为无人机遥感系统最佳波段组合选择的技术流程图。

2 最佳波段选择

最佳波段选择应满足波段信息量越大越好、波段间相关性越小越好、地物对所选取的波段组合具有较大的光谱差异 3 个基本条件。

2.1 原始波段组合选择

以区域 A 为例,首先对特征影像进行统计分析,得到各波段像元的灰度标准差及波段间的相关

性系数。其中标准差代表了像元灰度的离散程度。标准差越大,表示灰度与均值差越大,所能反映的图像信息量越多;标准差越小,反映的图像信息量越小。波段间相关性系数代表了 2 个波段之间数据的重叠度,相关性越大,表示数据重叠度越高,冗余信息越多;相关性越小,表示数据重叠度越低,冗余信息越少^[22,24]。灰度标准差及波段间相关系数计算公式分别为

$$S_i = \sqrt{\frac{\sum_{p=1}^n (X_p - \bar{X}_i)^2}{n}}$$
 (1)

$$R_{ij} = \frac{\sum_{p=1}^n (X_{ip} - \bar{X}_i)(X_{jp} - \bar{X}_j)}{\sqrt{\sum_{p=1}^n (X_{ip} - \bar{X}_i)^2} \sqrt{\sum_{p=1}^n (X_{jp} - \bar{X}_j)^2}}$$
 (2)

式中 n ——像元总个数 p ——像元序号
 X_p —— p 像元灰度
 $\bar{X}_i$ ——波段 i 灰度平均值
 $\bar{X}_j$ ——波段 j 灰度平均值
 X_{ip} ——波段 i 中第 p 像元灰度
 X_{jp} ——波段 j 中第 p 像元灰度

对研究区域进行统计分析,得到波段 1~12 的标准差分别为 44.79、31.24、34.39、42.61、37.85、29.27、36.67、33.71、24.04、23.70、31.07、17.97。各波段标准差从可见光到近红外区域整体呈逐渐降低的趋势,但部分波段有回升,并且第 1、4、7、11 波段是明显的 4 个峰值。标准差从大到小依次为 1、4、5、7、3、8、2、11、6、9、10、12。

