

doi: 10.12029/gc20210604

张景华, 欧阳渊, 陈远智, 李富, 刘小霞, 刘洪, 赵银兵. 2021. 基于无人机遥感的四川省昭觉县农业产业园土地适宜性评价[J]. 中国地质, 48(6): 1710–1719.

Zhang Jinghua, Ouyang Yuan, Chen Yuanzhi, Li Fu, Liu Xiaoxia, Liu Hong, Zhao Yinbing. 2021. Land suitability evaluation of agricultural industrial park based on UAV remote sensing in Zhaojue County of Sichuan Province[J]. *Geology in China*, 48(6): 1710–1719(in Chinese with English abstract).

基于无人机遥感的四川省昭觉县农业产业园 土地适宜性评价

张景华¹, 欧阳渊¹, 陈远智², 李富¹, 刘小霞¹, 刘洪¹, 赵银兵³

(1. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081; 2. 四川省昭觉县农业农村局, 四川 昭觉 616150; 3. 成都理工大学, 四川 成都 610059)

摘要: 昭觉县是大凉山腹地的典型彝族聚居县,也是国家级深度贫困县,以传统农业居多,为推动农业发展方式的转变,昭觉县开展了现代农业园建设。笔者通过无人机航测,获取了拟建园区的高分辨率影像,使用面向对象的影像分析软件,快速提取了土地利用现状等信息,结合收集的其他资料,筛选了坡度、坡向、断层、地质灾害、土地利用、灌溉、交通、自然保护区 8 个评价因子,在 GIS 的支持下,先开展单因子土地适应性评价,然后进行综合评价。结果显示:拟建园区土地适宜性以适宜性高和适宜性较高等级为主,二者合计 2.56 km²、占 79.26%,超过 3/4,土地适宜性好,适宜建设现代农业产业园,适合建设标准化蔬菜温室大棚和露地蔬菜种植基地,建成后,不但可以为周边地市提供蔬菜供应,还可带动园区周围农户增收,促进周围农户脱贫,发展前景好。小型无人机遥感系统具有机动灵活、成本低的优势,能快速获取小区域、大尺度农业产业园区的基础数据,在西南地区小区域土地适宜性评价中应用效果好。小区域土地的自然环境与社会环境相对单一,许多大区域土地适宜性评价指标并不完全适用,需要根据土地利用的主要目的选择合适的评价指标。

关键词: 无人机遥感; 农业产业园; 土地适宜性; 评价; 生态地质调查工程; 昭觉县; 四川省
中图分类号: P627; F301.2 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2021)06-1710-10

Land suitability evaluation of agricultural industrial park based on UAV remote sensing in Zhaojue County of Sichuan Province

ZHANG Jinghua¹, OUYANG Yuan¹, CHEN Yuanzhi², LI Fu¹,
LIU Xiaoxia¹, LIU Hong¹, ZHAO Yinbing³

(1. Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China; 2. Agricultural and Rural Bureau of Zhaojue County, Zhaojue 616150, Sichuan, China; 3. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China)

Abstract: Zhaojue County is a typical Yi-inhabited County in the hinterland of Daliang Mountain. It is also a state-level deeply

收稿日期: 2020-06-12; 改回日期: 2020-08-01

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20190542)资助。

作者简介: 张景华, 男, 1978 年生, 高级工程师, 主要从事遥感与生态环境研究; E-mail: zjinghua@mail.cgs.gov.cn。

通讯作者: 欧阳渊, 男, 1982 年生, 高级工程师, 主要从事遥感与生态环境研究; E-mail: freebad@126.com。

impoverished county with traditional agriculture as the main living means. In order to promote the transformation of agricultural development mode, modern agricultural park has been constructed in Zhaojue County. Through Unmanned Aerial Vehicle(UAV) aerial survey, the high-resolution images of the proposed park were obtained, and object-oriented image analysis software was used to quickly extract land use status and other information. Combined with other collected data, eight evaluation factors were selected, including slope, aspect, fault, geological hazard, land use, irrigation, transportation and nature reserve. With the support of Geographic Information System (GIS), the single-factor of land adaptability was evaluated first, and then the comprehensive evaluation was conducted. The results show that the land suitability of the proposed park is much suitable, with the total area of 2.56 km², accounting for 79.26%, more than 3/4. It is suitable for building a modern agricultural industrial park, standardized vegetable greenhouses, and open field vegetable cultivation base. After construction, it will not only provide vegetable supply to the surrounding cities, but also increase the income of farmers around the park, and promote the poverty alleviation of farmers around the park, showing good development prospects. Small UAV remote sensing system has the advantages of flexibility and low cost. It can quickly obtain the basic data of small area and large-scale agricultural industrial park, and has ideal application effect in land suitability evaluation of small areas in Southwest China. The natural environment and social environment of small area land are relatively single, and many large regional land suitability evaluation indexes are not fully applicable, so it is necessary to select appropriate evaluation indexes according to the main purpose of land use.

Key words: UAV remote sensing; Zhaojue County; agricultural industrial park; land suitability; evaluation; ecological geological survey engineering

About the first author: ZHANG Jinghua, male, born in 1978, senior engineer, engaged in the study of remote sensing and ecological environment; E-mail: zjinghua@mail.cgs.gov.cn.

About the corresponding author: OUYANG Yuan, male, born in 1982, senior engineer, mainly engaged in the study of remote sensing and ecological environment; E-mail: freebad@126.com.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey (No. DD20190542).

