

doi: 10.3969/j.issn.2095-0411.2023.04.007

## 利用空间特征的平原地区灌溉沟渠优化提取

方 炫<sup>1</sup>, 张同亮<sup>2</sup>, 彭明国<sup>1</sup>, 蒋 圣<sup>3</sup>, 张秋亚<sup>1</sup>

(1. 常州大学 城市建设学院, 江苏 常州 213164; 2. 泗阳县水利局, 江苏 宿迁 223700; 3. 无锡工艺职业技术学院 机电与信息工程学院, 江苏 无锡 214206)

**摘要:** 针对异物同谱和植被覆盖影响沟渠提取效果的问题, 提出一种基于无人机影像和空间特征对提取过程进行优化和补偿的灌溉沟渠提取方法。首先, 采用尺度参数估计 (Estimation of Scale Parameter, ESP) 方法确定最优分割参数; 其次, 通过光谱均值及标准差构建特征空间, 使用最近邻方法获得初始分类结果; 最后, 利用长宽比、相对边界指标、边界规整度、面积等空间几何和关系特征, 对初始分类结果进行优化提取。试验发现, 对于空间分辨率为 0.07 m 的平原灌区影像, 最优分割参数为 61, 基于空间特征的优化提取方法将提取精度提高到 92.3%, 较优化前提高了 7.6%。该方法能有效解决杂草及异物同谱所导致的沟渠缺失及部分断连问题, 提高平原地区灌溉沟渠提取的精度。

**关键词:** 灌溉沟渠; 面向对象法; 无人机影像; 空间特征; 最近邻分类

中图分类号: X 87

文献标志码: A

文章编号: 2095-0411(2023)04-0043-09

## Optimal extraction method of irrigation ditches in plain areas using spatial characteristics

FANG Xuan<sup>1</sup>, ZHANG Tongliang<sup>2</sup>, PENG Mingguo<sup>1</sup>, JIANG Sheng<sup>3</sup>, ZHANG Qiuya<sup>1</sup>

(1. School of Urban Construction, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2. Siyang County Water Conservancy Bureau, Suqian 223700, China; 3. School of Mechatronics and Information, Wuxi Vocational Institute of Arts and Technology, Wuxi 214206, China)

**Abstract:** The capability of applying remote sensing data on ditch extraction is reduced because of vegetation coverage and different objects with same spectrum. To solve the problem, an integrated framework based on unmanned aerial vehicle imagery using spatial features to optimize and compensate the extraction process is proposed for irrigation ditch extraction. Firstly, the optimized segmentation parameter was achieved using the estimation of scale parameter algorithm (ESP). Secondly, the feature

收稿日期: 2022-12-14。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41871313); 江苏省自然科学基金面上资助项目(BK20161118)。

作者简介: 方炫(1982—), 女, 江苏沭阳人, 博士, 副教授。通信联系人: 张同亮(1985—), E-mail: 2990244249@qq.com

引用本文: 方炫, 张同亮, 彭明国, 等. 利用空间特征的平原地区灌溉沟渠优化提取[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2023, 35(4): 43-51.

spaces for classification were constructed by spectral mean and standard deviation, and the initial classification was conducted by using the supervised k-nearest neighborhood classifier. Finally, the spatial geometric and relational features including aspect ratio, relative boundary index, boundary regularity and area, were used to optimize the initial classification results. The result shows that the optimal segmentation parameter is 61 for the plain irrigation area with 0.07 m resolution, and the optimization extraction method based on spatial features improves the extraction accuracy to 92.3%, which is 7.6% higher than that before optimization. The proposed method can effectively solve the problems of ditch missing and partial disconnection caused by the same spectrum of weeds and different objects with same spectrum, improving the accuracy of ditch extraction in plain irrigation areas.

**Key words:** irrigation ditches; object-oriented method; unmanned aerial vehicle imagery; spatial characteristics; nearest neighbor classification

灌溉对维持粮食生产至关重要,全球约 40%的作物生长于灌溉土地<sup>[1]</sup>。据统计,全球约 70%的淡水消耗用于灌溉<sup>[2]</sup>,因此如何实现精准灌溉,是开展节水农业、实现水可持续发展的研究重点。通过沟渠进行田间漫灌仍然是中国目前最主要的灌溉方式<sup>[3]</sup>。为此,准确快速提取沟渠空间信息,是实现精准灌溉的关键,对于建立农田水利工程管护系统、保障农业节水有重要现实意义。平原河网地区人工沟渠纵横交错,又是中国经济发达、农业土地资源紧张的区域,对平原河网地区的沟渠空间信息提取方法进行研究尤为重要。

