

引用格式: Zhu Zhongzheng, Chen Yufu, Zhu Wenquan, *et al.* Selection of Optimum Thematic Indices Applied to the Multi-objective and Automatic Remote Sensing Interpretation[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2017, 32(3): 564-574. [朱钟正, 陈玉福, 朱文泉, 等. 适用于多目标遥感自动解译的最佳专题指数筛选[J]. 遥感技术与应用, 2017, 32(3): 564-574.]
doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2017.3.0564

适用于多目标遥感自动解译的最佳专题指数筛选

朱钟正^{1,2}, 陈玉福³, 朱文泉^{1,2}, 郑周涛^{1,2}

(1. 北京师范大学 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;

2. 北京师范大学 地理科学学部, 北京 100875;

3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 专题指数对遥感影像自动解译至关重要, 现有研究多针对单目标信息提取来筛选专题指数, 无法得到适用于多目标遥感自动解译的最佳专题指数。以德州市城区及周边地区为例, 采用 Landsat 5 TM 影像提取了 2 个植被、3 个水体和 3 个建筑用地专题指数, 基于面向对象分类方法, 分析了单个专题指数、指数组合、指数数量对同时提取植被、水体和不透水层信息的精度影响。结果表明: ① 3 类地物的最小分类精度基本上随着专题指数增加而增大; ② 从单个专题指数来看, 不透水层和植被提取的最佳指数分别是建筑物指数和土壤调整植被指数, 而新型水体指数则能显著提高总体分类精度; ③ 从专题指数的组合来看, 植被分类精度随所用的植被指数数量增加而下降; 建筑用地指数越多, 不透水层和总体分类效果越好; 随着水体指数数量增加, 水体分类精度有所提高, 而不透水层和总体分类精度则随之下降。

关键词: 植被指数; 水体指数; 建筑用地指数; 面向对象分类; 指数数量; 指数组合

中图分类号: TP 753 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2017)03-0564-11

1 引言

目前, 在遥感影像的地物信息提取领域, 专题指数得到了广泛应用, 相对于使用源数据, 它能降低分类特征维数, 减少数据冗余, 并能快速准确地提取单目标信息^[1]。为了进一步增大地物间光谱差异性, 提高解译精度, 现在常用多类指数的组合来提取单目标信息^[2-15]。但是在提取目标信息时, 不同指数对同一地物^[16-22]、相同指数对不同地物都有不同影响^[23-24]。因此非常有必要研究多类指数及其组合对多目标信息的解译效果, 从而得到各种地物和总体的最佳单个或组合指数, 实现多目标信息快速精准地提取。

现有的专题指数主要有植被指数、水体指数和建筑用地指数三大类。常用的植被指数有归一化差值植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、土壤调整植被指数(Soil Adjusted Vegetation Index, SAVI)、绿度植被指数(Green Vegetation Index, GVI)和垂直植被指数(Perpendicular Vegetation Index, PVI)等^[25]。在解译植被时, Stella 等^[26]发现 GVI 比 NDVI 受土壤湿度和类型因素的影响较小, 而当土壤调节系数 L 取 0.5 到 1 之间时, 相比受土壤背景影响较大的 NDVI 和 PVI, SAVI 的植被解译效果较好^[27]。另外, 雷婉宁等^[28]根据结构化植被因子指数的概念, 用绿度与黄度植被指数相结合的方法克服了单一指数在描述植

收稿日期: 2016-01-25; 修订日期: 2017-03-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371186)。

作者简介: 朱钟正(1989—), 男, 湖南洪江人, 硕士研究生, 主要从事自然资源遥感应用方面的研究。E-mail: zhucyclone@163.com。

通讯作者: 朱文泉(1975—), 男, 湖南永兴人, 教授、博士生导师, 主要从事植被与生态遥感研究。E-mail: zhuwq75@bnu.edu.cn。

被控制水土流失中的不足。

常用的水体指数有归一化差值水体指数^[29] (Normalized Difference Water Index, NDWI)、改进的归一化差值水体指数 (Modified Normalized Difference Water Index, MNDWI) 和新型水体指数 (New Water Index, NWI) 等。与 NDWI 相比,徐涵秋^[30]提出的 MNDWI 对提取城镇范围内的水体有着更好的效果。而闫需等^[31]提出的增强型水体指数 (Enhanced Water Index, EWI) 则能有效地区分半干旱地区半干涸河道与背景噪音,但因其未考虑大气因素,与 MNDWI 相比效果较差^[32]。而后由丁凤^[33]提出的 NWI 对不同类型水体都取得了较高的提取精度。为了解决水体与含水量比较大的土壤区分问题,丁占峰等^[34]利用 Landsat 8 新增的深蓝 (New Deep Blue, NDB) 波段得到了 ONDWI 指数 (Override NDWI)。另外,以草海国家级自然保护区为例,吴际通等^[35]比较了 5 种水体指数提取湿地水体信息的准确度,结果表明 NWI 精度最高。

常用的建筑用地指数有归一化差值建筑指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDBI)、建筑用地指数 (Index-based Built-up Index, IBI) 和改进的归一化建筑指数 (BUc, 也被称为建筑物指数 Built-up Index, BUI)。Zha 等^[36]使用 NDBI 指数提取了建筑用地,其结果比用最大似然法要好,精度能达到 92.6%。而 Xu^[37]提出的 IBI 指数在保持建筑用地特征的同时能够有效地抑制背景噪声。同时,由 He 等^[38]和 Jin 等^[39]同年提出的 BUI 既能减少将其他地物误分到建筑用地的情况,并且在动态监测建设用地方面也有好的效果。进一步地,研究者们为了比较哪种指数能够更好地提取建筑用地或不透水层,在压缩数据维后,分别采用了基于核函数阈值算法^[16]或 BP 神经网络模型监督分类法^[17]来提取建筑用地或不透水层,前者 and 后者分别得出 IBI 和 BUI 的提取精度最高。

由于土地覆盖类型总体上可以分为植被、水体、不透水层 (包括硬质铺装的道路、建筑等以及自然条件下的岩石等) 和裸地 4 种大类型,因此本文主要针对这 4 种大的土地覆盖类型,研究多类指数及其组合对多目标 (上述 4 种大的土地覆盖类型) 解译的不同影响,以期得到不同地物和整体影像的最佳单个或组合指数,从而可为快速精准地提取多目标信息提供参考。

2 研究区和研究方法

2.1 研究区概况和数据预处理

研究区位于山东省德州市及其周边地区,具体范围是 $116^{\circ}9'46'' \sim 116^{\circ}26'10''\text{E}$, $37^{\circ}20'52'' \sim 37^{\circ}33'45''\text{N}$,属于平原地形。研究区的主要土地覆盖类型为植被 (少量自然植被及大量农作物)、水体和不透水层 (包含了道路、房屋、工厂和空地等地物),裸地极少。