1 引言

无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)是一种无人驾驶的航空器(Watts et al., 2012),无人机遥感系统(UAV remote sensing system, UAVRSS)指使用无人机平台搭载各种传感器获取遥感数据的无人航空遥感与摄影测量系统(李德仁等, 2014)。近年来,无人机遥感技术飞速发展,已经从研究阶段向实用化阶段发展(范承啸等, 2009),被普遍认为具有良好的发展前景(毕凯等, 2015),广泛应用于包括地质、林业、农业、城市规划等各个领域(向杰等, 2018; 孙长奎等, 2018; 梁林林等, 2019; 金鼎坚等, 2019; 王俊豪等, 2020),因其具有分辨率高、机动灵活等优势,在南方山区地物信息提取和土地适宜性评价等方面有着广泛应用(陈桥驿, 2019; 娄佩卿等, 2020)。

昭觉县位于四川省凉山彝族自治州东部的大凉山腹地,是典型的彝族聚居县,也是国家级深度贫困县。2018年2月11日,习近平总书记曾亲赴昭觉县,

考察脱贫攻坚活动(新华网, 2018)。昭觉县独特的土壤与气候为特色马铃薯、荞麦、燕麦以及牧草等生长发育提供了得天独厚的优越条件,但受地理、历史等原因影响,以传统农业居多,效益较差,为充分利用资源,推动农业发展方式的转变,昭觉县引入了大型龙头企业,开展了现代农业产业园建设。无人机遥感获取的影像分辨率高,具有丰富的空间信息和明显的几何与纹理特征,能够更好地提取土地类别等属性信息(鲁恒等, 2011; 何少林等, 2013),在农村土地整治和乡村规划等方面得到了广泛应用(胡勇等, 2016)。在实施大凉山区生态地质调查项目过程中,笔者通过无人机航测,获得了昭觉县拟建农业产业园区的数字正射影像图(Digital Orthophoto Map, DOM)和数字表面模型(Digital Surface Model, DSM),采用面向对象的分类方法,快速提取了园区的各种信息,在此基础上结合收集的资料开展了土地适宜性评价,为昭觉县现代农业产业园的规划与建设提供了参考依据与基础图件,也使公益性地质调查工作服务于脱贫攻坚工作。

2 研究区概况

研究区为昭觉县即将开展建设的涪昭现代农业产业园,位于四川省凉山彝族自治州昭觉县四开乡的好谷村和洛且吾村,地理坐标为 $27^{\circ}55'10'' \sim 27^{\circ}56'10''N$ 、 $102^{\circ}44'59'' \sim 102^{\circ}46'56''E$,紧邻S307省道,距西昌市区85 km,距昭觉县城22 km,县城东北的竹核乡有温泉出露(卢丽等,2021),未来将有乐西(乐山—西昌)高速公路过境,可快速到达成都、昆明等省会城市及西昌、宜宾、乐山等州市,交通较为方便快捷。

昭觉县地处川滇南北向构造带。研究区地质环境相对简单,处于昭觉向斜的西翼,出露的地层为三叠系白果湾组(T_3bg)和第四系(Q)。三叠系白果湾组为一套陆相砂质碎屑岩建造(刘洪等,2020;张腾蛟等,2020),上部为灰色、灰黄色泥岩、粉砂岩、页岩夹石英砂岩,下部为灰色、深灰色长石石英砂岩、粉砂岩、炭质页岩夹煤线。第四系(Q)为亚砂土、亚黏土构成的河流阶地。无人机测区为狭长的中山山间盆地,平面形状整体呈倒卧的“L”形(图2),面积约 6 km^2 ,盆地底部地形平坦,海拔约2110 m,主要障碍物为农村居民点、树木、电杆等,四周山岭环绕,海拔2200~2600 m,靠近山坡两侧高差大、地形复杂,山地垂直气候特征显著,天气多变,白天日照强烈温度高、夜晚温度低,昼夜温差大,易形成山谷风,风速大、风向多变,谷风风速大于山风风速



图1 无人机起飞照片
Fig.1 Photo of UAV taking off

(孙毅,2014),靠近山坡一带易遭遇低空风切变,于飞行安全不利。

3 无人机摄影数据获取与处理

3.1 像控点布设与测量

由于无人机通常搭载的是非测量单反相机,像幅小、畸变大,为改善精度,需要用到地面控制点(买小争等,2012;朱进等,2012;厉芳婷等,2017;李万能等,2017)。采用传统的摄影测量布点方式,不但增加控制点数量,而且实施起来比较困难(陈鹏飞等,2017)。因此,考虑本次研究的主要目的,没有按照传统航测布设方式来布设像控点,而是根据实际需要,以控制整个测区为原则布设像控点,选择平缓水泥地面等高反射地表以现场涂刷标识布设像控点,共布设像控点16个,其中控制点12个(编号:P001~P012),检查点4个(编号:C001~C004)。像控点覆盖了整个测区边缘与中心,在测区内分布均匀。使用RTK(Real-time kinematic,实时动态)实时链接CORS(Continue Operation Reference System of Differential GPS Satellite Navigation and Positioning,差分GPS连续运行参考站系统)进行差分测量,并拍照、记录整理成文档。

3.2 航空摄影与数据处理

外业航空摄影采用CRS-III垂直起降固定翼电动无人机(图1)搭载Nikon D810相机进行,飞机与相机参数见表1。实际航测面积 5.57 km^2 ,相对航高287 m(海拔2397 m),航向重叠度75%、旁向重叠度65%,飞行航线见图2,共获取测区无人机影像755张,影像地面分辨率(Ground Sampling Distance,

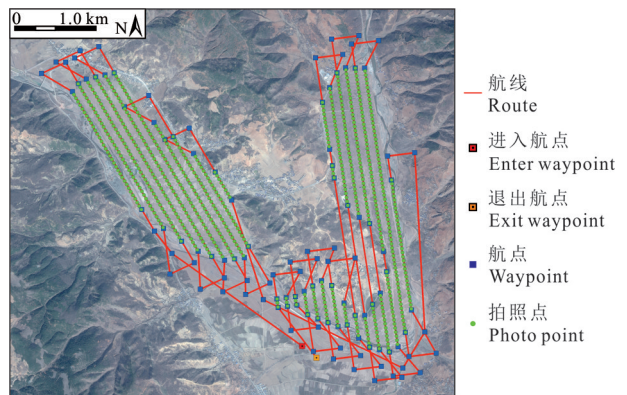


图2 飞行航线图
Fig.2 Flight route map

表1 无人机及相机主要技术指标

Table 1 Main technical specifications of UAV and camera

CRS-III 无人机		Nikon D810 相机	
全长	1.97 m	传感器类型	全画幅 CMOS
翼展	3.6 m	传感器尺寸	35.9 mm×24 mm
最大起飞重量	26 kg	像元大小	4.88 μm
最大任务载荷	3 kg	图像分辨率	7360×4912
最大爬升率	6 m/s	有效像素	3638 万
海平面最大平飞速度	115 km/h	焦距	35 mm
最大作业高度	海拔 3500 m	感光度	ISO 64~12800
巡航速度	70~100 km/h	曝光补偿	-5~+5 EV
最大抗风能力	4 级	快门速度	30 s~1/8000 s
最大续航时间	2 h	连拍速度	5 fps(FX 模式)
起降方式	垂直起降	图像记录类型	RAW、TIFF、JPEG