无人机遥感具有灵活性高、成本低、时效性高、数据分辨率高等优势,在地表环境监测和信息提取方面得到越来越多的应用<sup>[4]</sup>。目前,基于无人机数据的沟渠提取方法成为新的研究热点<sup>[5-7]</sup>,提取方法根据数据源可以分为基于数字高程模型 (DEM) 的提取、结合 DEM 和影像的提取、基于影像的提取。利用地形差异性,基于平滑前后 DEM 差建立相对地形模型,通过设置阈值可提取渠系轮廓<sup>[8]</sup>;基于 DEM 的水文分析,通过汇流累积阈值也可进行沟渠提取<sup>[9]</sup>。但地形信息存在冗余、提取渠系不连续的问题,为弥补单一 DEM 数据源的缺陷,SAH 等<sup>[10]</sup>提出了一种结合 DEM 的坡度信息和正射影像的沟渠提取方法。然而,在面向极为平坦的平原河网地区时,渠底和两侧农田未必都存在明显差异,DEM 难以在沟渠提取中发挥作用。基于无人机影像的沟渠提取方法目前也在进一步探索之中,提出的方法有面向对象方法和深度学习方法<sup>[7]</sup>。其中,面向对象方法研究更为广泛<sup>[5-8, 11-12]</sup>,它可兼顾光谱、几何、空间关系等多种特征,融合最邻近法、决策树、支持向量机等多种分类算法。

现有无人机影像提取沟渠的方法中,在提高影像空间分辨率的同时,一定程度上增加了“异物同谱”的概率,导致植被覆盖的沟渠部分与植被地块、田块中有水区域与有水沟渠、裸地与无水沟渠等光谱相似的地物区分困难<sup>[5-7, 11]</sup>。此外,已有方法更多支持沟渠轮廓线的提取,对沟渠面状信息的提取还不成熟<sup>[8]</sup>。文章利用高精度无人机遥感影像,通过面向对象的分类思路与方法,开展典型平原河网地区的灌溉沟渠提取方法研究。研究目标是提出一种利用空间几何关系的沟渠面状信息优化提取方法,重点解决已有沟渠提取方法中因异物同谱导致的错分、漏分、中断等问题。

## 1 数据描述

### 1.1 研究区及测试样区

研究区位于江苏省北部的宿迁市泗阳县张家圩镇。宿迁泗阳地处淮河、沂沭泗流域中下游,境内有洪泽湖,地势低平、河流密布,属黄泛冲积平原,是典型的平原河网地区。丰富的水资源和发达的

水系为其高质量发展灌溉农业提供条件。张家圩镇位置如图 1 所示,配有完整的农业灌溉系统,人工沟渠纵横发达,与河流贯通,共同构成灌溉体系。近年来该镇作为农业水价综合改革试点,进行高标准节水灌溉系统建设,其中泵站灌溉范围的确定是重要的研究内容。为此,选择位于张家圩镇东南部的颜圩六斗灌溉区域作为研究区,地理范围为东经  $118^{\circ}41'19''$ 至  $118^{\circ}41'54''$ ,北纬  $33^{\circ}51'18''$ 至  $33^{\circ}51'53''$ 。研究区具有平原河网地区水文地貌和灌溉渠系的典型特征,对于平原地区沟渠提取方法的探索有代表性,同时对于确定泵站灌溉范围、实现节水灌溉有重要现实意义。研究区及重点测试样区如图 1 所示,重点从研究区中选择 3 个测试样区进行实验,其中测试样区为有衬沟渠、无衬沟渠和未种植耕地。