研究采用的遥感数据为 Landsat 5 TM 影像,来源于地理空间数据云网站 (<http://www.gscloud.cn>),产品类型为 Level 1T,观测时间为 2000 年 9 月 13 日。影像空间分辨率为 30 m,包含了蓝、绿、红、近红外和两个短波红外共 6 个波段,影像质量完好,无云和条带,由于研究区为平原,因此影像无阴影。TM 数据第 4、3、2 波段合成的假彩色影像如图 1 所示,其中植被呈红色或暗红色,此时主要为玉米;水体为蓝色或深蓝色、纹理均匀;不透水层呈亮白色、纹理不均匀。遥感数据预处理包括辐射定标和大气校正,最后将研究区从中裁切出来。

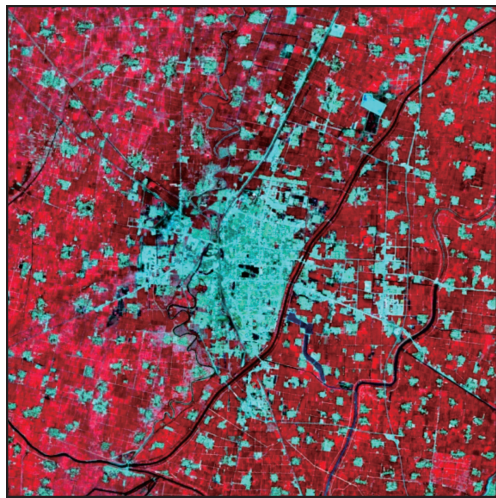


图 1 研究区假彩色合成影像图

Fig.1 False color composite of the study area

2.2 研究方法

技术流程如图 2 所示,首先是从预处理的 TM 影像上提取三大类共 8 种专题指数,然后对这 8 种专题指数按一定规则进行组合,最后针对每一种组合的专题指数采用面向对象的方法进行分类,由此筛选出适合于单目标和多目标的最佳专题指数及其组合。研究中使用的遥感影像处理软件有 eCognition 8.9、ENVI 5.1 和 ArcGIS 10.2。

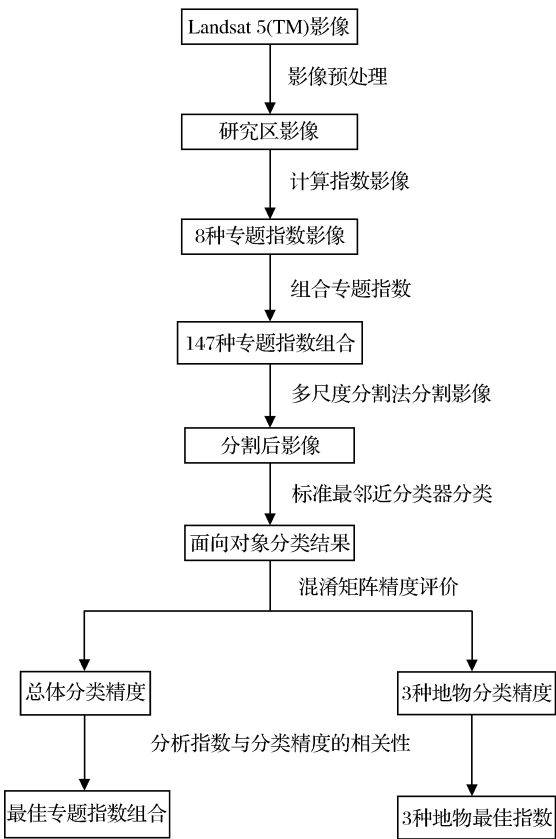


图 2 筛选最佳专题指数的方法流程图

Fig.2 Methodology of screening the optimum thematic indices

2.2.1 专题指数的选择

用于研究的专题指数如表 1 所示。植被指数选择受土壤因素影响较小的 SAVI 和 GVI,其中土壤调节系数 L 取 0.5^[26-27]。水体指数选择适用于不同水体类型且效果较好的MNDWI^[1,30]和适用于具有

多个波段影像的 NWI^[33];在经过大气校正后,EWI反而会抑制水体影像特征的提取^[32],为了从侧面验证试验结果,并分析它对总体分类精度的影响,也选择它参与分类。在基于像素的监督分类和非监督分类中,BUI 和 IBI 分别有着最佳分类效果^[16-17],为了在面向对象分类方法中对它们进行比较,选择 ND-BI、BUI 和 IBI 进行研究。

2.2.2 专题指数的计算

通过表 1 中的计算公式或方法得到了 8 种指数影像,由于影像分割的需要,除 GVI 指数外,其余指数影像 DN 值均被线性拉伸为 0 至 255,处理后影像如图 3 所示。另外,图 4 给出了 3 种主要土地覆被类型在专题指数影像中的光谱均值曲线,可以看出各类指数能够有效地区分出代表类别,其中 EWI 和 BUI 比其他指数能够更好地区分出 3 种地物。

2.2.3 专题指数的组合

为了分析指数对分类影响的差异性,设置用于分类的指数组合规则,即:保证每次分类中每类指数至少有一个参与分类,同类指数中可以有多个参与分类。按照植被、水体和不透水层的顺序分别给 8 个指数编号,结合规则组合指数可知,植被、水体和建筑用地指数的选择情况分别为 3、7 和 7 种,具体组合与编号规则见表 2,这样总共就有 $3 \times 7 \times 7 = 147$ 种植指数组合,即分别有 147 种植被、水体、不透水层和总体分类精度。

研究采用方差分析来探讨指数对分类精度的影响,皆取 $P < 0.05$ 表示差别有显著意义。首先采用可重复双因素分析,研究地物受哪类指数显著影响,研究方法为:任取 3 类指数中的两类为行和列的影

表 1 指数计算公式或方法

Table 1 Formulas and functions for indices calculation

指数类型	指数名称	计算公式或方法	参考文献
植被指数	归一化差值植被指数 (NDVI)	$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$	Rouse 等 ^[25] , 1974
	土壤调整植被指数 (SAVI)	$SAVI = (1 + L) \cdot (NIR - R) / (NIR + R + L)$	Huete ^[27] , 1988
	绿度植被指数 (GVI)	ENVi 的缨帽变换 (Tasseled Cap Transform) 功能	Kauth 等 ^[40] , 1976
水体指数	改进的归一化差值水体指数 (MNDWI)	$MNDWI = (Green - MIR) / (Green + MIR)$	徐涵秋 ^[30] , 2005
	增强型水体指数 (EWI)	$EWI = (Green - NIR - MIR) / (Green + NIR + MIR)$	闫霏等 ^[31] , 2007
	新型水体指数 (NWI)	$NWI = C \cdot (B1 - B4 - B5 - B7) / (B1 + B4 + B5 + B7)$	丁 凤 ^[33] , 2009
建筑用地指数	归一化差值建筑指数 (NDBI)	$NDBI = (MIR - NIR) / (MIR + NIR)$	Zha 等 ^[36] , 2003
	改进的归一化差值建筑指数 (BUc)	$BUc = NDBIc - NDVIc$	He 等 ^[38]
	或建筑物指数 (BUI)	或 $BUI = NDBI - NDVI$	和 Jin 等 ^[39] , 2010
	建筑用地指数 (IBI)	$IBI = [NDBI - (SAVI + MNDWI) / 2] / [NDBI + (SAVI + MNDWI) / 2]$	Xu ^[37] , 2008