表2 控制点均方根误差

Table 2 RMSE of ground control points

控制点号	Error X/m	Error Y/m	Error Z/m
P001	-0.008	-0.032	-0.005
P002	-0.002	-0.014	0.002
P003	-0.027	-0.048	-0.007
P004	0.049	0.078	0.012
P005	-0.007	-0.010	-0.001
P006	0.004	-0.011	-0.002
P007	-0.006	0.027	-0.005
P008	-0.018	-0.027	-0.004
P009	-0.012	-0.002	-0.003
P010	0.017	-0.012	0.006
P011	-0.006	0.039	0.027
P012	0.000	-0.033	-0.004
均方根误差/m	0.0185	0.0342	0.0094

GSD)为0.04 m,经检查,影像纹理清晰、色调均匀、反差适中。在无人机数据处理软件中导入影像和 POS 数据,完成像控点刺点,进行空中三角测量和区域网平差,最后生成 DOM 和 DSM(图3)。

3.3 精度评价

由控制点均方根误差(表2)可知,控制点平面位置 X 方向误差最大为0.049 m、最小0 m、均方根误差为0.0185 m,平面位置 Y 方向误差最大为0.078 m、最小-0.002 m、均方根误差为0.0342 m,高程(Z 方向)误差最大为0.027 m、最小-0.001 m、均方根误差为0.0094 m。由检查点均方根误差(表3)可知,检查点平面位置 X 方向误差最大为0.024 m、最小0.006 m、均方根误差为0.0142 m,平面位置 Y 方向

表3 检查点均方根误差

Table 3 RMSE of check points

检查点号	Error X/m	Error Y/m	Error Z/m
C001	0.024	0.044	0.012
C002	0.006	0.027	0.007
C003	0.010	0.041	-0.024
C004	-0.010	-0.024	0.000
均方根误差/m	0.0142	0.0351	0.0139

误差最大为0.044 m、最小-0.024 m、均方根误差为0.0351 m,高程(Z 方向)误差最大为-0.024 m、最小0 m、均方根误差为0.0139 m;表明空中三角测量精度较高,能够满足需求。

4 信息提取

无人机遥感影像空间分辨率高,然而搭载的多为普通单反相机,成像波谱位于可见光波段,缺乏光谱信息,基于光谱信息的分类方法不太适用无人机影像分类,因此,对于无人机影像分类,多采用面向对象的分类方法(Benz et al., 2003; Yu et al., 2006; Ma et al., 2014)。面向对象的影像分析软件从空间和波谱两方面进行影像信息提取,与像素层面的信息提取方法相比,软件对影像分析和理解的层次都有了很大的提高和进步(王文宇等,2006;李敏等,2008)。本次研究,以 DOM 为基础数据,以面向对象的分类方法,提取了拟建园区的土地利用等信息,辅以少量的人工编辑,快速获得了拟建园区的土地利用现状图(图4)及各地类的面积(表4)。从表4可知,拟建园区土地利用类型简单,以水田和旱地为主,二者合计2.96 km²、占91.64%,占绝大多数。通过对提取的路网和沟渠进行统计,拟建园区内有呈网状分布的沟渠17.14 km,与S307省道连接的农村道路7.96 km,发展农业的灌溉、道路等基础设施较全,适合建设现代农业产业园。

5 土地适宜性评价

适宜性一般指一定地域内某种特定开发活动是否适合土地或国土空间的基础条件和能力,已成为微观土地单位利用优化的基础工作(吴次芳等,2019),土地适宜性评价是土地利用规划和合理利用土地的重要手段与基础工作(史同广等,2007),对拟建园区进行土地适宜性评价是建设现代农业产业园的前提。