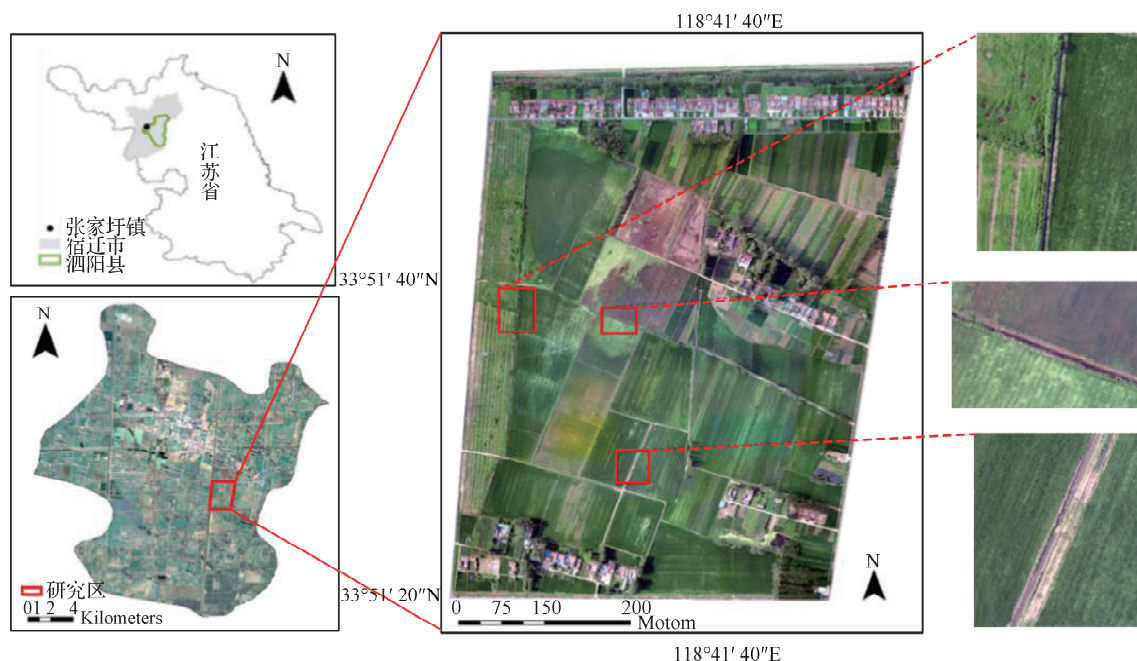


图 1 研究区位置、无人机影像及试验样区位置图

Fig.1 Location of the study area, unmanned aerial vehicle image and test sample area

## 1.2 数据获取与处理

采用无人机摄影测量技术获取数据,过程包括野外像片控制点布设、无人机航飞和业内处理。无人机航拍试验于 2021 年 7 月 19 日在江苏省宿迁市泗阳县张家圩镇颜圩村进行。首先,为确保数据精度,采用 GPS-RTK(全球定位系统,实时差分定位)方法,获取 31 个像片控制点。其次,通过控制点的空中三角进行测量,航拍时天气条件对无人机飞行干扰小,航线方向与垂直航线方向的像片平均重叠率均大于 75%。最后,基于像片控制点测量结果,利用摄影测量 Pix4d 软件完成加密,将无人机航拍获取的地面图像数据生成包含可见光红、绿、蓝 3 个波段、分辨率为 0.07 m 的数字正射影像。

## 2 方 法

### 2.1 总体方法流程

沟渠提取方法的总体流程如图 2 所示,包括 3 个主要步骤。第 1 步是采用多尺度分割方法,对无人机影像进行分割,关键是通过 ESP(尺度参数估计, Estimation of Scale Parameter) 参数估计工具<sup>[13]</sup>获得最优分割对象。第 2 步是采用最近邻分类策略,获得沟渠初始提取结果,关键是特征空间

确定。第 3 步是基于空间特征进行提取结果优化。优化过程是基于非沟渠和沟渠的长宽比、相对边界指标、边界规整度、面积进行样本训练,将训练得到的空间特征阈值应用于测试数据,从而完成沟渠提取优化。最后,以实测的人工目视解译结果为参照,对沟渠提取结果进行精度评价。

## 2.2 多尺度分割和最近邻分类

分割所得到的对象轮廓精度将直接影响到沟渠提取的精度<sup>[14]</sup>,研究采用多尺度分割方法<sup>[15]</sup>对影像进行分割。基于 ESP 工具原理,确定最优局部参数方法为:① 确定分割尺度参数范围  $[R_1, R_2]$ ;② 将形状参数和紧致度参数的范围设置为  $[0.1, 0.9]$ ,步长设置为 0.1,进行遍历组合;③ 通过 ESP 工具进行参数组合的迭代计算,将局部方差突变的参数视为潜在局部最优参数;④ 基于目视解译的地物轮廓为参考,确定几何对象差异参数的误差欧式距离 (Euclidian distance, ED)<sup>[16]</sup>,ED 值最小则为局部最优分割参数。

采用最近邻分类 (K nearest neighborhood, KNN) 方法进行沟渠提取,先对所有特征进行对象级计算,再通过重要性排序优化组合特征。根据研究区沟渠特征选择特征空间,包括红光均值、绿光均值、蓝光均值、红光标准差、绿光标准差和蓝光标准差。其中,均值特征能够反映地物光谱特征,标准差反映地表纹理特征。

## 2.3 基于空间特征的优化提取

### 2.3.1 基于空间几何特征的优化提取

针对沟渠提取中“异物同谱”导致的非沟渠对象被误判为沟渠对象这种情况,提出利用空间几何特征的优化提取,即利用沟渠与非沟渠在几何特征上的差异性,对与沟渠具有相同光谱特征的对象进行去除,从而提高沟渠提取的精度。文章研究的“异物同谱”主要是指耕地中的裸地部分和无衬干沟渠,两者的光谱相同但非同物。由于沟渠通常为狭长状地物,且通常边界较为规整,所以沟渠提取对象的长宽比值相对于非沟渠地物要大。且沟渠提取对象的轮廓比非沟渠对象规整,所以其边界规则度也有较显著的区别。