注:表中 Green、R、NIR、MIR 分别是 Landsat 5 TM 影像 2、3、4、5 波段地表反射率; L 为土壤调节系数,NWI 的 C 为一个常数,BUc 的 C 代表数值为连续的,文中 BUc 或 BUI 统一由 BUI 表示

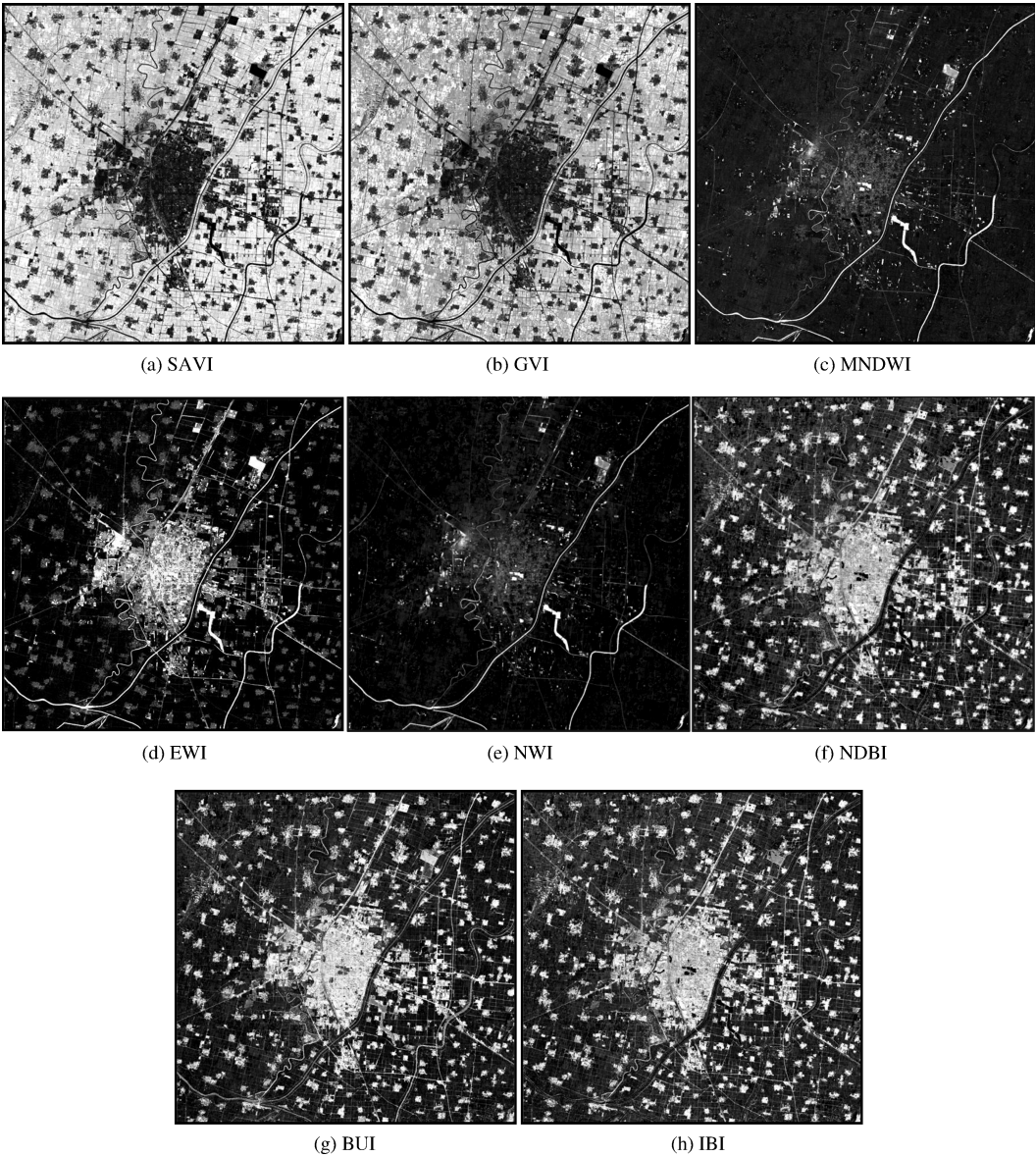


图 3 8 种专题指数影像

Fig.3 Eight kinds of thematic index images

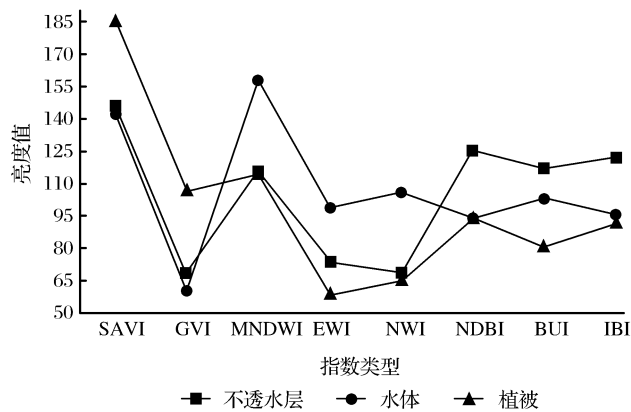


图 4 3 种主要土地覆被类型的光谱均值特征曲线

Fig.4 Spectral profile of the three classes-water, vegetation, and impervious using spectral indices

响因素,所以每种地物有 3 种可重复双因素分析表格,3 种地物和总体共有 12 种表格,而每种行列组合中重复采样数据量取决于余下指数的组合数,所以可重复分析的数据量可以为 3 或 7 个。这里选取以建筑用地和水体指数为行和列的总体分类精度为代表,如表 3,其中从上到下按照植被指数 1、12、2 的顺序排列重复采样数据。进一步地,为了比较同类指数间的显著差异,采用单因素方差分析研究其显著性,具体方法是:若比较 NDBI 和 BUI 对提取不透水层的影响,则只选取 NDBI 或 BUI 作为参与分类的建筑用地指数,由指数组合规则可知,只有 NDBI 或 BUI 参与分类的指数组合都有 21 种,再将两列 21 种结果一一对应做方差分析,所得 P 值见表 4。

表 2 专题指数的组合与编号

Table 2 Composites and numbers of the thematic indices

植被	组合	SAVI	GVI	SAVI+GVI				
	编号	V ₁	V ₂	V ₁₂				
水体	组合	MNDWI	EWI	NWI	MNDWI+EWI	MNDWI+NWI	EWI+NWI	MNDWI+EWI+NWI
	编号	W ₁	W ₂	W ₃	W ₁₂	W ₁₃	W ₂₃	W ₁₂₃
建筑用地	组合	NDBI	BUI	IBI	NDBI+BUI	NDBI+IBI	BUI+IBI	NDBI+BUI+IBI
	编号	B ₁	B ₂	B ₃	B ₁₂	B ₁₃	B ₂₃	B ₁₂₃