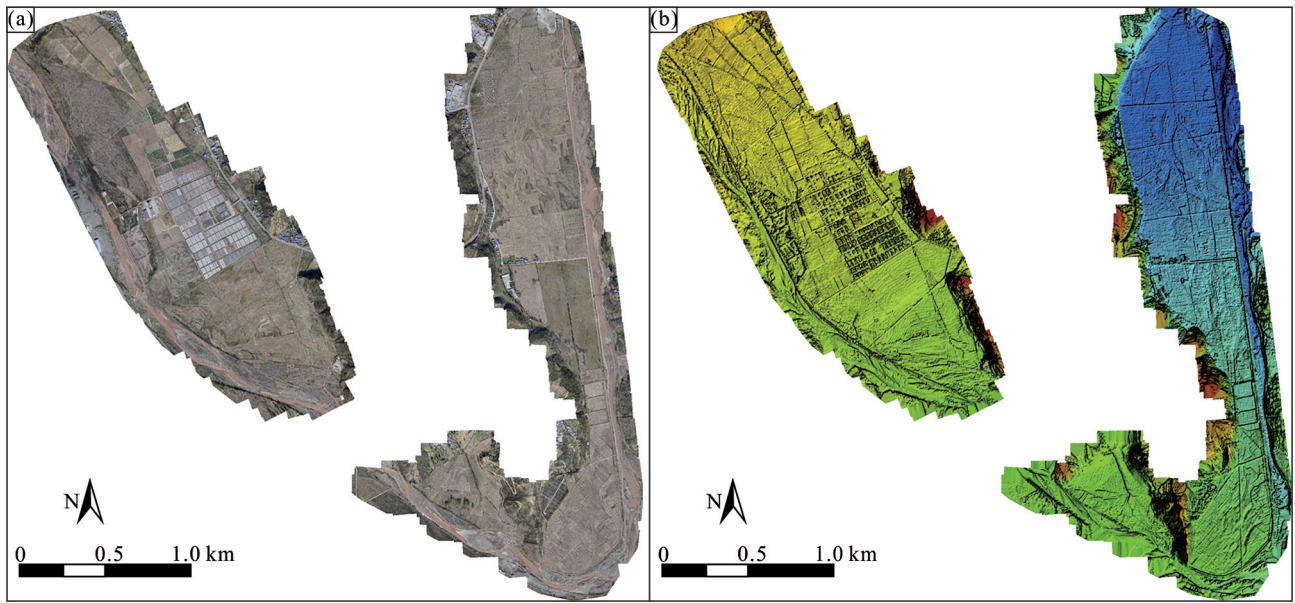


图3 数字正射影像图和数字表面模型

Fig.3 Digital orthophoto map and digital surface model

5.1 评价指标

评价指标既要科学合理,又要能度量研究区的适宜性,同时还要具有较好的可操作性。不同于区域性(如县市、地市等)土地适宜性评价,本次研究区面积很小,尚不及4 km²,由于面积小,自然环境与社会环境相对单一,而且,评价的目的也单一,许多针对大区域的土地适宜性评价指标并不完全适用

于本次研究。因此,参考其他学者的研究成果(陈燕飞等,2006;关小克等,2010;曲衍波等,2010;崔勇等,2014;余飞等,2021),根据拟建园区的特点及建设目的,考虑工程建设和农业生产两个主要目标,从地形条件、地质环境条件和农业生产条件等影响产业园建设与运行的3个方面进行分析,筛选了坡度、坡向、断层、地质灾害、土地利用、灌溉、交通、自然保护区8个因子作为评价指标,并对评价指标进行分级划分与赋值(表5),根据分值将适宜性从高到低分为适宜性高、适宜性较高、适宜性中、适宜性较低、适宜性低5个等级。

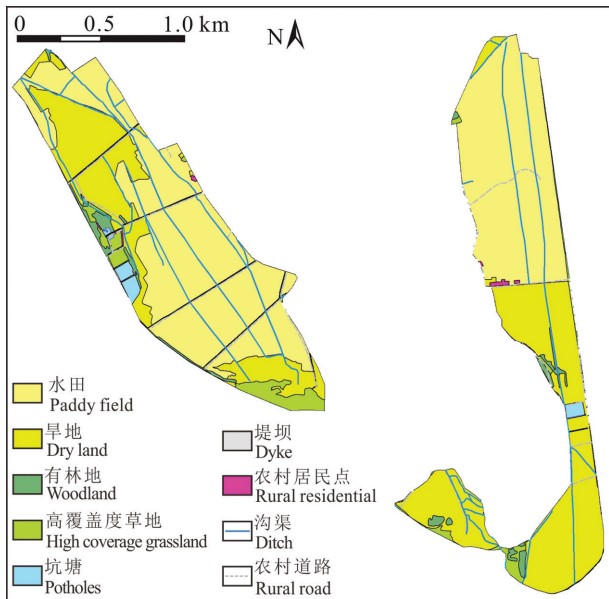


图4 土地利用现状图

Fig.4 Current status of land use

5.2 数据来源

评价数据包括从无人机航测获得的DOM中提取的土地利用现状图及路网与沟渠数据、由DSM经编辑获得的DEM(Digital Elevation Model)、昭觉县地质图、昭觉县地质灾害易发分区图、昭觉县交通图、四川省自然保护区分布图等,并对各类数据进行处理,统一转换为Gauss Kruger投影,为单因子和综合评价做好准备。

5.3 土地适宜性评价

在GIS(Geographic Information System)支持下,先进行单因子土地适宜性评价,然后将所有单因子评价图进行叠加,开展土地适宜性综合评价。由于拟建园区面积小,自然环境与社会环境单一,

表4 土地利用类型统计

Table 4 Statistics of land use types

地类	面积/km ²	百分比/%
水田	1.80	55.73
旱地	1.16	35.91
有林地	0.07	2.17
高覆盖度草地	0.13	4.02
坑塘	0.03	0.93
堤坝	0.01	0.31
农村居民点	0.01	0.31
公路	0.02	0.62
合计	3.23	100.00

注:只提取了拟建园区的信息,小于航测面积。

规律性不明显,难以确定主导因子,无法根据各因子的主导性大小赋以不同的权重,因此,采用等权叠加进行评价。

5.3.1 单因子评价

采用DEM分别进行坡度和坡向分析,获得坡度图和坡向图并重分类,得到土地适宜性坡度单因子评价图(图5a)和坡向单因子评价图(图5b);从昭觉县地质图中提取断层线,进行多环缓冲区分析并赋值,然后转为栅格图像,得到土地适宜性断层单因子评价图(图5c);从昭觉县地质灾害易发分区图中提取分区图层并赋值,然后转为栅格图像,得到土地适宜性地质灾害单因子评价图(图5d);对土地利用现状图赋值,然后转为栅格图像,得到土地适宜性土地利用单因子评价图(图5e);以沟渠图层为基础数据,进行多环缓冲区分析并赋值,然后转为栅格图像,得到土地适宜性灌溉单因子评价图(图5f);以昭觉县交通图和四川省自然保护区分布图为基础数据,与拟建园区范围图层进行空间分析,提

取交通信息与保护区信息,然后赋值并转为栅格图像,得到土地适宜性交通单因子评价图(图5g)和自然保护区单因子评价图(图5h)。

5.3.2 综合评价

单因子土地适宜性评价图只反映了1种因子下的土地适宜性,要将土地适宜性的差异综合地反映出来,需要将所有因子的土地适宜性评价图进行叠加,开展综合评价,采用如下公式计算土地适宜性:

$$SS_j = \sqrt[8]{\prod_{i=1}^8 S_i} \quad (1)$$

式中:SS_j为j空间单元土地适宜性,S_i为i因子土地适宜性等级分值。然后在GIS中对得到的结果采用自然间断点分级法^①分成适宜性高、适宜性较高、适宜性中、适宜性较低和适宜性低5级,得到土地适宜性评价图(图6),并从中导出属性,统计各土地适宜性等级的面积与百分比(表6)。

5.4 结果分析

5.4.1 土地适宜性空间分异特征

拟建园区土地适宜性以适宜性高和适宜性较高等级为主,二者合计2.56 km²、占79.26%,超过3/4,而适宜性较低和适宜性低的区域面积仅为0.17 km²、仅占5.26%,从统计数据来看,土地适宜性好,适宜建设现代农业产业园。

