

基于青铜峡灌区的土地利用数据源适用性研究

杨凤荣¹, 李志鹏², 荆志铎², 葛召华³, 史林²

¹宁夏回族自治区青铜峡市水务局, 宁夏 青铜峡

²山东锋士信息技术有限公司, 山东 济南

³山东省水利综合事业服务中心, 山东 济南

收稿日期: 2023年4月23日; 录用日期: 2023年5月10日; 发布日期: 2023年6月30日

摘要

快速准确地获取灌区土地利用信息是进行农作物精细分类、土壤墒情监测、作物长势监测以及作物估产的前提。本文以我国宁夏回族自治区青铜峡市的青铜峡灌区为研究对象, 以高分一号(GF1-WFV)影像、高分六号(GF6-WFV)影像以及Sentinel-2数据为数据源, 对比分析三类影像数据的建模精度, 选取精度最高的一类影像并基于决策树方法进行土地利用信息提取, 将土地利用类别划分为作物覆盖农田、裸露农田、水体、田间道路和建筑物五类。结果显示: 高分六号(GF6-WFV)数据建模精度最高, 三层时模型精度98.98%, 验证精度100%; 高分一号(GF1-WFV)数据建模精度最低, 三层时模型精度95.92%, 验证精度92.86%; 高分六号(GF6-WFV)与Sentinel-2对比, 波段数量以及红边波段的设置对信息的提取起到的作用强于分辨率, 在波段信息相同的情况下, 分辨率对提取的精度影响明显。

关键词

数据适用性, 决策树, 土地利用, 青铜峡灌区

Study on the Applicability of Land Use Data Source Based on Qingtongxia Irrigation District

Fengrong Yang¹, Zhipeng Li², Zhiduo Jing², Zhaohua Ge³, Lin Shi²

¹Qingtongxia Water Affairs Bureau, Qingtongxia Ningxia

²Shandong Fengshi Information Technology Co., Ltd., Jinan Shandong

³Water Resources Comprehensive Development Center of Shandong Province, Jinan Shandong

Received: Apr. 23rd, 2023; accepted: May 10th, 2023; published: Jun. 30th, 2023

Abstract

Fast and accurate acquisition of land use information in irrigation area is the premise of fine classification

作者简介: 杨凤荣, 女, 1973年11月出生, 水利高级工程师, 主要从事水利工程勘测、规划、设计、方案编制及工程建设管理工作, Email: 1293870665@qq.com

文章引用: 杨凤荣, 李志鹏, 荆志铎, 葛召华, 史林. 基于青铜峡灌区的土地利用数据源适用性研究[J]. 水资源研究, 2023, 12(3): 278-286. DOI: 10.12677/jwrr.2023.123032

of crops, soil moisture monitoring, crop growth monitoring and crop yield estimation. In this paper, Qingtongxia Irrigation District in Qingtongxia City, Ningxia Hui Autonomous Region is taken as the research object, and GF1-WFV, GF6-WFV and Sentinel-2 data are taken as data sources, and the modeling accuracy of three types of image data is comparatively analyzed. The image with the highest accuracy is selected and the land use information is extracted based on the decision tree method, and the land use categories are divided into five categories: crop-covered farmland, bare farmland, water body, field roads and buildings. The results show that the modeling accuracy of GF6-WFV is the highest, with the model accuracy of 98.98% and the verification accuracy of 100% in three layers. The modeling accuracy of GF1-WFV is the lowest, with the model accuracy of 95.92% and the verification accuracy of 92.86% in three layers. Compared with Sentinel-2, the number of bands and the setting of red band play a stronger role in information extraction than resolution, and the resolution has obvious influence on the extraction accuracy under the same band information.

Keywords

Data Applicability, Decision Tree, Land Use, Qingtongxia Irrigation District

Copyright © 2023 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

宁夏回族自治区是黄河流经的重要省份之一,青铜峡灌区是宁夏引黄灌区中规模最大的灌区,具有 2000 多年的引黄灌溉历史,是我国最古老的特大型灌区之一。及时掌握灌区的土地利用信息是进行农作物精细分类、土壤墒情监测、作物长势监测以及作物估产的前提,也是灌区智慧化管理的重要基础。近年来,随着遥感技术的兴起、发展、日趋成熟,遥感技术对田块信息进行快速、大范围、动态提取成为了田块信息获取的重要技术手段,彻底改变了传统的依靠人工测绘、走访完成的土地信息采集方式。