注:文中用编号表示专题指数组合时,顺序为植被、水体和建筑用地指数,例如,参与分类的指数有 SAVI、GVI、MNDWI、EWI、NDBI 和 IBI,则表示为 V₁₂ W₁₂ B₁₃

2.2.4 面向对象分类

首先将研究区分为植被、水体和不透水层,在经过预处理的 TM 数据上,参考 Google Earth 上的相关信息,依照样本必须均匀地分布于研究区的原则选取训练和检验样本。因为面向对象方法只需要 2 至 3 倍于影像波段数目的训练样本就可以达到高且稳定的分类精度^[41],考虑到最多有 8 个指数影像参与分类,所以选择了 30 个植被、27 个水体和 30 个

不透水层对象作为训练样本;为了精确地评价分类结果,基于像素选取了检验样本,植被、水体和不透水层样本的像素数分别为:3 169、2 166 和 11 264。选定样本后进行影像分割,采用 eCognition 8.9 的多尺度分割法,其中尺度参数是它的一个重要参数,因为有 147 种指数组合,适合不同组合的尺度参数不尽相同,为了排除尺度参数对分类的影响,各指数组合下的分割尺度通过 Scale Parameter Analysis 尺度参数分析工具确定^[42],形状参数和紧凑度参数分别设置为 0.2 和 0.5。分割后影像通过标准最邻近分类器分类,为了准确地分析指数影像光谱值对分类的影响,特征空间只有对象光谱均值。分类结束后,将分类结果导出至 ENVI 5.1,使用混淆矩阵进行分类精度评价,分析不同指数组合下的分类精度,从而得到相关结论。

表 3 分类精度的可重复双因素分析表(单位:%)

Table 3 Reusable two-factor analysis of variance to classification accuracy

建筑用地指数	水体指数						
	W ₁	W ₂	W ₃	W ₁₂	W ₁₃	W ₂₃	W ₁₂₃
B ₁	89.63	91.26	92.42	88.11	87.92	89.59	87.01
	89.10	92.92	93.05	91.54	89.47	89.82	89.81
	84.90	91.79	93.21	86.76	89.95	89.33	89.81
B ₂	90.40	90.52	92.78	90.79	92.54	91.06	91.08
	91.63	91.64	91.32	92.76	92.42	91.31	87.51
	91.01	91.65	93.81	92.91	89.38	90.20	90.44
B ₃	91.51	91.71	91.84	90.50	88.52	90.20	87.75
	89.02	91.20	93.04	89.02	89.02	89.37	88.21
	87.05	92.67	93.66	88.66	93.36	89.93	88.86
B ₁₂	91.63	88.37	92.31	91.49	89.58	92.81	88.44
	92.34	91.68	91.88	89.29	90.52	92.57	89.54
	91.58	90.80	91.72	89.61	93.36	91.32	89.39
B ₁₃	92.31	92.23	89.64	90.03	90.95	91.94	89.31
	91.53	91.60	91.95	91.40	91.01	92.69	89.89
	92.29	91.02	91.15	89.59	91.46	89.40	90.39
B ₂₃	93.07	89.27	93.44	90.07	92.63	89.04	89.11
	92.19	92.39	92.27	90.63	93.22	90.58	90.87
	91.28	91.73	93.31	91.85	92.02	92.82	89.22
B ₁₂₃	92.05	91.08	92.53	91.46	91.98	91.24	92.38
	91.97	91.67	91.45	90.06	92.50	93.21	90.21
	91.02	92.17	93.82	92.08	90.04	92.91	90.88

3 结果与分析

3.1 指数数量分析

由于分类采用的是标准最邻近法,增加总指数影像数量就等于增加了特征空间的维数,这样就会影响分类结果,为了分析这种影响,按照参与分类的总指数数量,将分类结果分成 6 类,总共有 3、4、5、6、7 和 8 个指数参与分类的情况。通过前文的组合方式可知,按照指数数量从小到大的顺序,每种数量各有 18、45、48、27、8 和 1 种组合。除了 8 个指数以外,分析其他 5 种数量中分类精度的最大、最小和平均值。

从图 5 可知,当指数数量处于 3 至 4、5 至 7 时,3 种地物和总体分类精度的最小值随指数数量的增加有着增大的趋势。同时,水体分类精度平均值随指数数量增加有上升的趋势,而植被最大值随着指数数量增加保持不变或减少。另外,随着指数数量变化,不透水层和总体分类精度的平均值有着相同

的大小变化。

表 5 展示了在 5 种指数数量下,3 种地物和总体出现最值分类精度的指数组合。植被最大值组合中 SAVI 和 GVI 分别出现 4 次和 1 次,最小值中分别出现 2 次和 5 次;水体最大值中 MNDWI、EWI 和 NWI 分别出现 3、2 和 4 次,最小值中分别出现 2、5 和 1 次;不透水层最大值中 NDBI、BUI 和 IBI 都出现 3 次,最小值中分别出现 4、2 和 0 次;总体最大值中 SAVI、GVI、MNDWI、EWI、NWI、NDBI、BUI 和 IBI 分别出现 3、4、1、1、5、2、5 和 4 次,最小值中分别出现 3、4、5、4、3、4、2 和 0 次。由此频率可推断,同类指数对分类精度的影响不尽相同。

3.2 单个指数分析

对表 4 的 3 个表格分析后得到行、列和交互作

用对分类精度影响的 P 值表(表 6)。随着参与分类的指数种类、数量和组合的改变,植被指数对植被和水体有显著影响,水体指数对所有地物都有显著影响,建筑用地指数对水体、不透水层和总体有显著影响。同时,植被和水体指数的交互作用对植被有显著影响,建筑用地和水体指数的交互作用对水体和总体都有显著影响。

进一步分析上文中的显著性差异,先比较单个指数对专题地物分类效果的影响,分析表 4 中的 P 值,并比较平均精度可得:SAVI 对植被的分类精度显著大于 GVI,平均精度提高了 1.11%;EWI 对水体的分类精度显著小于 MNDWI 和 NWI,平均精度只有 81.56%;提取不透水层时,BUI 显著优于其他两种建筑用地指数,达到了 92.83%的平均精

表 4 单因素方差分析 P 值检验表及对应地物的平均精度
Table 4 P-value from completely random design and mean accuracy of corresponding rows