通过计算得到波段间相关系数矩阵如表 2 所示。由表 2 可看出,根据相关系数可将波段分为 2 组,

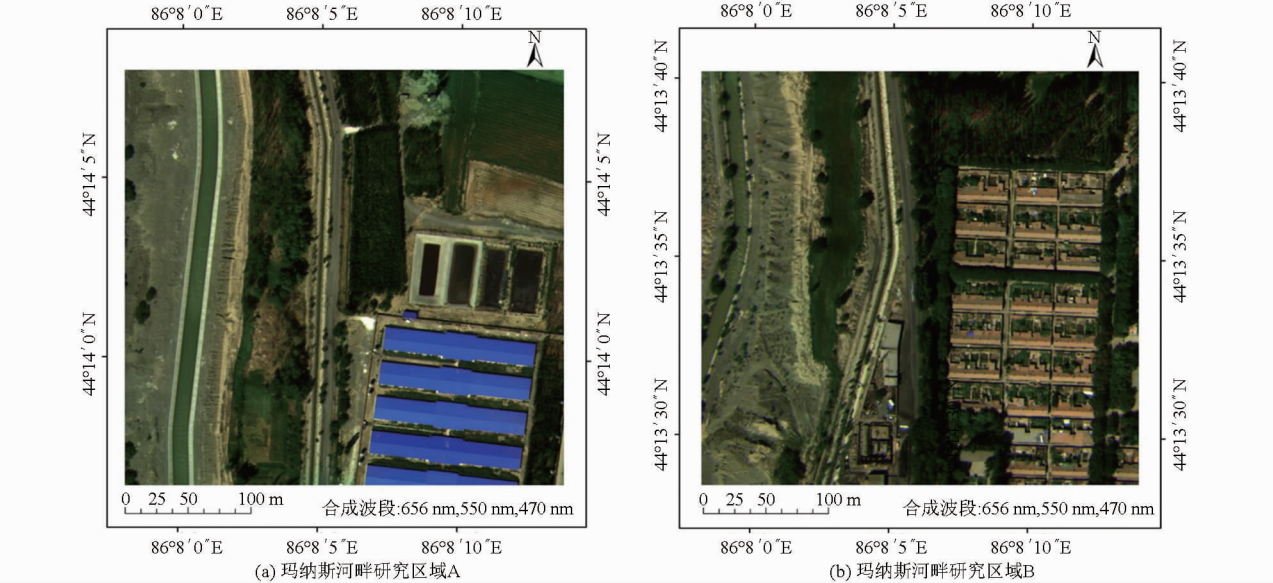


图 1 研究区域 A、B

Fig.1 Research areas A and B

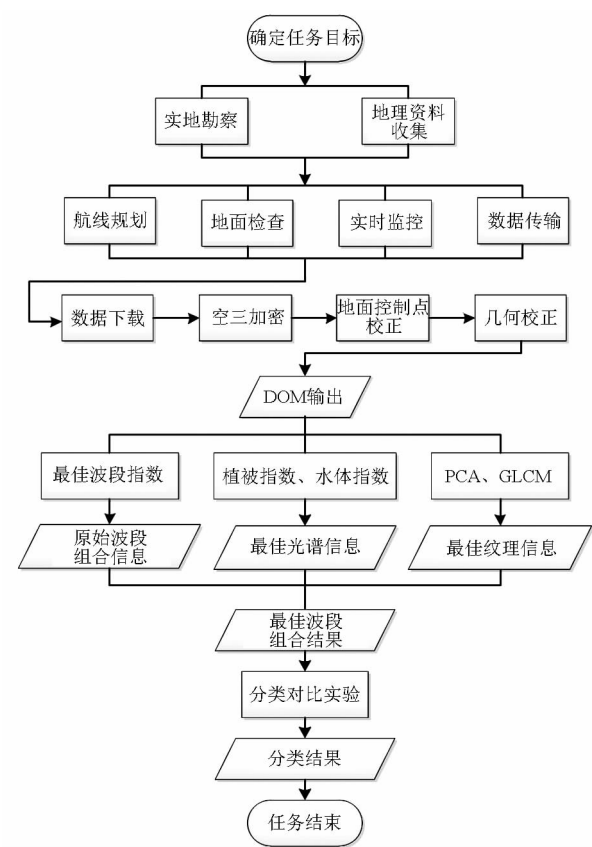


图 2 无人机遥感系统最佳波段组合选择技术流程图

Fig. 2 Best band combination selection process technology of UAV system

其中第 1 组波段 1~6 为可见光区域,波段之间相关系数均值较低,数值分布为 0.35~0.48。相关系数均值从小到大依次为 1、6、2、3、5、4;第 2 组波段 7~12 为近红外区域,波段之间相关性系数均值较高,数值分布为 0.44~0.52。相关性系数均值从小到大依次为 12、10、11、7、9、8;这 2 组波段间的相关性系数均低于 2 组波段内部之间的相关性系数,除了第 6 波段与第 2 组波段之间相关性系数均值呈正相关为 0.23,其他波段与第 2 组波段间均呈负相关

关系。

最佳指数因子^[24-25] (Optimum index factor, OIF)是基于波段信息量标准差及波段间相关性系数提出的并且能反映波段组合信息质量的方法,计算公式为

$$R_{OIF} = \frac{S_1 + S_2 + S_3}{R_{12} + R_{13} + R_{23}} \quad (3)$$

式中 S_1 、 S_2 、 S_3 为 12 个波段中任意 3 个波段的标准差, R_{12} 、 R_{13} 、 R_{23} 为任意选择的 3 个波段间相关性系数。

选择 3 个波段组合并计算其 OIF 值,OIF 值越大,波段标准差越小,波段间相关性系数越小,说明波段组合数据质量最优。针对多光谱相机的 12 个波段,共产生 220 个 3 波段组合,采用 C++ 编程计算其 OIF 值,数值前 10 位的组合如表 3 所示。