从土地适宜性空间分布来看,适宜性高和适宜性较高的区域呈连片分布,而适宜性较低和适宜性低的区域仅分布于拟建园区的边缘,且呈集中分布,与土地利用分类的坑塘和农村居民点具有很好的对应关系(图4,图6)。由于这些区域面积小、分布集中,在“政府主导、企业运作、群众参与”的产业发展模式下,容易完成土地流转、田型调整及沟路改造等工作,不会对产业园区建设造成大的干扰,

表5 土地适宜性评价指标

Table 5 Indicators of land suitability evaluation

评价因子	适宜性高	适宜性较高	适宜性中	适宜性较低	适宜性低
坡度	<2°	2°~5°	5°~8°	8°~15°	>15°
坡向	水平、南	东南、西南	东、西	东北、西北	北
断层	>400 m	300~400 m	200~300 m	100~200 m	<100 m
地质灾害	不易发区	低易发区	中易发区	高易发区	极易发区
土地利用	耕地、园地	草地	林地	建设用地	水域
灌溉	<50 m	50~100 m	100~150 m	150~200 m	>200 m
交通	高速、高铁联通	国道、省道、铁路联通	县道、乡道联通	农村公路联通	不通公路、铁路
自然保护区	>1 km	0.8~1 km	0.5~0.8 km	0~0.5 km	保护区内
分级赋值	9	7	5	3	1

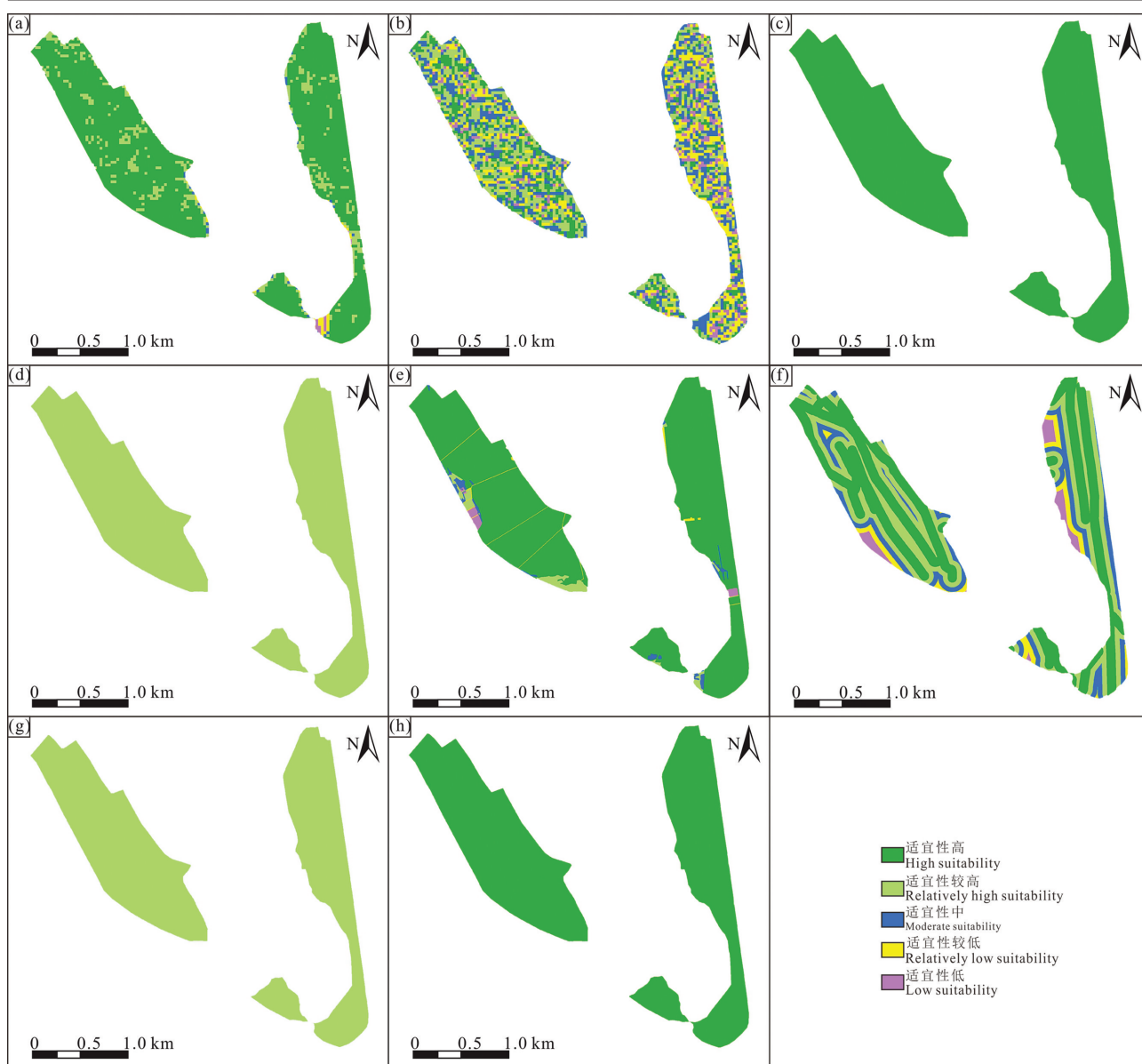


图5 单因子土地适宜性评价图
Fig.5 Single factor chart of land suitability evaluation

因此,从土地适宜性空间分布特征而言,也适宜建设现代农业产业园。

5.4.2 园区开发建议

拟建园区位于中山山谷盆地底部的河流阶地上,地形平坦,平均海拔2110 m左右,日照充足,昼夜温差大,依托S307省道和即将建成的乐西高速公路带来的便利交通条件,适合建设综合性现代农业园区,宜发展特色蔬菜种植业,种植各种食用菌、反季节蔬菜、高山蔬菜等。建议采取“政府主导、企业运作、群众参与”的运营模式,建设标准化蔬菜温室