灌区土地利用监测主要是从整个灌区范围内对耕地、裸地、建筑用地、水体等信息进行区分,针对不同土地利用信息开展研究分析。早期的土地利用分类主要通过目视解译进行人工判读,党杨梅[1]等以常德市汉寿县为例,利用 SPOT 影像通过人机交互解译的方式,进行土地利用类型的更新处理,提升了工作效率;Antrop 和 Van Eetvelde [2]利用目视解译方法对郊区进行土地利用类型提取,指出目视解译对复杂、异质空间单元进行分类具有明显效果。随着分类方法的完善,有学者利用决策树、ISODATA 算法[3] [4]、最大似然法[5]、支持向量机法[6]、随机森林法[7]、BP 神经网络分类算法[8]、空-谱结合的分类算法[9]等进行土地利用监测分析。伴随机器学习的发展,决策树分类方法方便快捷,在土地利用信息提取中应用十分广泛[10] [11]。贾玉洁等[12]在研究云南省大理市各土地利用类型的面积时,以 Sentinel-2A 影像为数据源,提出一种面向对象特征的决策树分类方法,结果表明面向对象特征的决策树方法的分类结果在空间分布和各地类的面积统计方面都优于 ISODATA 法和最大似然法,与研究区实际土地利用面积数据更为接近;孙亚楠等[13]以 Landsat 时间序列影像数据,建立土地利用决策树分类模型,并利用实测数据和 Google earth 影像对不同组合方式的土地利用模型进行验证,结果表明该研究区土地利用最佳识别期为 8 月,其次为 9 月。利用 8 月最优遥感模型(最佳识别期和最优组合)识别的耕地、林地、草地、未利用地、水域和居民工矿用地的制图精度分别为 96.83%、73.33%、70.00%、65.52%、100.00% 和 80.00%,用户精度分别为 76.62%、100.00%、82.35%、82.61%、100.00%和 80.00%。

本文以青铜峡灌区为研究对象,基于决策树分类方法,对高分一号(GF1-WFV)影像、高分六号(GF6-WFV)影像以及 Sentinel-2 数据在灌区土地利用分类的适用性方面进行对比分析,依据适用性最强的数据源进行灌区土

地利用分类。

2. 研究区与数据源

2.1. 研究区概况

青铜峡灌区(37°2'27"~38°9'3"N, 105°5'59"~106°3'23"E)位于宁夏回族自治区黄河冲积平原上,西依贺兰山,东濒鄂尔多斯台地,地势西南高,东北低,由西南向东北自高而低呈现阶梯状分布,形成山地、低山丘陵、缓坡丘陵、洪积扇地带、黄河冲积平原和库区 6 个地貌类型,其中黄河贯流其中,年平均降雨量约 200 mm。20 世纪 60 年代中期建成了青铜峡水利枢纽工程,结束了长期以来无坝引水的历史,灌区设计灌溉面积为 2500 km²。青铜峡灌区地理位置见图 1。

青铜峡灌区的农作物以水稻、小麦为主,兼种胡麻甜菜等,是中国西北地区重要产粮区,被誉为“塞外江南”[14]。本文根据农田特征和当地作物种植特点,将农田用地划分为作物覆盖农田、裸露农田,包括灌区内的水体、田间道路和建筑物,一共划分为 5 种土地利用类型。