由表 3 可看出,OIF 值排序第一的波段组合 1、6、12 中,1、6 波段的标准差较大,12 波段标准差却最小,反而排序第二的 11 波段标准差较大。而 1、6 波段正好与 12、11、10 波段分别处于相关性小的 2 组波段中,且 1、6 波段与 12、11、10 波段分别是各自波段组合中相关性最小的波段。综合考虑以上信息,初步选择 1、6、12,1、6、11 和 1、6、10 波段组合进行后续对照实验。

2.2 影像特征信息选择

遥感影像的特征变量是影像分类和识别过程中的主要依据。影像的各个波段灰度是其基本特征变量,通过波段运算或 K-L 变换、K-T 变换等即可得到新的特征变量。针对 Micro MCA12 Snap 多光谱相机所具有的波段和高分辨率特征,分别提取影像的光谱特征变量和纹理特征变量。再利用标准差进行特征信息的选择,达到既能降低数据处理复杂度,又能提高地物分类精度的目的。

目前遥感领域提出的各种指数多达数百种,针

表 2 研究区域 A 12 波段间相关系数

Tab. 2 Correlation coefficients between 12 bands in research area A

波段	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1.00											
2	0.89	1.00										
3	0.54	0.79	1.00									
4	0.40	0.67	0.96	1.00								
5	0.43	0.69	0.94	0.97	1.00							
6	0.09	0.39	0.78	0.84	0.82	1.00						
7	-0.46	-0.36	-0.06	-0.04	-0.06	0.42	1.00					
8	-0.24	-0.22	-0.10	-0.13	-0.12	0.30	0.86	1.00				
9	-0.10	-0.15	-0.10	-0.15	-0.14	0.24	0.83	0.91	1.00			
10	-0.07	-0.14	-0.15	-0.19	-0.18	0.16	0.74	0.78	0.88	1.00		
11	-0.01	-0.10	-0.12	-0.19	-0.17	0.18	0.75	0.87	0.97	0.88	1.00	
12	0.02	-0.08	-0.19	-0.25	-0.21	0.07	0.55	0.71	0.75	0.72	0.78	1.00
均值	0.35	0.46	0.48	0.48	0.48	0.44	0.51	0.52	0.52	0.49	0.50	0.44

表 3 研究区域 A OIF 值前 10 位的波段组合
Tab.3 Top 10 band combination of OIF value
in research area A

序号	波段组合	OIF
1	1、6、12	549.566 3
2	1、6、11	382.272 4
3	1、6、10	315.197 9
4	1、6、9	225.673 3
5	1、4、11	199.815 3
6	1、5、11	189.742 4
7	1、6、8	172.770 7
8	1、4、9	169.864 2
9	1、4、10	169.138 6
10	1、3、11	165.015 7

对研究区域地物种类及多光谱相机可选波段,本研究选择计算植被敏感相关指数及水体敏感相关指数,分别为归一化植被指数(NDVI)、红边归一化植被指数(NDVI₇₁₀)、比值植被指数(RVI)以及归一化差分水体指数(NDWI)、水波段指数(WBI)。进行指数计算之后对 RVI 及 WBI 进行数据归一化并统计其标准差。计算公式及结果如表 4 所示。

表 4 研究区域光谱特征信息计算
Tab.4 Information calculation of spectral characteristics
in research area

指数名称	计算公式	标准差
归一化植被指数	$R_{NDVI} = \frac{\rho_{800} - \rho_{656}}{\rho_{800} + \rho_{656}}$	0.373 9
红边归一化植被指数	$R_{NDVI710} = \frac{\rho_{760} - \rho_{710}}{\rho_{760} + \rho_{710}}$	0.222 1
比值植被指数	$R_{RVI} = \frac{\rho_{800}}{\rho_{656}}$	0.039 2
归一化差分水体指数	$R_{NDWI} = \frac{\rho_{550} - \rho_{950}}{\rho_{550} + \rho_{950}}$	0.324 6
水波段指数	$R_{WBI} = \frac{\rho_{900}}{\rho_{950}}$	0.006 5

注:ρ₈₀₀表示波长 800 nm 处的反射率。

针对植被指数,其标准差由大到小排列依次为 NDVI、NDVI₇₁₀、RVI,水体指数标准差由大到小依次排列为 NDWI、WBI。故选取 NDVI 和 NDWI 作为最终光谱特征信息。