基于上述原理,将基于对象的长宽比及边界规整度作为剔除非沟渠对象的指标。长宽比中的“长”和“宽”分别指对象的最小外接矩形的长度和宽度,最小外接矩形是指该对象的凸多边形顶点所构成的面积最小的矩形。计算中,将平行于 X 轴的  $0^\circ$  设为外接矩形的起始角度,并按照  $1^\circ$  间隔进行逆时针旋转,当计算完  $0^\circ \sim 359^\circ$  的外接矩形后,选择面积最小的矩形为最小外接矩形,并将矩形两条边中相对长的边确定为长,相对短的边确定为宽。边界规整度是指实际周长和最小外接矩形周长的比值,分割对象的不规则程度越高,比值越大,反之比值越小。设分割对象为  $o$ ,该对象的最小外接矩形为  $r$ ,  $l_r$  为最小外接矩形的长度,  $w_r$  为最小外接矩形的宽度,  $l_o$  为对象的实际周长长度,则长宽比 ( $R$ ) 和边界规则度 ( $B$ ) 为:

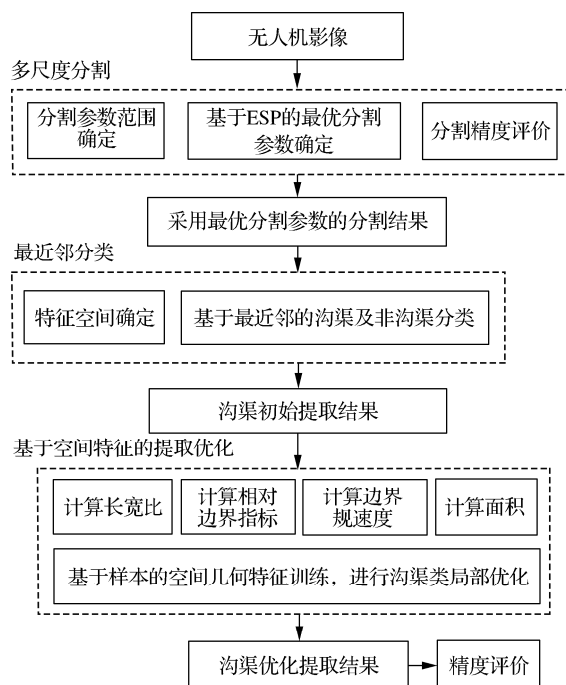


图 2 方法总体流程图

Fig.2 Overall flowchart of the method



$$R = \frac{l_r}{w_r} \quad (1)$$

$$B = \frac{l_o}{2(l_r + w_r)} \quad (2)$$

### 2.3.2 基于空间关系特征的优化提取

沟渠或沟渠两侧的植物覆盖常导致沟渠对象提取不完整(缺失或断裂),针对这一问题,提出利用空间关系特征的沟渠优化提取方法。空间关系特征主要是相对边界指标,一个对象的相对边界指标是指公共边长度与该对象周长的比值,其中公共边是指该对象和另外一个指定对象的重合边界长度,示意图如图3所示。

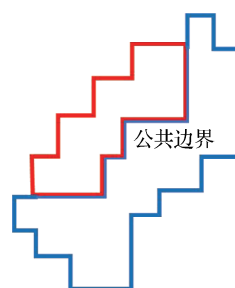


图3 公共边界示意图

Fig.3 Schematic diagram of public boundary

如果相对边界指标为0.5,则说明该对象的边界有一半是和另一指定对象结合;如果相对边界指标为1,则说明该对象被另一对象完全包裹,为嵌入其中的状态。设本对象为 $v$ ,  $l_v$ 表示本对象的周长,  $l_i$ 为本对象和另一对象公共边的长度,  $i$ 表示对象的个数( $i=1, 2, 3, \dots, n$ ),则相对边界指标 $X$ 为

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{l_v} \quad (3)$$

## 3 结果与分析

### 3.1 最优分割参数确定与分割结果

通过已有实验,将分割尺度参数的范围设定为 $[10, 110]$ ,并使用ESP工具进行迭代计算。在运行过程中,分割对象可变率(Rate of change, ROC)的突变较大处表示局部方差变化较大,可将其计入可能的最优参数候选序列。