(1)植被指数对植被和水体												
地物类别		P 值	V ₁	V ₂	平均精度/%							
					植被		水体					
植被/水体		V ₁			92.73		82.94					
		V ₂	* / *		91.62		83.90					
		V ₁₂	* /—	— / *	91.28		83.06					
(2)水体指数对植被、水体、不透水层和总体												
地物类别		P 值	W ₁	W ₂	W ₃	W ₁₂	W ₁₃	W ₂₃	平均精度/%			
									植被	水体	不透水层	总体
植被/水体 /不透水层 /总体		W ₁							92.30	83.25	91.88	90.83
		W ₂	— / * / — / —						92.16	81.56	93.07	91.40
		W ₃	— / — / * / *	— / * / — / *					93.18	83.11	93.98	92.41
		W ₁₂	— / — / — / —	— / * / * / *					92.36	83.19	91.25	90.41
		W ₁₃	— / — / — / —		* / — / * / *	* / * / — / —			90.69	84.28	92.44	91.04
		W ₂₃		* / * / — / —	* / — / * / *	* / — / — / —	— / — / — / —		91.16	83.73	92.38	91.02
		W ₁₂₃	— / — / * / *	* / * / * / *	* / — / * / *	— / * / — / —	— / — / * / *	— / — / * / *	91.29	83.98	90.10	89.53
(3)建筑用地指数对不透水层、水体和总体												
地物类别		P 值	B ₁	B ₂	B ₃	B ₁₂	B ₁₃	B ₂₃	平均精度/%			
									不透水层	水体	总体	
不透水层/ 水体/总体		B ₁							90.79	83.34	89.88	
		B ₂	* / — / *						92.83	82.15	91.29	
		B ₃	— / — / —	* / * / —					91.10	84.08	90.24	
		B ₁₂	— / — / —	— / — / —					92.04	83.31	90.96	
		B ₁₃	* / — / *		— / — / —	— / — / —			92.38	83.87	91.04	
		B ₂₃		— / — / —	* / — / *	— / — / —	— / — / —		92.77	83.39	91.48	
		B ₁₂₃	* / — / *	— / — / —	* / * / *	* / — / *	— / — / *	— / — / —	93.19	82.97	91.75	

注: * 号代表有显著性差异, — 号代表无显著性差异

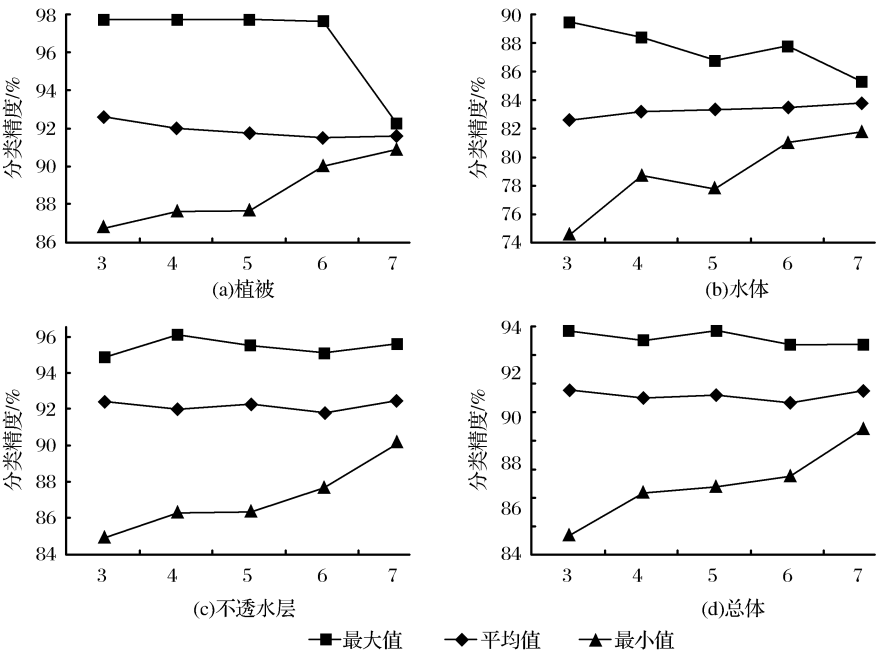


图 5 分类精度在不同指数数量下的最大值和平均值

Fig.5 Max,min and mean classification accuracy of three sorts of land cover types in the different number of indices

度。再通过表 4 分析单个指数对非专题地物的影响,可知 GVI 对水体的平均分类精度显著好于 SAVI,提高了 0.96%;比较水体指数对应不透水层分类结果可知,NWI 显著优于 MDNWI,平均精度为 93.98%;建筑用地指数中 IBI 对水体分类效果显著优于 BUI,平均精度提高 1.93%。最后比较单

个水体或建筑用地指数对总体分类结果的影响,分析表 4 中(2)、(3)得出 NWI 是水体指数中用于总体分类的最佳指数,平均精度为 92.41%,显著高于其他指数;按照平均精度排列建筑用地指数,BUI>IBI>NDBI,且 BUI 显著大于 NDBI,平均精度相差 1.41%。

表 5 不同指数数量下最值分类精度的指数组合

Table 5 Composites of indices related to max and min classification accuracy value in the different number of indices

指数数量		3	4	5	6	7
最大值	植被	V ₁ W ₁ B ₂	V ₁ W ₁ B ₁₃	V ₁ W ₁ B ₁₂₃	V ₁ W ₁₂ B ₁₂₃	V ₂ W ₁₂₃ B ₁₂₃
	水体	V ₂ W ₃ B ₃	V ₂ W ₁ B ₁₃	V ₁₂ W ₂₃ B ₃	V ₁₂ W ₁₃ B ₁₃	V ₂ W ₁₂₃ B ₁₂₃
	不透水层	V ₁ W ₃ B ₁	V ₁ W ₃ B ₂₃	V ₂ W ₃ B ₁₂₃	V ₂ W ₂₃ B ₁₂₃	V ₁₂ W ₂₃ B ₁₂₃
	总体	V ₂ W ₃ B ₂	V ₁ W ₃ B ₂₃	V ₂ W ₃ B ₁₂₃	V ₁₂ W ₁₃ B ₂₃	V ₁₂ W ₂₃ B ₁₂₃
最小值	植被	V ₂ W ₁ B ₁	V ₂ W ₁₃ B ₁	V ₂ W ₁₃ B ₁₃	V ₁₂ W ₁₃ B ₁₃	V ₁₂ W ₁₂₃ B ₂₃
	水体	V ₁ W ₂ B ₂	V ₁₂ W ₂ B ₂	V ₁₂ W ₂ B ₂₃	V ₁₂ W ₁₂₃ B ₂	V ₁₂ W ₁₂ B ₁₂₃
	不透水层	V ₂ W ₁ B ₁	V ₂ W ₁₂ B ₁	V ₁ W ₁₂₃ B ₁	V ₁₂ W ₁₂₃ B ₂	V ₁₂ W ₁₂₃ B ₁₂
	总体	V ₂ W ₁ B ₁	V ₂ W ₁₂ B ₁	V ₁ W ₁₂₃ B ₁	V ₁₂ W ₁₂₃ B ₂	V ₁₂ W ₁₂₃ B ₁₂

3.3 指数组合分析

由表 3 和 6 可知,不仅同类的单个指数对分类地物有显著差异,而且同类指数中组合与单个、组合与组合之间也有着显著差异,为了明确这种差异,采用与比较单个指数相同的方法进行分析,所得结果见表 4。

分析指数对专题地物的分类影响,先讨论单个

与组合的不同,由表 4 可得:SAVI+GVI 组合在植被分类效果上显著差于单独使用 SAVI,平均精度相差 1.45%;任何与 EWI 组合的水体平均分类精度都要显著高于单独使用 EWI,其中 3 个水体指数组合的平均精度最大,可达 83.98%;比较不透水层平均分类精度可知,NDBI+IBI 组合显著优于 NDBI,BUI+IBI 组合显著优于 IBI,平均精度分别提高 1.