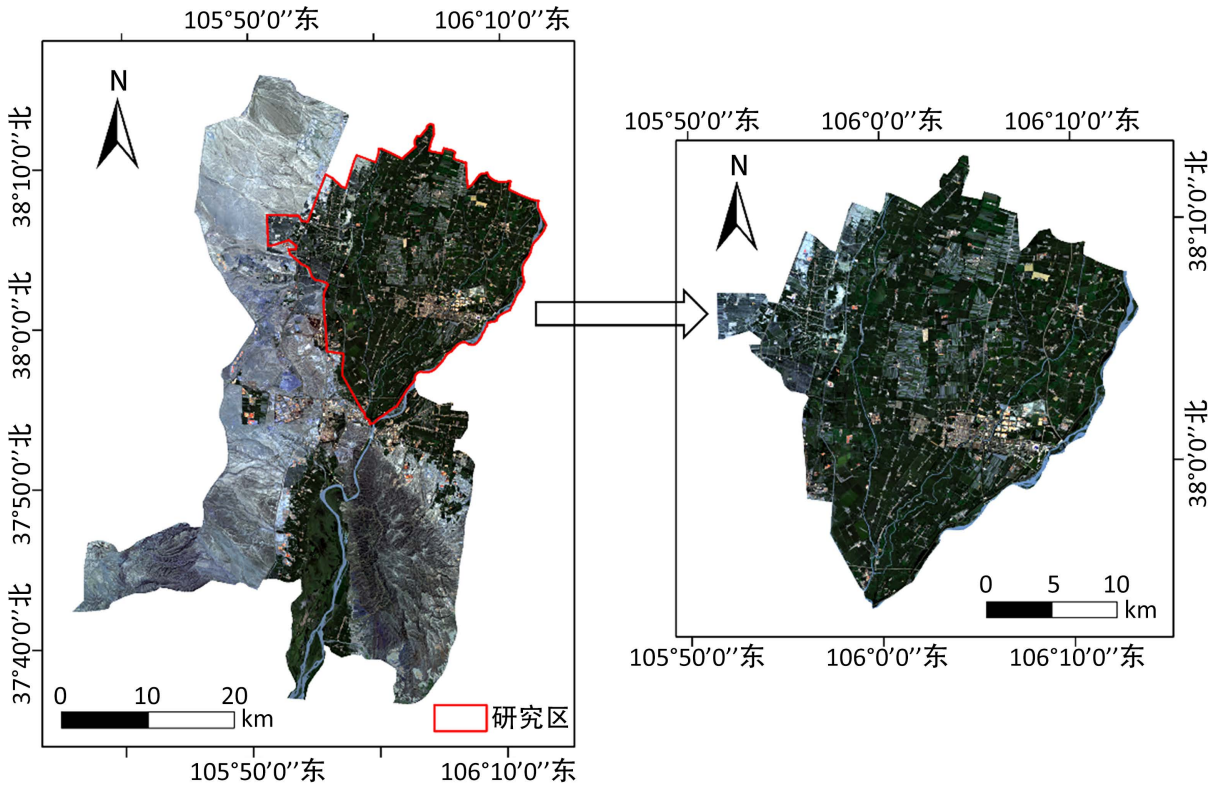


Figure 1. Geographical location of Qingtongxia irrigation district

图 1. 青铜峡灌区地理位置

2.2. 数据源

高分一号(GF1-WFV)卫星发射于 2013 年,卫星采用太阳同步轨道,有效载荷包括 2 台高分辨率相机和 4 台中分辨率相机及配套的高速数传系统。在卫星侧摆条件下,高分相机(2/8 m 相机)可以实现 41 d 的重复观测和全球小于 4 d 的重访,16 m 分辨率的宽幅相机,其组合幅宽超过 800 km,无需侧摆即可实现 4 d 的回归覆盖周期,高分一号(GF1-WFV)卫星首先将在国土资源、环保、农业等方面发挥作用[15]。高分六号(GF6-WFV)卫星于 2018 年发射升空,配置 2 m 全色/8 m 多光谱高分辨率相机、16 m 多光谱中分辨率宽幅相机,2 m 全

色/8 m 多光谱相机观测幅宽 90 km, 16 m 多光谱相机观测幅宽 800 km。高分六号(GF6-WFV)增加了“红边”波段, 与高分一号(GF1-WFV)组网运行后, 将使遥感数据获取的时间分辨率从 4 d 缩短到 2 d。高分六号(GF6-WFV)是一颗低轨光学遥感卫星, 具有高分辨率、宽覆盖、高质量和高效成像等特点[16]。波段信息如表 1 所示:

Table 1. Sensor parameters of GF1-WFV and GF6-WFV

表 1. 高分一号(GF1-WFV)和高分六号(GF6-WFV)传感器参数

传感器	波段	光谱范围(μm)	空间分辨率(m)	重访周期(d)
GF1-WFV	1	0.45~0.52	16	4
	2	0.52~0.59	16	4
	3	0.63~0.69	16	4
	4	0.77~0.89	16	4
GF6-WFV	1	0.45~0.52	16	2
	2	0.52~0.59	16	2
	3	0.63~0.69	16	2
	4	0.77~0.89	16	2
	5	0.69~0.73 (红边 I)	16	2
	6	0.73~0.77 (红边 II)	16	2
	7	0.40~1.45	16	2
	8	0.59~0.63	16	2