通过对单个样区进行目视解译对比,认为形状因子及紧致度参数为0.3及0.6的组合时,平均ED值最低为0.102,因此将此组合设定为最优组合,其对应的3个候选最优分割参数分别为30, 61, 95(图4)。分别进行多尺度分割,结果如图5所示。从分割结果来看,尺度为61和95的分割结果对于沟渠的分割完整性较好,能够将沟渠的主体分割出来,有利于形状特征的判断。分割尺度为61的结果较之95的结果,除了保留了沟渠主体形态之外,对于其他地物的分割更为详细。尺度为30时对地物的分割较为细碎,沟渠和其他地物按照光谱特征得到了详细的分割,有利于利用空间关系进行断

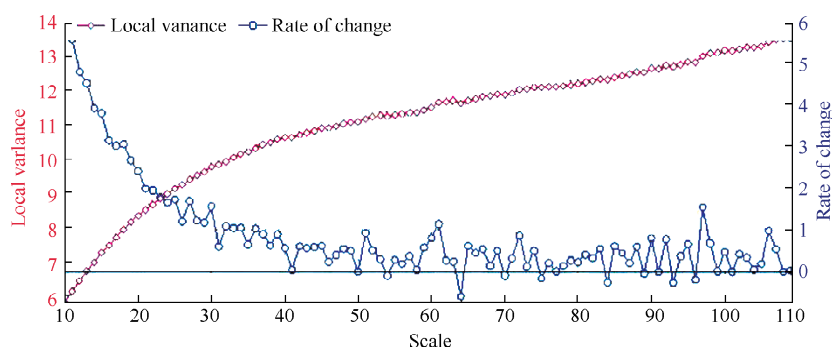


图4 ESP结果图

Fig.4 ESP output graph

连沟渠的融合处理。因此,采取 2 个层次分割,即在第 1 层次沟渠初始提取时,采用分割参数 61,有利于沟渠的主体提取;在第 2 层次沟渠优化提取时,采用分割参数 30,有利于沟渠的相邻地物融合,补偿因植被覆盖所导致的提取偏差。

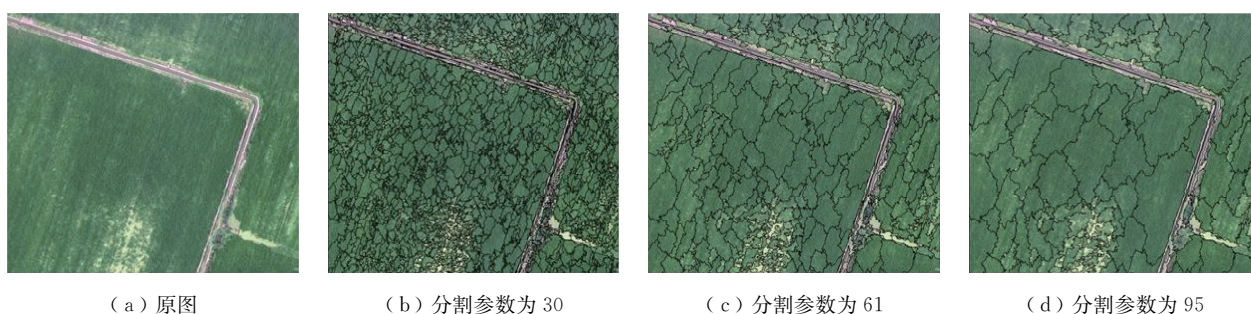


图 5 不同尺度分割效果对比

Fig.5 Segmentation results with different scales

### 3.2 基于最近邻的初始分类结果

通过最邻近分类,得到初步分类结果,如图 6 所示,沟渠得到基本提取,但存在较多干扰和漏判。干扰主要表现在由于试验区处于灌溉期,田间水多的地方呈现出和沟渠内光谱特征接近的特点,导致这些对象被错判为沟渠类;漏判则表现在由于数据获取正值夏季,沟渠内与两侧植被较盛,导致沟渠内植被覆盖部分被错判为非沟渠类,从而导致沟渠提取结果出现中断或者比实际要窄。针对这 2 种情况,分别采取基于空间几何特征和基于空间关系特征的优化分类。