59%和 1.67%,并且 NDBI+BUI+IBI 组合要显著优于 NDBI 或 IBI,平均精度为 93.19%。同时,不同组合也存在显著差异,提取水体时,MNDWI+EWI+NWI 和 MNDWI+NWI 组合都要显著优于 MNDWI+EWI;提取不透水层时,NDBI+BUI+IBI 平均精度显著大于 NDBI+BUI,高达 93.19%,为建筑用地指数组合的最大平均精度。

同样地,指数对非专题地物的提取也有显著不同。先分析组合相比于单个指数有何不同,由表 4 中(1)可知,在提取水体时,SAVI+GVI 平均精度显著低于 GVI,只有 83.06%;分析表 4(2)得,提取植被时,除 MNDWI+EWI 外,任意 EWI 或 NWI 组合都显著差于单个 EWI 或 NWI,其中 MNDWI+NWI 平均精度最小,为 90.69%;通过水体指数分析不透水层提取效果,由表 4 中(2)得,MNDWI+EWI+NWI 显著小于任意单个指数,且除 EWI+NWI 与 EWI 外,任意 EWI 或 NWI 组合都显著差于单个 EWI 或 NWI;从表 4 中(3)得出用建筑用地指数分析水体提取信息时,组合与单个指数只有 NDBI+BUI+IBI 与 IBI 有显著差异,组合平均精度下降 1.11%。同时,从表 4 中(2)分析组合之间的显著差异,MNDWI+EWI 提取植被的效果显著优于 MNDWI+NWI 和 EWI+NWI,提取不透水层时 MNDWI+EWI+NWI 的精度显著小于 MNDWI+NWI 和 MNDWI+EWI。

由表 4 中(2)、(3)可知总体分类结果也受指数组合的影响。与两个水体指数组合相比,单独使用组合中平均精度较大的指数,其效果显著优于前者,而且 3 个水体指数组合显著差于除 MNDWI+EWI 外所有情况,平均精度只有最低的 89.53%,如表 4 中(2)所示。而从表 4 中(3)中可知,除 BUI 和 BUI+IBI 之外,3 个建筑用地组合显著优于其他情况,其平均精度为 91.75%。另外,NDBI+IBI 比 NDBI+BUI+IBI 比 IBI 的精度都要显著得高。

表 6 可重复双因素分析 P 检验表
Table 6 P-value from reusable two-factor analysis of variance

地物类别	P 值	植被和 水体指数	植被和建筑 用地指数	建筑用地和 水体指数
植被/水体/ 不透水层/总体	行	*/*/-/-	*//*/-/-	-/*/*/*
	列	*//*/*/*	-/*/*/*	*//*/*/*
	交互	*/-/-/-	-/-/-/-	-/*/-/*

注: * 号代表有显著性差异, - 号代表无显著性差异

4 结 语

研究通过 TM 影像提取了 3 类共 8 种专题指数

影像,包括两种植被指数(SAVI 和 GVI),3 种水体指数(MNDWI、EWI 和 NWI)以及 3 种建筑用地指数(NDBI、BUI 和 IBI),结合压缩数据维的方法按规则组合指数,再运用面向对象的标准最邻近法将影像分为植被、水体和不透水层 3 类,最后用方差分析检验了指数对分类影响的显著性,得到了提取地物的最佳指数,更重要的是得到了解译整幅影像的最佳指数,另外还分析了指数数量和组合对分类的影响。上述研究得出的结论有:

(1)除水体在指数数量 4 至 5 的情况外,随着参与指数数量的增加,不同数量下 3 种地物和总体的最小分类精度随之增大。另外,总体和不透水层平均值变化规律相同。再分析最值组合中各个指数的出现频率,可以得出同类指数对于解译 3 种地物和整幅影像有着差异性。

(2)同类指数种类、数量或组合的改变显著影响专题地物的解译效果,对部分非专题地物也有显著影响,另外总体分类精度受水体和建筑用地指数显著影响。当同类指数中只有一个参与分类时,SAVI 和 BUI 是提取专题地物的最佳指数,而 MNDWI 和 NWI 同为提取水体的最佳指数;另一方面,GVI 能更好地提取水体,提取不透水层时,NWI 比 MNDWI 更好,而 IBI 的水体分类精度显著优于 BUI;最重要的是,文中得出 BUI 和 NWI 是用于总体解译的最佳指数。

(3)通过比较同类指数中单个与组合、组合与组合的分类精度,发现在提取专题地物时,随着指数数量从 1 增加到 2 或 3,相较于 SAVI 来说植被精度下降,而对于 EWI 来说水体精度随之提高,相比于 NDBI 和 IBI 来说不透水层精度随之提高。同样的,分析指数数量对非专题地物的影响,当水体指数数量增加时,植被和不透水层精度随之减少。更进一步地,在指数数量影响下,总体与不透水层规律相同。这表明水体指数显著影响所有地物,而且随着数量增加,水体信息的提取精度增大,但与其他地物信息的重叠度也增大了。

另外,水体和总体的解译效果还受到水体和建筑用地指数交互作用的显著影响,植被则受到植被和水体指数交互作用的显著影响,即两类指数不同组合的解译效果有显著区别,初步可得解译植被的两类指数组合中 SAVI+MNDWI 显著优于 GVI+MNDWI。虽然两类指数交互作用也会影响水体和总体,但因水体和建筑用地指数的每种组合中用于分析的数据量不够,无法分析它们的显著差异,所以

还需要通过更多实验才能得出更准确的结论。

本文提出的适用于多目标遥感自动解译的最佳专题指数筛选方法适用于裸地少、植被茂盛时期的旱作物平原地区,以后还可通过建立自动分析模型,快速得出各种地形地貌区域不同时期的最佳指数,从而可以进一步分析不同指数组合对分类的影响。

参考文献(References):