Sentinel-2 是高分辨率多光谱成像卫星, 分为 2A 和 2B 两颗卫星。2A 于 2015 年发射升空, 2B 于 2017 年发射升空。Sentinel-2 卫星携带一枚多光谱成像仪(MSI), 高度为 786 km, 可覆盖 13 个光谱波段, 幅宽达 290 km。地面分辨率分别为 10 m、20 m 和 60 m。一颗卫星的重访周期为 10 d, 两颗互补, 重访周期为 5 d [17]。波段信息如表 2 所示:

Table 2. Sensor parameters of Sentinel-2

表 2. Sentinel-2 的传感器参数

波段	中心波长(μm)	空间分辨率(m)	波段	中心波长(μm)	空间分辨率(m)
Band 1	0.433	60	Band 8	0.842	10
Band 2	0.490	10	Band 8A	0.865	20
Band 3	0.560	10	Band 9	0.945	60
Band 4	0.665	10	Band 10	1.375	60
Band 5	0.705	20	Band 11	1.610	20
Band 6	0.740	20	Band 12	2.190	20
Band 7	0.783	20			

本研究使用高分一号(GF1-WFV)卫星多光谱数据, 包含蓝、绿、红、近红外四个波段, 空间分辨率为 16 m; 使用高分六号(GF6-WFV), 8 个波段, 空间分辨率为 16 m; 使用 Sentinel-2 蓝、绿、红、近红外四个波段, 空间分辨率为 10 m。

3. 土地利用分类方法

3.1. 土地利用分类原理

在土地利用监测过程中不同土地利用类型的组成成分、含水量的差异，不同成分电磁波的反射或发射辐射之间的差异，是进行土地利用分类的基础。水体的反射率总体上比较低，不超过 10%，一般为 4%~5%，并随着波长的增大逐渐降低，到 0.6 μm 处约 2%~3%，过了 0.75 μm ，水体几乎成为全吸收。作物监测主要研究植株和叶片结构、叶肉细胞、叶绿素、含水量等发生反射的光谱信息之间的规律特征。植被可见光波段的光谱主要受各种色素的影响，叶绿素吸收蓝红光，对绿光反射作用强，因而在 0.45 μm 和 0.67 μm 处为吸收带，在 0.55 μm 处为反射峰，在光谱的近红外阶段，绿色植物的光谱响应主要被 1.4 μm 、1.9 μm 和 2.7 μm 附近的水的强烈吸收带所支配。作物分类主要根据不同作物植株冠层和叶片反射、发射的光谱存在差异来进行区分。

3.2. 决策树分类

决策树(Decision Tree)是一种非参数的监督学习方法，它能够从一系列有特征和标签的数据中总结出决策规则，并用树状图的结构来呈现这些规则，以解决分类和回归问题。决策树算法容易理解，适用各种数据，在解决各种问题时都有良好表现，尤其是以树模型为核心的各种集成算法，在各个行业和领域都有广泛应用[18]。

决策树的核心思想是把数据集作为根节点，通过特征参数的阈值对数据集进行逐层的划分，随着划分的不断进行，尽量使得划分后的每一个子数据集属于同一类，达到分类的目的[19]。一般情况下，所有参与分类的数据统一构成了最原始的数据集。作为最大的数据集，如同一棵树的根，是决策树的根本，在决策树中称为根节点，因此一棵决策树包含一个根结点。随着利用特征参数阈值对原始数据集进行划分，产生若干个内部结点，这些内部节点所包含数据集是根节点的子集。随着决策树的继续生长，当某一枝决策树停止生长时，此时的结点称为叶结点，叶结点对应于决策树的结果。

3.3. 光谱特征选择

由于卫星波段设置数量差异，当波段数量较多时，卫星影像自带的波段信息丰富，不需要进行特征计算就可以利用决策树分类达到较好的分类效果。当波段数较少时，就需要通过特征计算，增加遥感影像信息维度。本研究选择的光谱特征主要包括两类：1) 单波段信息以及通过波段进行相应的计算得到的光谱特征指数，如波段差值、波段和值、单波段比值、波段差值/单波段、波段差值/波段和值等；2) “红边”是指绿色植物在 670~760 nm 之间反射率增高最快的点，“红边”指数是指“红边”位置所对应的坡度，根据“红边”指数推广得到的各个波段之间的坡度，即坡度指数 SI (Slope Index)。光谱特征指数表见表 3。