大棚及蔬菜预冷库房、拣选车间、植株组培实验室、食用菌标准化工厂化生产车间、农技培训中心、电商服务中心等配套附属设施,使之成为标准化蔬菜温室大棚和露地蔬菜种植基地。园区建成后,不但可以为周边地市提供蔬菜供应,通过农业雇工,还可带动产业园区周围农户增收,有力促进周围农户脱贫。到2023年,随着乐西(乐山—西昌)高速公路全线通车,通过高速公路网,园区农产品可快速送达成都、昆明等省会城市及西昌、宜宾、乐山等周边城市,应该说,发展前景较好。

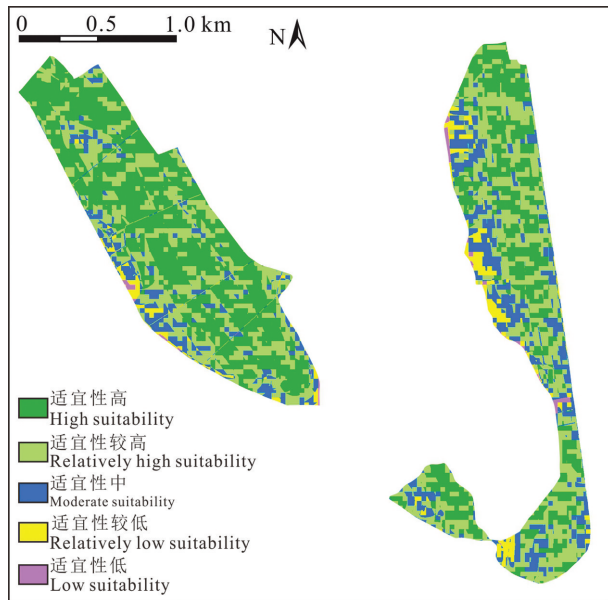


图6 土地适宜性评价图

Fig.6 Land suitability evaluation map

表6 土地适宜性统计

Table 6 The area and percentage of each land suitability class

土地适宜性分级	面积/km ²	百分比/%
适宜性高	1.36	42.11
适宜性较高	1.20	37.15
适宜性中	0.50	15.48
适宜性较低	0.15	4.64
适宜性低	0.02	0.62
合计	3.23	100.00

6 结论

(1)小型无人机遥感系统机动灵活,可以低成本获取地表高分辨率影像,影像具有丰富的空间信息和明显的几何与纹理特征,使用面向对象的影像分析软件能够快速提取土地利用现状等信息,在小区域土地适宜性评价中应用效果好。

(2)不同于大区域土地适宜性评价,小区域土地的自然环境与社会环境相对单一,许多大区域土地适宜性评价指标并不完全适用,需要根据土地利用的主要目的选择合适的评价指标。

(3)拟建园区土地适宜性以适宜性高和适宜性较高等级为主,且空间上连片分布,适宜建设综合性现代农业园区,适合建设标准化蔬菜温室大棚和露地蔬菜种植基地,建成后,不但可以为周边城市

提供蔬菜供应,还可带动园区周围农户增收,促进周围农户脱贫,发展前景好。

致谢:在野外工作和论文编写过程中,得到了中国地质调查局成都地质调查中心黄勇高级工程师、黄瀚霄高级工程师和张腾蛟博士的指导和帮助,审稿专家及编辑部老师为完善本文提出了许多宝贵的意见和建议,在此表示衷心感谢!

注释

①自然间断点分级法基于数据中固有的自然分组,对分类间隔加以识别,可对相似值进行最恰当地分组,并可使各个类之间的差异最大化。要素将被划分为多个类,对于这些类,会在数据值的差异相对较大的位置处设置其边界。

References

- Benz U C, Hofmann P, Willhauck G, Lingenfelder I, Heynen M. 2003. Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information[J]. *Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 58: 239-258.
- Bi Kai, Li Yingcheng, Ding Xiaobo, Liu Fei. 2014. Aerial photogrammetric technology of light small UAV: Status and trend of development[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (3): 27-31 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yanfei, Du Pengfei, Zheng Xiaojin, Lin Jin. 2006. Evaluation on ecological applicability of land construction in Nanning City based on GIS[J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 46(6): 801-804(in Chinese with English abstract).
- Cui Yong, Liu Zhiwei. 2014. A GIS-based approach for suitability evaluation of high standard primary farmland consolidation: A case from Huairou in Beijing[J]. *China Land Sciences*, 28(9): 76-81,94-95(in Chinese with English abstract).
- Chen Pengfei, Hu Haifeng, Lian Xugang, Du Yongjun. 2017. On influence of post-processed difference technique and image control point density on UAV photogrammetry accuracy[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (11): 144-147(in Chinese with English abstract).
- Chen Qiaoyi. 2019. Application of UAV aerial survey technology in suitability analysis of construction[J]. *Beijing Surveying and Mapping*, 33(8):995-968(in Chinese with English abstract).
- Fan Chengxiao, Han Jun, Xiong Zhijun, Zhao Yi. 2009. Application and status of unmanned aerial vehicle remote sensing technology[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 34(5):214-215 (in Chinese with English abstract).
- Guan Xiaoke, Zhang Fengrong, Guo Lina, Zhao Tingting. 2010. A suitability evaluation of cultivated land in Beijing for multi-purposes use and its spatio-temporal investigation[J]. *Resources Science*, 32(3):580-587(in Chinese with English abstract).