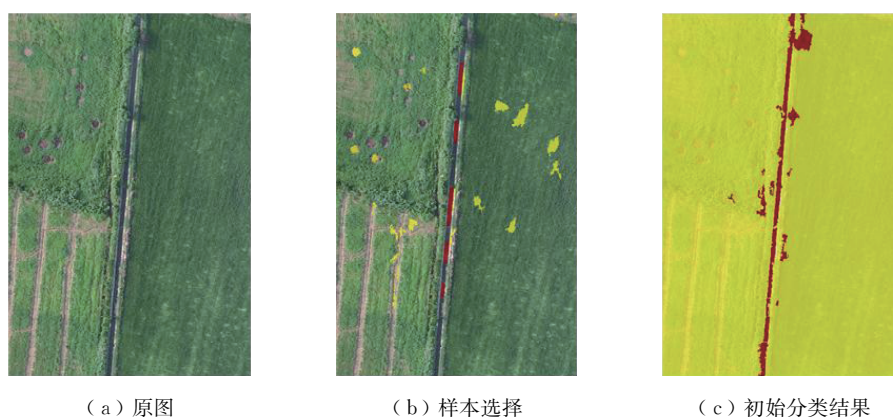


图 6 初始提取结果

Fig.6 Initial extraction results

### 3.3 基于空间特征的优化提取结果

利用空间特征进行优化提取包括利用空间几何特征(长宽比和边界规整度)和利用空间关系特征(相对边界)进行优化提取两部分。

对有衬沟渠样区进行空间特征计算,结果如图 7 所示。图 7 (a) 表示长宽比特征空间,亮度越高表示长宽比越大;图 7 (b) 表示边界规整度特征空间,亮度越低表示边界越规整;图 7 (c) 表示相对边界特征空间,亮度越高表示和沟渠类的公共边的比率越高。可见,沟渠的长宽比较之其他地物更大,且规整度较之其他地物更低。对特征空间进行阈值分割后,将长宽比设定为 $\geq 6.41$ ,边界规整度设定为 $\leq 1.53$ ,结合面积 $\geq 500$  像素,得到基于空间几何特征的优化提取结果,如图 8 所示。由图

8 可知,通过空间几何特征结合小面积去除,能够有效去除因异物同谱导致的非沟渠对象的干扰,得到沟渠类的主体。同时,沟渠内依然存在较多的断连和漏分,需要进一步使用空间关系特征进行沟渠类的补偿。

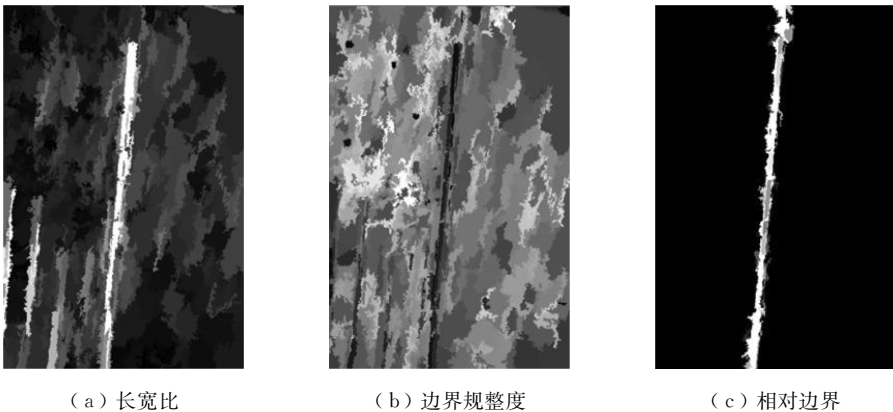


图 7 空间特征示意图

Fig.7 Schematic diagram of spatial features

在图 8 (b) 结果基础上,使用空间关系特征进行再优化,从而补偿水草和沟渠两边植被导致的沟渠漏分和断连现象。亮度越亮,表示和沟渠类的公共边的比率越高。因此,需要将与沟渠类结合紧密的非沟渠类进行优化,将阈值设定为 $\geq 0.8$ ,即与沟渠类有 80%公共边的非沟渠类设定为沟渠,其计算结果如图 9 所示。对比融合之前的结果与融合相对边界 $\geq 0.8$ 的非沟渠类的结果,可以发现,利用相对边界指标能够有效补偿漏分结果,并能够将较短的断连沟渠进行连接,起到沟渠补偿优化的效果。