Table 3. Spectral characteristic index table

表 3. 光谱特征指数表

	特征参数
单波段	B、G、R、N
波段差值	$B - G$ 、 $B - R$ 、 $B - N$ 、 $G - R$ 等
波段和值	$B + G$ 、 $B + R$ 、 $B + N$ 、 $G + R$ 等
单波段比值	B/G 、 B/R 、 B/N 、 G/R 等
波段差值/单波段	$(B - G)/B$ 、 $(B - R)/B$ 、 $(B - N)/B$ 、 $(G - R)/B$ 等
波段差值/波段和值	$(B - G)/(B + G)$ 、 $(B - R)/(B + R)$ 、 $(B - N)/(B + N)$ 等
坡度指数	$(N - R)/(\lambda_N - \lambda_R)$ 、 $(N - G)/(\lambda_N - \lambda_G)$ 等

表格中 B、G、R、N 分别指卫星波段中的蓝波段、绿波段、红波段以及近红波段的遥感反射率值。由于最终的运算通过计算机程序实现，实际应用中可以对任意波段进行上述特征参数运算，丰富光谱信息。坡度指数是指任意两个波段的遥感反射率值与对应的中心波长差值的比。

4. 决策树模型构建与应用

4.1. 模型构建

在遥感影像中，选择纯像元进行光谱特征分析，分别选择作物覆盖农田 30 组，无作物覆盖农田 30 组，水体 30 组，道路 30 组，建筑物 20 组，其中随机选择 70% 的数据作为建模数据，将模型建立后土地利用分类的精度作为模型精度；另外 30% 的数据作为验证数据，不参与模型建立，模型建立后利用该验证数据对模型进行验证。基于高分一号(GF1-WFV)、高分六号(GF6-WFV)、Sentinel-2 构建的决策树模型分别如图 2~4 所示。