随着多光谱影像分辨率的逐渐提高,地物纹理信息与光谱信息一样非常重要,可尽量避免光谱信息识别过程中可能存在的“同物异谱”和“异物同谱”现象,从而提高分类识别精度。实验首先采用协方差矩阵作为变换矩阵进行主成分变换(Principal component analysis,PCA)获得多组图像序列并按照信息量从大到小排列,然后利用第 1 主成分(包含了图像信息的 85.5%)获得影像的灰度共

生矩阵(Gray level co-occurrence matrix, GLCM)的 8 个主要参量(均值、方差、同源性、对比度、相异度、熵、二阶距、相关性),对信息量进行统计的结果分别为 9.375 0、2.657 2、0.223 6、4.505 4、0.844 5、0.560 8、0.231 5、0.420 7,因此选取均值为最终纹理特征信息。

综上多光谱影像原始波段的选择以及影像特征信息的选择,得到针对 Micro MCA12 Snap 多光谱相机的初步波段组合分别为 1、6、10、NDVI、NDWI、均值(Mean)、1、6、11、NDVI、NDWI、Mean 和 1、6、12、NDVI、NDWI、Mean。

3 实验及结果分析

通过以上分析得到空-谱信息与 OIF 指数相结合的 3 组波段组合,对研究区域 A、B 分别设计 8 组(共 16 组)实验,对同一研究区域分别使用 3 组波段组合和原始 12 波段进行非监督的 IsoData (Iterative selforganizing data analysis)分类及监督的支持向量机(Support vector mchine,SVM)分类。其中 SVM 分类时采用 Radial Basis Function 构建分类器,且模型参数 γ=0.083,惩罚系数 C=100。最后以总体分类精度和 Kappa 系数作为评价分类效果的指标。所有实验组合分类结果的精度评价如表 5 所示。其中研究区域 A、B 以 1、6、11、NDVI、NDWI、Mean 为最佳波段组合的分类结果,如图 3 所示。

针对不同波段组合:以 A 区域为例说明,原始波段进行 SVM 分类的总体分类精度为 95.58%,Kappa 系数 0.954 7。而 3 种波段组合 SVM 分类总体精度分别为 99.07%、99.76%、99.65%,Kappa 系数分别为 0.981 6、0.995 6、0.987 8,各组实验对比原始波段的分类精度均得到了提升。SVM 分类实验的总体分类精度由大到小排序为:1、6、11、NDVI、NDWI、Mean,1、6、12、NDVI、NDWI、Mean,1、6、10、NDVI、NDWI、Mean,原始波段组合。B 区域反映出一致结果。

针对不同研究区域:对比研究区域 A、B 来看,使用 3 种波段组合和原始波段组合的 IsoData 和 SVM 分类总体精度和 Kappa 系数由大到小均为:1、6、11、NDVI、NDWI、Mean,1、6、12、NDVI、NDWI、Mean,1、6、10、NDVI、NDWI、Mean,原始波段组合,其中 IsoData 分类时的总体精度分别为 A:86.94%、89.80%、88.72%、83.57%;B:86.24%、88.48%、87.36%、84.37%。SVM 分类 3 种波段组合的总体精度分别为 A:99.07%、99.76%、99.65%、95.58%;B:99.27%、99.57%、99.46%、95.27%。