- [1] Xu Hanqiu, Du Liping. Fast Extraction of Built-up Land Information from Remote Sensing Imagery[J]. Journal of Geo-Information Science, 2010, 12(4): 574-579. [徐涵秋, 杜丽萍. 遥感建筑用地信息的快速提取[J]. 地球信息科学学报, 2010, 12(4): 574-579.]
- [2] Xu Hanqiu. Remote Sensing Information Extraction of Urban Built-up Land based on a Data-dimension Compression Technique[J]. Journal of Image and Graphics, 2005, 10(2): 223-229. [徐涵秋. 基于压缩数据维的城市建筑用地遥感信息提取[J]. 中国图象图形学报, 2005, 10(2): 223-229.]
- [3] Wang Lin, Xu Hanqiu, Li Sheng. Dynamic Monitoring of the Urban Expansion in Fuzhou of SE China Using Remote Sensing Technology[J]. Geo-Information Science, 2006, 8(4): 129-135. [王琳, 徐涵秋, 李胜. 福州城市扩展的遥感动态监测[J]. 地球信息科学, 2006, 8(4): 129-135.]
- [4] Chen Jieli, Liu Yongxue, Li Manchun, *et al.* Extracting Remote Sensing Information of Residential Areas based on the Analysis of Normalized Difference Index[J]. Science of Surveying and Mapping, 2010, 35(2): 204-206. [陈洁丽, 刘永学, 李满春, 等. 基于归一化指数分析的居民地遥感信息提取[J]. 测绘科学, 2010, 35(2): 204-206.]
- [5] Zhang Mingyue, Yang Guijun, Song Weidong, *et al.* A Methodology of Agricultural Land Extraction Using Remote Sensing Combined Index and Different Classification Technologies[J]. Science of Surveying and Mapping, 2011, 36(5): 73-76. [张明月, 杨贵军, 宋伟东, 等. 遥感组合指数与不同分类技术结合提取农业用地方法[J]. 测绘科学, 2011, 36(5): 73-76.]
- [6] Xiong Junnan, Wei Fangqiang, Jiang Yuhong, *et al.* Residential Areas Information Extraction based on Spectral Signature and Index Analysis[J]. Science of Surveying and Mapping, 2013, 38(2): 146-149. [熊俊楠, 韦方强, 江玉红, 等. 基于谱间特征与多种指数分析的居民地信息提取方法[J]. 测绘科学, 2013, 38(2): 146-149.]
- [7] Xu H. Extraction of Urban Built-up Land Features from Landsat Imagery Using A Thematic-oriented Index Combination Technique[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2007, 73(12): 1381-1391.
- [8] Sun Jianguo, Jiang Ye, Yan Changzhen. Improving Desertification Land Classification Accuracy Using Thematic Index Extracted from Spectral Transformation[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2013, 28(04): 655-658. [孙建国, 姜烨, 颜长珍. 利用专题指数改善沙漠化土地遥感分类精度[J]. 遥感技术与应用, 2013, 28(04): 655-658.]
- [9] Fan Fenglei, Liu Runping, Zhang Dianguo. An Improved Method to Extract Building Land Information and the Application in Guangzhou[J]. Journal of South China Normal University(Natural Science Edition), 2014, 46(4): 98-102. [樊凤雷, 刘润萍, 张佃国. 一种改进的城市建筑用地信息提取方法及在广州地区的应用[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2014, 46(4): 98-102.]
- [10] Ma Hong. A New Method for Extracting Information of Urban Built-up based on Image Index[J]. Urban Geotechnical Investigation and Surveying, 2014, (3): 20-23. [马红. 一种基于遥感指数的城市建筑用地信息提取新方法[J]. 城市勘测, 2014, (3): 20-23.]
- [11] Zhan Qingqing, Wang Huiyuan. Information Extraction of Urban Built-up Land based on the Analysis of Comprehensive Index[J]. Geomatics and Spatial Information Technology, 2014, 37(2): 62-65, 69. [湛青青, 王辉源. 基于综合指数分析的城市建筑用地信息提取研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2014, 37(2): 62-65, 69.]
- [12] Bhatt A, Ghosh S K, Kumar A. Spectral Indices based Object Oriented Classification for Change Detection Using Satellite Data[J]. International Journal of System Assurance Engineering and Management, 2016: 1-10.
- [13] Zhang Z, Ke C. Monitoring and Analysis of Changes in a Wetland Landscape in Xingzi County[J]. Earth Science Informatics, 2016, 9(1): 35-45.
- [14] Feng Peihua, Liu Zhenhua, Hu Yueming. Surface Waterbodies Extraction Optimized Model based on TM Remote Sensing Image[J]. Bulletin of Science and Technology, 2016, 32(8): 176-181. [冯沛华, 刘振华, 胡月明. 基于 TM 遥感优化模型的地表水体信息提取[J]. 科技通报, 2016, 32(8): 176-181.]
- [15] Bhandari A K, Kumar A, Singh G K. Improved Feature Extraction Scheme for Satellite Images Using NDVI and NDWI Technique based on DWT and SVD[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2015, 8(9): 6949-6966.
- [16] Varshney A, Rajesh E. A Comparative Study of Built-up Index Approaches for Automated Extraction of Built-up Regions from Remote Sensing Data[J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2014, 42(3): 659-663.
- [17] Patel N, Mukherjee R. Extraction of Impervious Features from Spectral Indices Using Artificial Neural Network[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2014, doi:10.1007/s12517-014-1492-x.
- [18] Du Xianrong, Yang Jiansheng, Wang Feihong. An Improved Method of Water Extraction based on TM Image[J]. Journal of University of Jinan(Science and Technology), 2014, 28(6): 434-438. [杜先荣, 杨建生, 王飞红. 一种改进的基于 TM 影像的水体提取方法[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2014, 28(6): 434-438.]
- [19] Yang Anni, Xu Yahui, Su Hongjun. Urban Built-up Land Extraction and Change Detection Analysis Using Built-up Inde-