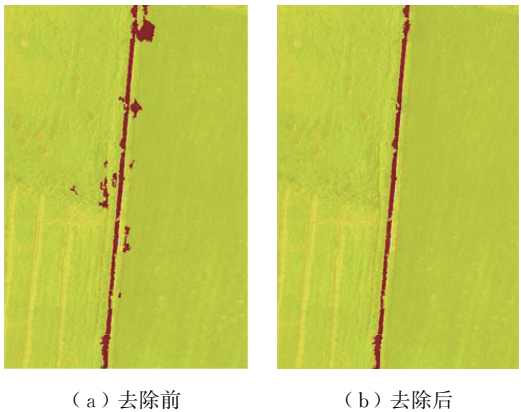


图 8 利用长宽比和边界规整度的非沟渠类去除结果

Fig.8 Non-ditch removal results using length width ratio

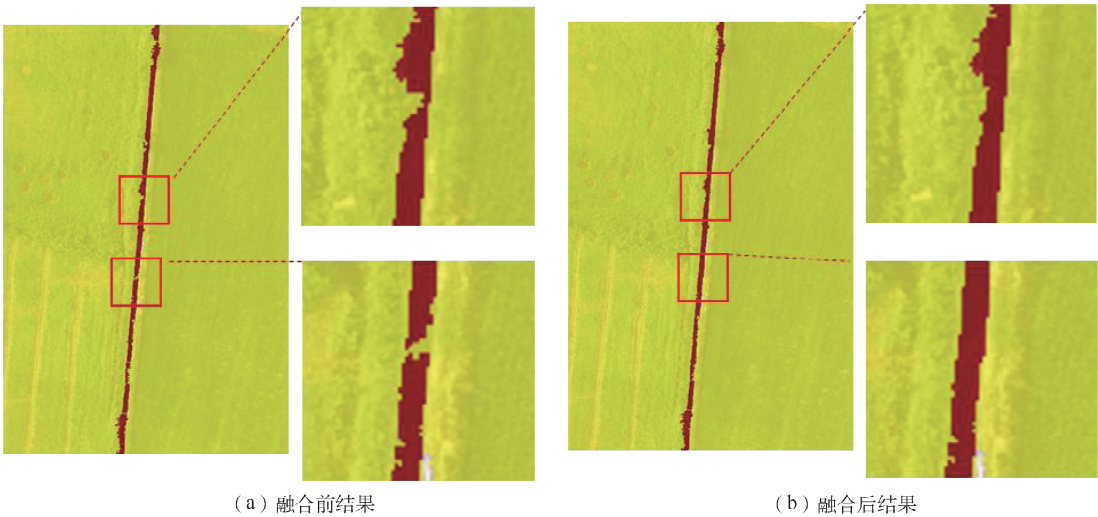


图 9 利用相对边界进行非沟渠类的融合结果

Fig.9 Fusion results of non-ditch classes using relative boundaries



对无衬沟渠样区和有裸地样区进行提取，其结果如图 10 所示。可以发现，使用空间特征能够有效去除干扰，并对植被导致的沟渠漏分断连进行补偿优化。

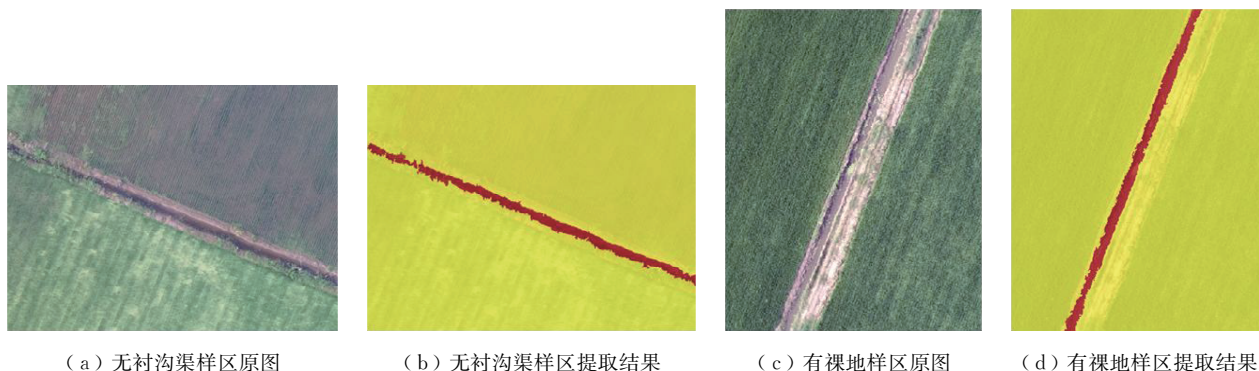


图 10 其他样区提取结果图

Fig.10 Extraction results of other sample areas

将自动提取结果和人工数字化结果构建为矢量文件，计算误差系数。误差系数的计算方法为

$$E = |b - a| / a \times 100\% \quad (4)$$

式中： $E$  表示误差系数； $a$  表示数字化面积， $\text{mm}^2$ ； $b$  表示提取面积， $\text{mm}^2$ 。

通过对有衬沟渠样区、无衬沟渠样区、包含未种植耕地的沟渠样区 3 个样区进行精度评价，得到误差系数分别为 7.5%，8.8%，6.7%，提取精度分别为 92.5%，91.2%，93.3%，平均提取精度为 92.3%。与优化前平均精度 84.7% 提高了 7.6%，表明利用空间特征优化平原地区灌溉沟渠提取方法，沟渠自动提取精度得到了明显提高。3 个样区的实验精度均高于 90%，表明该提取方法有一定的规律性，在沟渠是否有衬、是否存在裸地（未种植耕地）的不同情况下，提取效果均良好。比较有衬和无衬沟渠的提取结果，发现前者提取精度（92.5%）略高于后者（91.2%），体现了沟渠是否有衬对提取精度有一定影响。无衬沟渠，具有自然泥土表面，水草和周围杂草更加茂盛，从而影响提取效果。因此，该方法解决了植被部分遮盖沟渠导致的沟渠缺失和断连问题，但植被过于茂密导致的大范围沟渠断连还有待进一步探讨。此外，有裸地干扰的样区提取精度最高，表明该优化提取方法很好地解决了异物同谱导致的误判问题。