针对不同分类方法:以 A 区域为例说明,SVM

表 5 研究区域 A、B 各组分类结果精度

Tab.5 Classification accuracy comparison between research areas A and B

区域	最佳波段组合				原始波段组合		
	波段选择	指标	IsoData	SVM	指标	IsoData	SVM
A	1、6、10、NDVI、NDWI、Mean	总体精度/%	86.94	99.07			
		Kappa 系数	0.849 7	0.981 6			
	1、6、11、NDVI、NDWI、Mean	总体精度/%	89.80	99.76	总体精度/%	83.57	95.58
		Kappa 系数	0.868 5	0.995 6			
	1、6、12、NDVI、NDWI、Mean	总体精度/%	88.72	99.65	Kappa 系数	0.832 5	0.954 7
		Kappa 系数	0.857 2	0.987 8			
B	1、6、10、NDVI、NDWI、Mean	总体精度/%	86.24	99.27			
		Kappa 系数	0.842 5	0.980 4			
	1、6、11、NDVI、NDWI、Mean	总体精度/%	88.48	99.57	总体精度/%	84.37	95.27
		Kappa 系数	0.861 5	0.994 7			
	1、6、12、NDVI、NDWI、Mean	总体精度/%	87.36	99.46	Kappa 系数	0.843 6	0.962 3
		Kappa 系数	0.853 2	0.984 1			

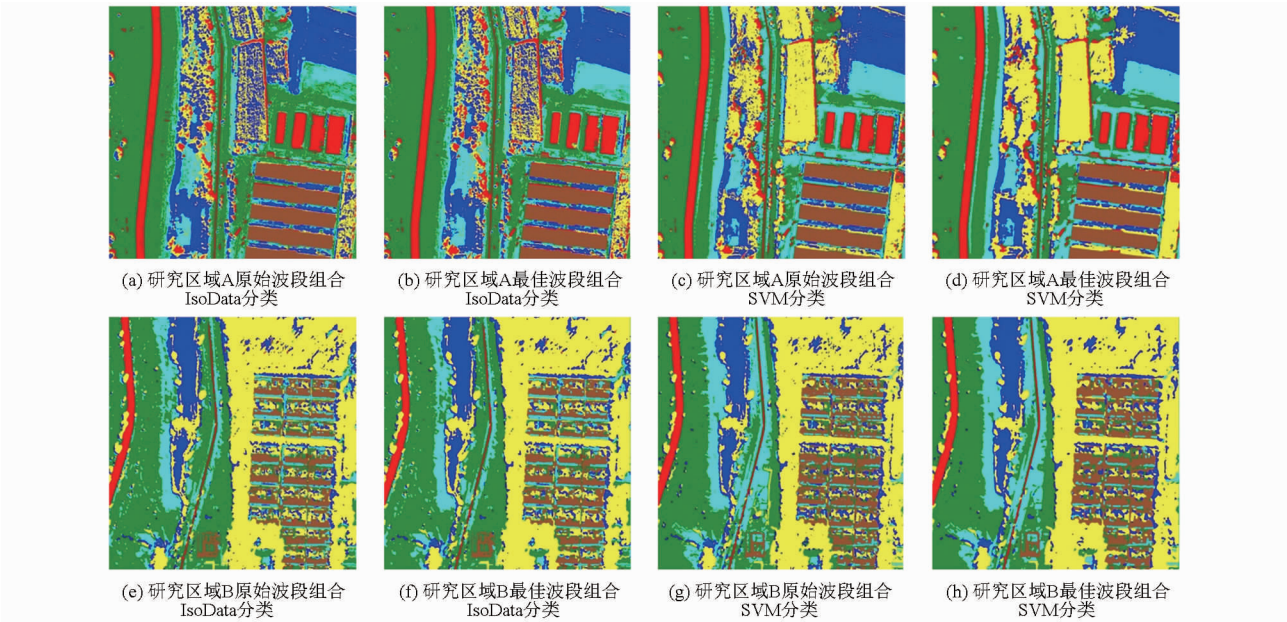


图 3 研究区域 A、B 分类结果 (1、6、11、NDVI、NDWI、Mean)

Fig. 3 Classification results of research areas A and B (1、6、11、NDVI、NDWI、Mean)

分类与 IsoData 分类结果总体精度由大到小均为 1、6、11、NDVI、NDWI、Mean, 1、6、12、NDVI、NDWI、Mean, 1、6、10、NDVI、NDWI、Mean, 原始波段组合。其中 SVM 分类方法的以上 3 种组合及原始波段组合分类精度分别为 99.76%、99.65%、99.07%、95.58% ;IsoData 分类方法的以上 3 种组合及原始波段组合分类精度分别为 89.80%、88.72%、86.94%、83.57%。B 区域反映出一致结果。