4.2. 模型精度评价

分别统计、计算决策树层数的模型精度、测试精度以及总精度，得到结果如表 4。

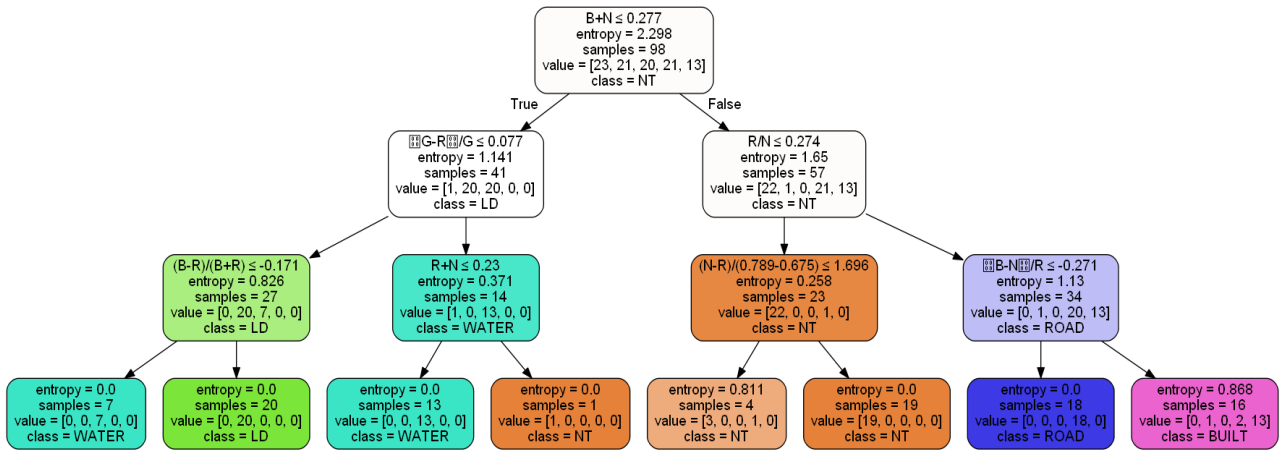


Figure 2. Decision tree model based on GF1-WFV data

图 2. 基于高分一号(GF1-WFV)数据的决策树模型

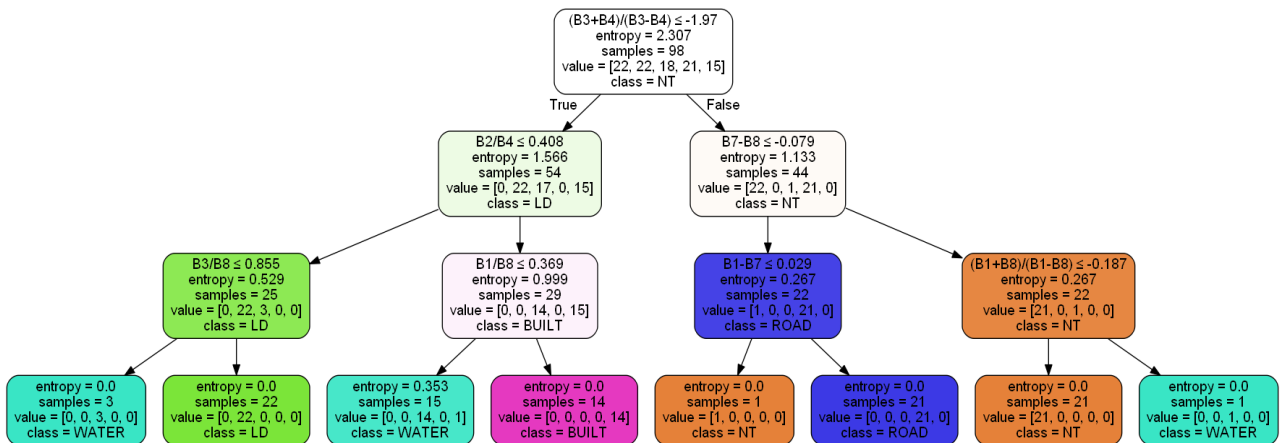


Figure 3. Decision tree model based on GF6-WFV data

图 3. 基于高分六号(GF6-WFV)数据的决策树模型

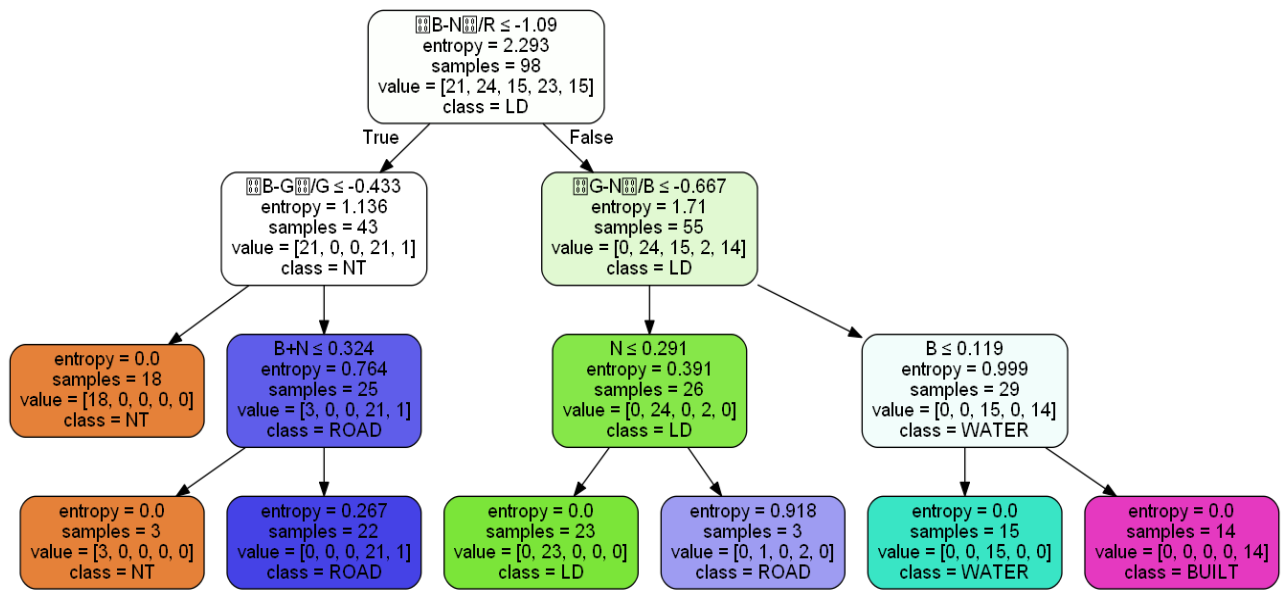


Figure 4. Decision tree model based on Sentinel-2 data
图 4. 基于 Sentinel-2 数据的决策树模型