- He Shaolin, Xu Jinghua, Zhang Shuaiyi. 2013. Land use classification of object-oriented multi-scale by UAV image[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 25(2): 107–112(in Chinese with English abstract).
- Hu Yong, Zhang Xiaocheng, Ma Zezhong, Zhou Zhiyue. 2016. Rural residential area extraction from UAV remote sensing imagery[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 28(3): 96–101(in Chinese with English abstract).
- Jin Dingjian, Wang Jianchao, Wu Fang, Gao Zihong, Han Yachao, Li Qi. 2019. Aerial remote sensing technology and its applications in geological survey[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 31(4): 1–10(in Chinese with English abstract).
- Li Min, Cui Shiyong, Li Chengming, Yin Jie, Li Yunlin. 2008. Object oriented information extraction from high resolution remote sensing Imagery—Taking the extraction of farmland for an example[J]. Remote Sensing Information, (6):63–66, 89(in Chinese with English abstract).
- Lu Heng, Li Yongshy, Lin Xiancheng. 2011. Classification of high resolution imagery by unmanned aerial vehicle[J]. Science of Surveying and Mapping, 36(6):106–108(in Chinese with English abstract).
- Li Deren, Li Ming. 2014. Research advance and application prospect of unmanned aerial vehicle remote sensing systems[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 39(5):505–513, 540 (in Chinese with English abstract).
- Li Fangting, Min Tian, Yao Zhiqing. 2017. Precision effect about triangulation based on unmanned aerial vehicle photogrammetry[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, (S1):75–78(in Chinese with English abstract).
- Li Wanneng, Tang Qingzhong, Chen Li. 2017. The effect on control point number of UAV to the calculation accuracy of aerial triangulation[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, (S1): 84–89 (in Chinese with English abstract).
- Liang Linlin, Jiang Liming, Zhou Zhiwei, Chen Yuxing, Sun Yafei. 2019. Object-oriented classification of unmanned aerial vehicle image for thermal erosion gully boundary extraction[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 31(2): 180–186(in Chinese with English abstract).
- Liu Hong, Huang Hanxiao, Ouyang Yuan, Zhang Jinghua, Zhang Tengjiao, Li Fu, Xiao Qiliang, Zeng Jian, Hou Qian, Wen Dengkui, Duan Shengyi. 2020. Soil's geologic investigation in Daliangshan, Xichang, Sichuan[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 40(1):91–105(in Chinese with English abstract).
- Lou Peiqing, Chen Xiaoyu, Wang Shutong, Fu Bolin, Huang Yongyi, Tang Tingyuan, Ling Ming. 2020. Object recognition of karst farming area based on UAV image: A case study of Guilin[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 32(1): 216–223(in Chinese with English abstract).
- Lu Li, Wang Zhe, Zou Shengzhang, Fan Lianjie, Lin Yongsheng, Zhou Changsong. 2021. Analysis of geothermal temperature and genetic model in Zhaojue County of Sichuan Province[J]. Geological Bulletin of China, 40(2/3):434–441(in Chinese with English abstract).
- Mai Xiaozheng, Yang Bo, Feng Xiaoming. 2012. Research on the method of Layout of unmanned aerial vehicle[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, (S1):268–271(in Chinese).
- Ma L, Cheng L, Han W Q, Zhong L S, Li M C. 2014. Cultivated land information extraction from high-resolution unmanned aerial vehicle imagery data[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 8(1): 083673.
- Qu Yanbo, Zhang Fengrong, Jiang Guanghui, Guan Xiaoke, Guo Lina. 2010. Suitability evaluation and subarea control and regulation of rural residential land based on niche[J]. Transactions of the CSAE, 26(11): 290–296(in Chinese with English abstract).
- Shi Tongguang, Zheng Guoqiang, Wang Zhiyong, Wang Linlin. 2007. Progress in research on land suitability evaluation in China[J]. Progress in Geography, 26(2): 106–115(in Chinese with English abstract).
- Sun Yi. 2014. Unmanned Aircraft Systems Pilot Aviation Handbook[M]. Beijing: China Civil Aviation Publishing House, 123–127.
- Sun Changkui, Liu Shanlei, Wang Shengyao, Chen Chao, Shen Quanfei, Shi Shanqiu, Wang Wei. 2018. Application of UAV in construction of smart city[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 30(4): 8–12(in Chinese with English abstract).
- Wang Wenyu, Li Bo. 2006. Auto-identify classification technology adopted to high-resolution remote sensing image by Cognition software[J]. Journal of Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture, 22(4):26–29(in Chinese with English abstract).
- Watts A C, Ambrosia V G, Hinkley E A. 2012. Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: classification and considerations of use[J]. Remote Sensing, (4):1671–1692.
- Wu Cifang, Ye Yanmei, Wu Yuzhe, Yue Wenze. 2019. Land and Space Plan[M]. Beijing: Geological Publishing House, 199–204(in Chinese).
- Wang Junhao, Wei Yunjie, Mei Aoshuang, Guan Jianjun, Ding Xiang, Wang Shuangting. 2021. Multidimensional extraction of UAV tilt photography-based information of loess landslide and its application[J]. Geology in China, 48(2): 388–401(in Chinese with English abstract).
- Xinhuanet. com. 2018–02–12. Xi Jinping enters Liangshan, delivering 3 important messages [OL]. http://www.xinhuanet.com/politics/2018-02/12/c_1122410563.htm.
- Xiang Jie, Chen Jianping, Li Shi, Lai Zili, Huang Haozhong, Liu Jing, Xie Shuai. 2018. Research on application of unmanned aerial vehicle technology to dynamic monitoring of reserves in the Shouyun iron mine, Beijing [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 30(3): 224–229(in Chinese with English abstract).