4 结论

(1)针对本研究区, Micro MCA12 Snap 多光谱数据的标准差从可见光到近红外区域整体呈逐渐降低的趋势,但部分波段有升高,同时表明从可见光到近红外波段所含信息量呈降低趋势,其中 1 波段信

息量最大,12 波段信息量最小,波段 1、4、7、11 信息量有较明显的峰值。

(2)由 Micro MCA12 Snap 多光谱相机在本研究区中所获取的数据基本可分为 2 个组,第 1 组波段 1~6 为可见光区域,波段间相关性较低,信息重叠度较低、冗余度小;第 2 组波段 7~12 为近红外区域,波段间相关性较高,信息重叠度较高、冗余度大。

(3)简单的 OIF 指数计算无法得到质量最优的波段组合数据,针对基于无人机搭载 Micro MCA12 Snap 的数据特点提取出影像光谱特征信息和纹理特征信息,与 OIF 选择的波段组合相结合确定最佳波段组合是一种有效方法。

(4)通过设计的对比实验看出,不论是不同实验区域、不同分类方法还是不同波段组合,根据以上

方法确定的波段组合进行分类所得到的分类精度均高于原始波段组合的分类精度。针对 Micro MCA12 Snap,其中 1、6、11、NDVI、NDWI、Mean 组合的分类精度要比其他波段组合都高,为最优的分类波段组合。同时也间接说明 OIF 指数最大的组合与分类精度最高组合之间不是严格的对应关系。

参 考 文 献

1 史舟,梁宗正,杨媛媛,等. 农业遥感研究现状与展望[J]. 农业机械学报,2015,46(2):247-260.
SHI Zhou, LIANG Zongzheng, YANG Yuanyuan, et al. Status and prospect of agricultural remote sensing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 247-260. (in Chinese)

2 汪沛,罗锡文,周志艳,等. 基于微小型无人机的遥感信息获取关键技术综述[J]. 农业工程学报,2014,30(18):1-12.
WANG Pei, LUO Xiwen, ZHOU Zhiyan, et al. Key technology for remote sensing information acquisition based on micro UAV[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(18): 1-12. (in Chinese)

3 田振坤,傅莺莺,刘素红,等. 基于无人机低空遥感的农作物快速分类方法[J]. 农业工程学报,2013,29(7):109-116,295.
TIAN Zhenkun, FU Yingying, LIU Suhong, et al. Rapid crops classification based on UAV low-altitude remote sensing[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(7): 109-116, 295. (in Chinese)

4 王利民,刘佳,杨玲波,等. 基于无人机影像的农情遥感监测应用[J]. 农业工程学报,2013,29(18):136-145.
WANG Limin, LIU Jia, YANG Lingbo, et al. Applications of unmanned aerial vehicle images on agricultural remote sensing monitoring[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(18): 136-145. (in Chinese)

5 王青山. 简述无人机在遥感技术中的应用[J]. 测绘与空间地理信息,2010,33(3):100-101,104.
WANG Qingshan. UAV applications in remote sensing technology[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2010, 33(3): 100-101,104. (in Chinese)

6 王洛飞. 无人机低空摄影测量在城市测绘保障中的应用前景[J]. 测绘与空间地理信息,2014,37(2):217-219,222.
WANG Luofei. Unmanned aerial system applications and prospects in the urban survey and mapping[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2014, 37(2): 217-219,222. (in Chinese)

7 毕凯,李英成,丁晓波,等. 轻小型无人机航摄技术现状及发展趋势[J]. 测绘通报,2015(3):27-31,48.
BI Kai, LI Yingcheng, DING Xiaobo, et al. Aerial photogrammetric technology of light small UAV; status and trend of development[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2015(3): 27-31,48. (in Chinese)

8 雷添杰,李长春,何孝莹. 无人机航空遥感系统在灾害应急救援中的应用[J]. 自然灾害学报,2011,20(1):178-183.
LEI Tianjie, LI Changchun, HE Xiaoying. Application of aerial remote sensing of pilotless aircraft to disaster emergency rescue[J]. Journal of Natural Disasters, 2011, 20(1): 178-183. (in Chinese)