## 4 结 论

以典型平原河网地区的灌溉沟渠为研究对象，基于无人机影像和面向对象分类，提出一种利用空间特征对提取过程进行优化和补偿的灌溉沟渠提取方法。采用多尺度分割方法和 ESP 工具确定最优分割参数序列，并通过分割精度评价，确定了局部最优分割参数为 61。在影响分割基础上，进行基于光谱特征的初始提取和利用空间特征的优化提取。初始提取是通过光谱均值及标准差构建特征空间，使用最近邻方法获得初始分类结果。优化提取通过计算对象的长宽比、相对边界指标、边界规整度、面积等，利用样本进行特征训练，并将训练参数应用于初始结果，再分类获得沟渠优化提取结果。与目视解译结果对比进行精度评价，发现基于空间特征的沟渠优化提取的平均精度为 92.3%，比优化前的精度提升了 7.6%。利用空间特征的平原地区灌溉沟渠优化提取方法，能够有效解决因植被（水草及周边植被）覆盖而遮挡部分沟渠断面或异物同谱所导致的沟渠缺失及部分断连，实现了沟渠自动提取效果的提升，具有实际使用价值。

在实际生活中，由于水草及周边植被过于茂盛，经常会大范围遮挡沟渠，这种情况下，文章方法则难以完成所有的补偿遮挡及联通断连，需要人工辅助解决，这也是下一步要做的工作。

## 参考文献:

- [1] NAGARAJ D, PROUST E, TODESCHINI A, et al. A new dataset of global irrigation areas from 2001 to 2015[J]. *Advances in Water Resources*, 2021, 152: 103910.
- [2] JÄGERMEYR J, PASTOR A, BIEMANS H, et al. Reconciling irrigated food production with environmental flows for sustainable development goals implementation[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 15900.
- [3] CHAO Z H, FANG X, NA J M, et al. A collaborative sensing system for farmland water conservancy project maintenance through integrating satellite, aerial, and ground observations[J]. *Water*, 2021, 13(16): 2163.
- [4] 李健, 徐旭. 基于无人机影像的煤场工程量监测分析[J]. *常州大学学报(自然科学版)*, 2019, 31(2): 35-43.
- [5] 韩文霆, 郭聪聪, 张立元, 等. 基于无人机遥感的灌区土地利用与覆被分类方法[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(11): 270-277.
- [6] 韩文霆, 张立元, 张海鑫, 等. 基于无人机遥感与面向对象法的田间渠系分布信息提取[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(3): 205-214.
- [7] 张自超, 韩宇, 陈建, 等. 基于无人机遥感数据的生态渠系信息提取[J]. *排灌机械工程学报*, 2018, 36(10): 1006-1011.
- [8] 张宏鸣, 王斌, 韩文霆, 等. 基于全卷积神经网络的灌区无人机正射影像渠系提取[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(6): 241-248.
- [9] CAZORZI F, FONTANA G D, DE LUCA A, et al. Drainage network detection and assessment of network storage capacity in agrarian landscape[J]. *Hydrological Processes*, 2013, 27(4): 541-553.
- [10] SAH R K, DAS A K. Drainage skeletonization from flow-accumulated area without the use of threshold[J]. *Geocarto International*, 2015, 30(8): 894-904.
- [11] 张宏鸣, 任强, 韩文霆, 等. 基于 SVM 的灌区无人机影像渠系提取[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(2): 141-148.
- [12] 顾铮鸣, 金晓斌, 杨晓艳, 等. 基于无人机遥感影像监测土地整治项目道路沟渠利用情况[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(23): 85-93.
- [13] DRĂGUT L, TIEDE D, LEVICK S R. 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.
- [14] LOURENCO P, TEODORO A C, GONCALVES J A, et al. Assessing the performance of different OBIA software approaches for mapping invasive alien plants along roads with remote sensing data[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021, 95: 102263.
- [15] BAATZ M. Multiresolution segmentation: an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation[J]. *Angewandte Geographische Informations-verarbeitung*, 2000, 22(3): 12-23.
- [16] 刘凯. 基于多源数据的黄土高原(重点流失区)侵蚀沟提取及区域差异性研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2017.

(责任编辑:李艳,周安迪)