- xes[J].*Geomatics and Spatial Information Technology*, 2014, 37(8):30-34.[杨安妮, 许亚辉, 苏红军. 结合建筑指数的城市建筑用地提取与变化检测分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2014, 37(8):30-34.]
- [20] Wan Jianpeng, Guan Yunlan, Ye Suqian, *et al.* Water Extraction based on Comprehensive Weight Water Index: A Case Study in Region of Poyang Lake[J]. *Journal of East China Institute of Technology*, 2015, 38(2):206-211.[万建鹏, 官云兰, 叶素倩, 等. 基于综合权重水体指数的水体提取研究——以鄱阳湖为例[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2015, 38(2):206-211.]
- [21] Fang Gang. Application of NCIWI in Water Body Information Extraction of City[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2016, 41(4):44-49.[方刚. 改进型混合水体指数的城市水体信息提取——以宿州市为例[J]. 测绘科学, 2016, 41(4):44-49.]
- [22] Xu Ying, Li Fuwei, Li Xiangxin, *et al.* Comparative Study of Urban Construction Land Extraction from Remote Sensing: A Case Study of Qixing District, Bijie City[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2016, 44(32):200-203.[许莹, 李付伟, 李向新, 等. 城镇建设用地遥感影像提取方法的对比研究——以毕节市七星区为例[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(32):200-203.]
- [23] Wang Jinliang, Shao Jing'an, Li Yangbin. A Multiple Remote Sensing Index Integrated Application based Classification of Typical Ground Objects in the Main City of Chongqing[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2013, 15(6):925-931.[王金亮, 邵景安, 李阳兵. 基于多种遥感指数综合应用的典型城市地物分类——以重庆市主城6区为例[J]. 地球信息科学学报, 2013, 15(6):925-931.]
- [24] Ga Liba, Zang Shuying, Li Miao, *et al.* Decision Tree Classification of Remote Sensing Images based on Index[J]. *Environment and Development*, 2016, (5):43-48.[嘎力巴, 臧淑英, 李苗, 等. 基于指数的遥感影像决策树分类方法[J]. 环境与发展, 2016, (5):43-48.]
- [25] Tian Qingjiu, Min Xiangjun. Advances in Study on Vegetation Indices[J]. *Advances in Earth Science*, 1998, 13(4):327-333.[田庆久, 闵祥军. 植被指数研究进展[J]. 地球科学进展, 1998, 13(4):327-333.]
- [26] Stella W T, Roger M H. Responses of Spectral Indices to Variations in Vegetation Cover and Soil Background[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1998, 64(9):915-921.
- [27] Huete A R. A Soil-Adjusted Vegetation Index[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1988, 25:295-309.
- [28] Lei Wanning, Wen Zhongming. Extraction of Structured Vegetation Cover Index for Loess Area in North Shanxi based on TM Images[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(11):2736-2742.[雷婉宁, 温仲明. 基于TM遥感影像的陕北黄土区结构化植被因子指数提取[J]. 应用生态学报, 2009, 20(11):2736-2742.]
- [29] Mcfeeters S K. The Use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the Delineation of Open Water Features[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17(7):1425-1432.
- [30] Xu Hanqiu. A Study on Information Extraction of Water Body with the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI)[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2005, 9(5):589-595.[徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. 遥感学报, 2005, 9(5):589-595.]
- [31] Yan Pei, Zhang Youjing, Zhang Yuan. A Study on Information Extraction of Water System in Semi-arid Regions with the Enhanced Water Index (EWI) and GIS based Noise Remove Techniques[J]. *Remote Sensing Information*, 2007, (6):62-67.[闫霏, 张友静, 张元. 利用增强型水体指数(EWI)和GIS去噪音技术提取半干旱地区水系信息的研究[J]. 遥感信息, 2007, (6):62-67.]
- [32] Xu Hanqiu. Comment on the Enhanced Water Index (EWI): A Discussion on the Creation of A Water Index[J]. *Geo-Information Science*, 2008, 10(6):776-780.[徐涵秋. 从增强型水体指数分析遥感水体指数的创建[J]. 地球信息科学, 2008, 10(6):776-780.]
- [33] Ding Feng. Study on Information Extraction of Water Body with a New Water Index(NWI)[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2009, 34(4):155-157.[丁凤. 基于新型水体指数(NWI)进行水体信息提取的实验研究[J]. 测绘科学, 2009, 34(4):155-157.]
- [34] Ding Zhanfeng, Li Dajun. The Water Region Extraction of the Poyang Lake based on the ONDWI[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2015, 43(6):348-350.[丁占峰, 李大军. 基于ONDWI水体指数的鄱阳湖水域信息提取[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(6):348-350.]
- [35] Wu Jitong, Tan Wei, Yu Lifei. Comparative Study of Different Water Indexs based on TM/ETM+ Imagery[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2013, 38(4):193-195.[吴际通, 谭伟, 喻理飞. 基于TM/ETM+影像的不同水体指数对比研究[J]. 测绘科学, 2013, 38(4):193-195.]
- [36] Zha Y, Gao J, Ni S. Use of Normalized Difference Built-up Index in Automatically Mapping Urban Areas from TM Imagery[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(3):583-594.
- [37] Xu H. A New Index for Delineating Built-up Land Features in Satellite Imagery[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(14):4269-4276.
- [38] He C Y, Shi P J, Xie D Y, *et al.* Improving the Normalized Difference Built-up Index to Map Urban Built-up Areas Using a Semiautomatic Segmentation Approach[J]. *Remote Sensing Letters*, 2010, 1(4):213-221.
- [39] Jin A L, Sung S L, Kwang H C. Development of an Urban Classification Method Using a Built-up Index[C]//*Power Systems and Remote Sensing*, 2010:39-43.
- [40] Kauth R J, Thomas G S. The Tasseled Cap-A Graphic Description of the Spectral-temporal Development of Agricultural Crops as Seen by Landsat[J]. *Laboratory for Applications*

of Remote Sensing,1976,159:41-51.

[41] Bo Shukui,Ding Lin.The Effect of the Size of Training Sample on Classification Accuracy in Object-oriented Image Analysis[J].Journal of Image and Graphics,2010,15(7):1106-1111.[薄树奎,丁琳.训练样本数目选择对面向对象影像分类方法精度的影响[J].中国图象图形学报,2010,15(7):1106-1111.]

[42] Drágut L,Tiede D,Levick S R.ESP:A Tool to Estimate Scale Parameter for Multiresolution Image Segmentation of Remotely Sensed Data[J].International Journal of Geographical Information Science,2010,24(6):859-871.

Selection of Optimum Thematic Indices Applied to the Multi-objective and Automatic Remote Sensing Interpretation

Zhu Zhongzheng^{1,2},Chen Yufu³,Zhu Wenquan^{1,2},Zheng Zhoutao^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology,Beijing 100875,China ;
2.Faculty of Geographical Science,Beijing Normal University,Beijing 100875,China ;
3.Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research,CAS,Beijing 100101,China)

Abstract:Thematic indices are very significant for automatic remote sensing interpretation.However,existing research methods,which are applied to select thematic indices,mostly aim to the single-objective remote sensing interpretation,and cannot obtain the optimum multi-objective thematic indices.According to process the Landsat 5 TM data of Dezhou city,two vegetation indices,three water indices and three built-up indices are produced;Then,based on the object-oriented classification,it is analyzed that how single thematic index,composite of indices and number of index affect the classification accuracy of vegetation,water and impervious features respectively by extracting these land cover types simultaneously.The following conclusions are drawn:(1) Minimum classification accuracy of three land cover types will increase as the increase of number of thematic index;(2) Considering the single index,the best one to extract imperious and vegetation is Built-up Index (BUI) and Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) respectively.Meanwhile,the optimal water index to interpret the overall image is New Water Index (NWI);(3) With regard to composite of indices,the interpretation accuracy of vegetation becomes worse as the increase of number of vegetation index;And the more built-up indices are used into the classification,the more accurate results are produced for the impervious features and the whole study area.Moreover,with the increases of number of water index,water can be more precisely identified in a certain degree,but the classification accuracy of impervious features and the overall region are declined gradually.

Key words:Vegetation index;Water index;Built-up index;Object-oriented classification;Number of index;Composite of indices