9 韩文权,任幼蓉,赵少华. 无人机遥感在应对地质灾害中的主要应用[J]. 地理空间信息,2011,9(5):6-8,163.
FENG Jiali, LIU Kai, ZHU Yuanhui, et al. Application of unmanned aerial vehicles to mangrove resources monitoring[J]. Tropical Geography, 2015, 35(1): 35-42. (in Chinese)

10 冯家莉,刘凯,朱远辉,等. 无人机遥感在红树林资源调查中的应用[J]. 热带地理,2015,35(1):35-42.
FENG Jiali, LIU Kai, ZHU Yuanhui, et al. Application of unmanned aerial vehicles to mangrove resources monitoring[J]. Tropical Geography, 2015, 35(1): 35-42. (in Chinese)

11 何诚,张思玉,姚树人. 旋翼无人机电林火点定位技术研究[J]. 测绘通报,2014(12):24-27.
HE Cheng, ZHANG Siyu, YAO Shuren. Forest fires locating technology based on rotor UAV[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2014(12): 24-27. (in Chinese)

12 HERWITZ S, JOHNSON L, DUNAGAN S, et al. Imaging from an unmanned aerial vehicle: agricultural surveillance and decision support[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2004, 44(1): 49-61.

13 RANGO A, LALIBERTE A, HERRICK J E, et al. Unmanned aerial vehicle-based remote sensing for rangeland assessment, monitoring, and management[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2009, 3(1): 033542.

14 LALIBERTE A S, GOFORTH M A, STEELE C M, et al. Multispectral remote sensing from unmanned aircraft: image processing workflows and applications for rangeland environments[J]. Remote Sensing, 2011, 3(11): 2529-2551.

15 刘峰,刘素红,向阳. 园地植被覆盖度的无人机遥感监测研究[J]. 农业机械学报,2014,45(11):250-257.
LIU Feng, LIU Suhong, XIANG Yang. Study on monitoring fractional vegetation cover of garden plots by unmanned aerial vehicles[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 250-257. (in Chinese)

16 IFARRAGUERRI A, PRAIRIE M W. Visual method for spectral band selection[J]. Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE, 2004, 1(2): 101-106.

17 刘雪松,葛亮,王斌,等. 基于最大信息量的高光谱遥感图像无监督波段选择方法[J]. 红外与毫米波学报,2012,31(2):166-170,176.
LIU Xuesong, GE Liang, WANG Bin, et al. An unsupervised band selection algorithm for hyperspectral imagery based on maximal information[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2012, 31(2): 166-170,176. (in Chinese)

18 WANG L, GU Y, ZHANG Y. Band selection method based on combination of support vector machines and subsatial partition[J]. Systems Engineering and Electronics, 2005, 27(6): 974-977.

technology [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(Supp.1): 212 – 220. (in Chinese)

12 CHEN M J, LI J, DAI X, et al. Effect of phosphorus and temperature on chlorophylla contents and cell sizes of *scenedesmus obliquus* and *microcystis aeruginosa* [J]. Journal of Limnology, 2011, 12(2): 187 – 192.

13 BOWN H E, MASON E G, CLINTON P W, et al. Chlorophyll fluorescence response of *Pinus radiata* clones to nitrogen and phosphorus supply[J]. Ciencia E Investigacion Agraria, 2009, 4(3): 451 – 464.

14 MARCHIVE C, YEHANDAI-RESHEFF S, GERMAIN A, et al. Abnormal physiological and molecular mutant phenotypes link chloroplast polynucleotide phosphorylase to the phosphorus deprivation response in *Arabidopsis* [J]. Plant Physiology, 2009,151(10): 905 – 924.

15 CAI H G, CHU Q, YUAN L X, et al. Identification of quantitative trait loci for leaf area and chlorophyll content in maize (*Zea mays*) under low nitrogen and low phosphorus supply [J]. Molecular Breeding, 2012, 30(1): 251 – 266.

16 王磊,白由路. 基于光谱理论的作物营养诊断研究进展[J]. 植物营养与肥料学报,2006,12(6): 902 – 912.