Table 4. Summary of model precision
表 4. 模型精度汇总

决策树层数		三层	
最高精度(%)		建模	测试
高分一号(GF1-WFV)		95.92	92.86
高分六号(GF6-WFV)		98.98	100
Sentinel-2		97.96	97.92

利用决策树对数据进行提取，提取结果显示：高分一号(GF1-WFV)数据在建模精度、验证精度以及总体精度中效果均最差，Sentinel-2 次之，高分六号(GF6-WFV)效果最好。结果表明高分六号(GF6-WFV)虽然空间分辨率略低于 Sentinel-2，但是由于波段数量多，光谱信息丰富，总体效果最佳；Sentinel-2 与高分一号(GF1-WFV)波段数量相同，光谱信息相近，但分辨率明显高于高分一号(GF1-WFV)数据，最终分类效果也明显优于高分一号(GF1-WFV)数据。

4.3. 模型应用

基于决策树模型和高分六号(GF6-WFV)遥感影像对青铜峡灌区进行土地利用分类，分类结果如图 5 所示。

4.4. 分类结果精度评价

对土地利用分类结果进行精度检验是证明分类结果可靠性的必要一步，本文使用总体精度(Overall Accuracy, OA)和 Kappa 系数来验证分类结果的精度。在研究区随机均匀地选择各种土地利用类型的样本点共 60 个，利用 ArcGIS 混淆矩阵方法计算得出总体精度和 Kappa 系数，混淆矩阵见表 5。Kappa 系数通常分布在区间[0, 1]内，越接近 1 说明分类精度越高，其中 Kappa 系数大于 0.6 表明分类结果较可靠[20]。分类总体精度为 90%，Kappa 系数为 0.7616。

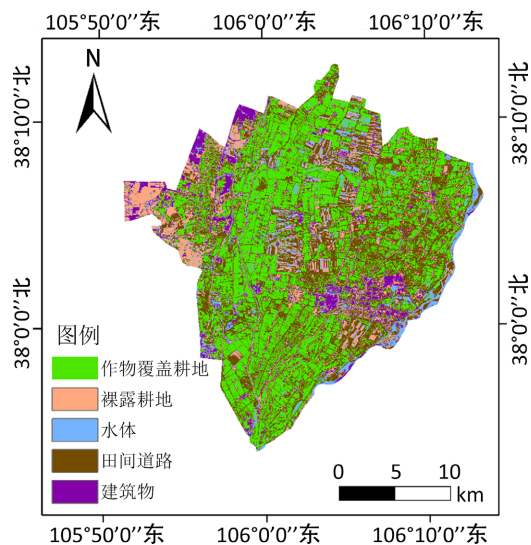


Figure 5. Classification results of GF6-WFV remote sensing images by decision tree

图 5. 高分六号(GF6-WFV)遥感影像决策树分类结果

Table 5. Classification result confusion matrix

表 5. 分类结果混淆矩阵

混淆矩阵		真实值					
		作物覆盖农田	裸露农田	水体	田间道路	建筑物	总计
观测值	作物覆盖农田	10	2	0	0	0	12
	裸露农田	0	12	0	1	1	14
	水体	1	0	13	0	0	14
	田间道路	0	0	0	9	0	9
	建筑物	0	0	0	1	10	11
	总计	11	14	13	11	11	60

4.5. 结论

本文基于同期的高分一号(GF1-WFV)、高分六号(GF6-WFV)以及 Sentinel-2 数据，基于决策树分类方法，分析不同数据源的模型建模精度和模型验证精度，对比不同数据源的分类效果，结果显示高分六号(GF6-WFV)数据的模型建模精度和模型验证精度均为最高，分类效果最好，分类总体精度达到 90%。但是受限于数据的空间分辨率和光谱分辨率，裸漏的耕地和田块之间的道路区分难度比较大，实际分类效果有待提高，进一步研究的重点应该在现有基础上提高数据的空间分辨率和光谱分辨率，同时采用更加先进的分类方法进行分类研究。