- Yu Fei, Zhang Yongwen, Wang Yu, Luo Kai, Chen Dabing, Xie Jian. 2021. Distribution characteristics and influencing factors of germanium-rich soil in typical agricultural area of Chongqing municipality[J]. *Geology and Resources*, 30(5): 609-616(in Chinese with English abstract).
- Yu Q, Gong P, Clinton N, Biging G, Kelly M, Schirokauer D. 2006. Object-based detailed vegetation classification with airborne high spatial resolution remote sensing imagery[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72(7):799-811.
- Zhu Jin, Ding Yazhou, Chen Panjie, Wang Xin'an, Guo Bingxuan, Xiao Xiongwu, Niu Keke. 2016. Influence of control points' layout on aero-triangulation accuracy for UAV images[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 41(5):116-120(in Chinese with English abstract).
- Zhang Tengjiao, Liu Hong, Ouyang Yuan, Huang Hanxiao, Zhang Jinghua, Li Fu, Xiao Qiliang, Zeng Jian, Hou Qian, Wen Dengkui, Duan Shengyi. 2020. A preliminary discussion on the physical and chemical characteristics and main controlling factors of soil and parent material in the middle and high mountain area——Take Xichang as an example [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*,40(1):106-114(in Chinese with English abstract).
- 厉芳婷, 闵天, 尧志青. 2017. 无人机航测技术对影像空三精度的影响[J]. *测绘通报*, (S1): 75-78.
- 李万能, 唐庆忠, 陈黎. 2017. 无人机航摄像控点数量对空三解算精度的影响[J]. *测绘通报*, (S1):84-89.
- 梁林林, 江利明, 周志伟, 陈玉兴, 孙亚飞. 2019. 无人机遥感影像面向对象分类的冻土热融滑塌边界提取[J]. *国土资源遥感*, 31(2): 180-186.
- 刘洪, 黄瀚霄, 欧阳渊, 张景华, 张腾蛟, 李富, 肖启亮, 曾建, 侯谦, 文登奎, 段声义. 2020. 基于地质建造的土壤地质调查及应用前景分析——以大凉山地区西昌市为例[J]. *沉积与特提斯地质*, 40(1): 91-105.
- 娄佩卿, 陈晓雨, 王疏桐, 付波霖, 黄永怡, 唐廷元, 凌铭. 2020. 基于无人机影像的喀斯特农耕地地物识别——以桂林市为例[J]. *国土资源遥感*, 32(1): 216-223.
- 卢丽, 王喆, 邹胜章, 樊连杰, 林永生, 周长松. 2021. 四川昭觉县地热温度解析及成因模式[J]. *地质通报*, 40(2/3): 434-441.
- 买小争, 杨波, 冯晓敏. 2012. 无人机航摄像控点布设方法探究[J]. *测绘通报*, (S1): 268-271.
- 曲衍波, 张凤荣, 姜广辉, 关小克, 郭力娜. 2010. 基于生态位的农村居民点用地适宜性评价与分区调控[J]. *农业工程学报*, 26(11): 290-296.
- 史同广, 郑国强, 王智勇, 王林林. 2007. 中国土地适宜性评价研究进展[J]. *地理科学进展*, 26(2): 106-115.
- 孙毅. 2014. 无人机驾驶员航空知识手册[M]. 北京: 中国民航出版社, 123-127.
- 孙长奎, 刘善磊, 王圣尧, 陈超, 沈泉飞, 石善球, 王玮. 2018. 浅谈无人机遥感技术在智慧城市建设中的应用[J]. *国土资源遥感*, 30(4): 8-12.
- 王文宇, 李博. 2006. 基于 eCognition 的高分辨率遥感图像的自动识别分类技术[J]. *北京建筑工程学院学报*, 22(4): 26-29.
- 吴次芳, 叶艳妹, 吴宇哲, 岳文泽. 2019. 国土空间规划[M]. 北京: 地质出版社, 199-204.
- 王俊豪, 魏云杰, 梅傲霜, 管建军, 丁祥, 王双亭. 2021. 基于无人机倾斜摄影的黄土滑坡信息多维提取与应用分析[J]. *中国地质*, 48(2): 388-401.
- 新华网. 2018-02-12. 习近平进凉山, 传递 3 个重要信息[OL]. http://www.xinhuanet.com/politics/2018-02/12/c_1122410563.htm.
- 向杰, 陈建平, 李诗, 赖自力, 黄浩中, 刘静, 谢帅. 2018. 无人机遥感技术在北京首云铁矿储量动态监测中的应用[J]. *国土资源遥感*, 30(3): 224-229.
- 余飞, 张永文, 王宇, 罗凯, 陈达兵, 谢建. 2021. 重庆典型农业区富锆土壤分布特征及影响因素[J]. *地质与资源*, 30(5): 609-616.
- 朱进, 丁亚洲, 陈攀杰, 王新安, 郭丙轩, 肖雄武, 牛科科. 2016. 控制点布设对无人机影像空三精度的影响[J]. *测绘科学*, 41(5): 116-120.
- 张腾蛟, 刘洪, 欧阳渊, 黄瀚霄, 张景华, 李富, 肖启亮, 曾建, 侯谦, 文登奎, 段声义. 2020. 中高山区土壤成土母质理化特征及主控因素初探——以西昌市为例[J]. *沉积与特提斯地质*, 40(1): 106-114.

附中文参考文献

- 毕凯, 李英成, 丁晓波, 刘飞. 2015. 轻小型无人机航摄技术现状及发展趋势[J]. *测绘通报*, (3): 27-31.
- 陈燕飞, 杜鹏飞, 郑筱津, 林瑾. 2006. 基于 GIS 的南宁市建设用地生态适宜性评价[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 46(6): 801-804.
- 崔勇, 刘志伟. 2014. 基 GIS 的北京市怀柔区高标准基本农田建设适宜性评价研究[J]. *中国土地科学*, 28(9): 76-81, 94-95.
- 陈鹏飞, 胡海峰, 廉旭刚, 杜永军. 2017. 后差分技术及像控点密度对无人机摄影测量精度影响研究[J]. *测绘通报*, (11): 144-147.
- 陈桥驿. 2019. 无人机在建设适宜性分析中的应用研究[J]. *北京测绘*, 338(1): 965-968.
- 范承啸, 韩俊, 熊志军, 赵毅. 2009. 无人机遥感技术现状与应用[J]. *测绘科学*, 34(5): 214-215.
- 关小克, 张凤荣, 郭力娜, 赵婷婷. 2010. 北京市耕地多目标适宜性评价及空间布局研究[J]. *资源科学*, 32(3): 580-587.
- 何少林, 徐京华, 张帅毅. 2013. 面向对象的多尺度无人机影像土地利用信息提取[J]. *国土资源遥感*, 25(2): 107-112.
- 胡勇, 张孝成, 马泽忠, 周志跃. 2016. 无人机遥感影像中农村房屋信息快速提取[J]. *国土资源遥感*, 28(3): 96-101.
- 金鼎坚, 王建超, 吴芳, 高子弘, 韩亚超, 李奇. 2019. 航空遥感技术及其在地质调查中的应用[J]. *国土资源遥感*, 31(4): 1-10.
- 李敏, 崔世勇, 李成名, 印洁, 李云岭. 2008. 面向对象的高分辨率遥感影像信息提取——以耕地提取为例[J]. *遥感信息*, (6): 63-66, 89.
- 鲁恒, 李永树, 林先成. 2011. 无人机高空间分辨率影像分类研究[J]. *测绘科学*, 36(6): 106-108.
- 李德仁, 李明. 2014. 无人机遥感系统的研究进展与应用前景[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 39(5): 505-513, 540.