WANG Lei, BAI Youlu. Research advance on plant nutrition diagnosis based on spectral theory [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006,12(6): 902 – 912. (in Chinese)

17 余文贵,赵统敏. 番茄栽培新技术[M]. 福州:福建科学技术出版社, 2010.

18 刘伟,刘长虹,郑磊. 基于支持向量机的多光谱成像稻谷品种鉴别[J]. 农业工程学报,2014,30(10):145 – 151.

LIU Wei, LIU Changhong, ZHENG Lei. Discrimination in varieties of rice seeds with multispectral imaging using support vector machine [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(10): 145 – 151. (in Chinese)

19 IWASAKI N, YASUDA K, UENO G. Dynamic parameter tuning of particle swarm optimization [J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2006, 1(4):353 – 363.

20 GUDISE V G, VENAYAGAMOORTHY G K. Comparison of particle swarm optimization and backpropagation as training algorithms for neural networks[C]//Proceedings of the 2003 IEEE, Swarm Intelligence Symposium, 2003: 110 – 117.

21 PENG X, VENAYAGAMOORTHY G K, CORZINE K A. Combined training of recurrent neural networks with particle swarm optimization and backpropagation algorithms for impedance identification[C]//Proceedings of the 2007 IEEE, Swarm Intelligence Symposium, 2007:9 – 15.

(上接第 248 页)

19 刘春红,赵春晖,张凌雁. 一种新的高光谱遥感图像降维方法[J]. 中国图象图形学报,2005,10(2):218 – 222.

LIU Chunhong, ZHAO Chunhui, ZHANG Lingyan. A new method of hyperspectral remote sensing image dimensional reduction [J]. Journal of Image and Graphics, 2005, 10(2): 218 – 222. (in Chinese)

20 谭玉敏,夏玮. 基于最佳波段组合的高光谱遥感影像分类[J]. 测绘与空间地理信息,2014,37(4):19 – 22.

TAN Yumin, XIA Wei. Optimum band combination based hyperspectral remote sensing image classification[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2014, 37(4): 19 – 22. (in Chinese)

21 张磊,邵振峰. 改进的 OIF 和 SVM 结合的高光谱遥感影像分类[J]. 测绘科学,2014,39(11):114 – 117,66.

ZHANG Lei, SHAO Zhenfeng. Hyperspectral remote sensing image classification based on improved OIF and SVM algorithm[J]. Science of Surveying and Mapping, 2014, 39(11): 114 – 117, 66. (in Chinese)

22 姜小光,王长耀,王成. 成像光谱数据的光谱信息特点及最佳波段选择——以北京顺义区为例[J]. 干旱区地理,2000, 23(3):214 – 220.

JIANG Xiaoguang, WANG Changyao, WANG Cheng. Optimum band selection of hyperspectral remote sensing data[J]. Arid Land Geography, 2000, 23(3): 214 – 220. (in Chinese)

23 董梅,苏建东,杨举田,等. 大区域无人机影像快速无缝拼接方法[J]. 测绘科学,2014,39(11):129 – 132.

DONG Mei, SU Jiandong, YANG Jutian, et al. A fast seamless image mosaic method for UAV images in large areas[J]. Science of Surveying and Mapping, 2014, 39(11): 129 – 132. (in Chinese)

24 马娜,胡云锋,庄大方,等. 基于最佳波段指数和 J – M 距离可分性的高光谱数据最佳波段组合选取研究——以环境小卫星高光谱数据在东莞市的应用为例[J]. 遥感技术与应用,2010,25(3):358 – 365.

MA Na, HU Yunfeng, ZHUANG Dafang, et al. Determination on the optimum band combination of HJ – 1A hyperspectral data in the case region of Dongguan based on optimum index factor and J – M distance[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2010, 25(3): 358 – 365. (in Chinese)

25 李石华,王金亮,陈姚,等. 多光谱遥感数据最佳波段选择方法实验研究[J]. 云南地理环境研究,2005,17(6):31 – 35.

LI Shihua, WANG Jinliang, CHEN Yao, et al. Experimental studies about methods on optimal bands selection of multispectrum remote sensing datasets[J]. Yunnan Geographic Environment Research,2005,17(6):31 – 35. (in Chinese)