参考文献

[1] 党杨梅, 杨敏华, 常正科. SPOT5 影像目视判读在土地利用类型更新中的应用研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2009, 32(2): 125-127.
DANG Yangmei, YANG Minhua and CHANG Zhengke. Research on the application of SPOT5 image visual interpretation in the updating of land-use types. Geomatics & Spatial Information Technology, 2009, 32(2): 125-127. (in Chinese)

[2] ANTROP, M., VAN EETVELDE, V. Holistic aspects of suburban landscapes: Visual image interpretation and landscape metrics. Landscape and Urban Planning, 2000, 50(1-3): 43-58. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(00\)00079-7](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(00)00079-7)

[3] 韩洁, 郭擎, 李安. 结合非监督分类和几何-纹理-光谱特征的高分影像道路提取[J]. 中国图像图形学报, 2017, 22(12):

- 1788-1797.
HAN Jie, GUO Qing and LI An. Road extraction based on unsupervised classification and geometric-texture-spectral features for high-resolution remote sensing images. *Journal of Image and Graphics*, 2017, 22(12): 1788-1797. (in Chinese)
- [4] ABBAS, A. W., MINALLH, N., AHMAD, N., et al. K-means and ISODATA clustering algorithms for landcover classification using remote sensing. *Sindh University Research Journal (Science Series)*, 2016, 48(2): 315-318.
- [5] 李杰, 李玉, 王玉, 等. 结合最大似然算法和波利亚罐模型的全色遥感图像分类[J]. *测绘通报*, 2018(4): 36-43, 49.
LI Jie, LI Yu, WANG Yu, et al. Panchromatic remote sensing image classification combining maximum likelihood algorithm and Polyaurn model. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2018(4): 36-43, 49. (in Chinese)
- [6] 赵恒谦, 贾梁, 尹政然, 等. 基于多源遥感数据的北京市通州区土地利用/覆盖与生态环境变化监测研究[J]. *地理与地理信息科学*, 2019, 35(1): 38-43.
ZHAO Hengqian, JIA Liang, YIN Zhengran, et al. Dynamic monitoring of land use and ecological environment based on multiple remote sensing data: A case study of Tongzhou district, Beijing. *Geography and Geographic Information Science*, 2019, 35(1): 38-43. (in Chinese)
- [7] 刘代超, 李晓松, 李向晨, 等. GF-6 影像应用于林地与非林地识别的潜力分析[J]. *测绘通报*, 2020(8): 5-12, 17.
LIU Daichao, LI Xiaosong, LI Xiangchen, et al. Analysis of the potential of GF6 WFV data for forest and non-forestland identification. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2020(8): 5-12, 17. (in Chinese)
- [8] 王佃来, 宿爱霞, 刘文萍. 基于 BP 改进的 KNN 算法在北京密云土地覆盖分类中的应用[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(23): 9464-9471.
WANG Dianlai, SU Aixia and Liu Wenping. Application of land cover classification in Miyun district of Beijing City based on BP neural network improved KNN algorithm. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(23): 9464-9471. (in Chinese)
- [9] 袁静文, 武辰, 杜博, 等. 高分五号高光谱遥感影像的城市土地利用景观格局分析[J]. *遥感学报*, 2020, 24(4): 465-478.
YUAN Jingwen, WU Chen, DU Bo, et al. Analysis of landscape pattern on urban land use based on GF-5 hyperspectral data. *Journal of Remote Sensing*, 2020, 24(4): 465-478. (in Chinese)
- [10] 储航. 基于 C4.5-CA 的港城土地利用变化情景模拟[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2020.
CHU Hang. Scenario simulation of land use change in port city based on C4.5-CA. Master's Thesis, Dalian: Dalian University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [11] 李文君. 基于 Sentinel2 影像的青衣江流域土地利用分类[J]. *科学技术创新*, 2020(10): 72-73.
LI Wenjun. Land use classification of Qingyi River Basin based on Sentinel2 image. *Science and Technology Innovation*, 2020(10): 72-73. (in Chinese)
- [12] 贾玉洁, 刘云根, 杨思林, 等. 面向 Sentinel-2A 影像的大理市土地利用分类方法适用性研究[J]. *浙江农林大学学报*, 2022, 39(6): 1350-1358.
JIA Yujie, LIU Yungen, YANG Silin, et al. Applicability of land use classification method in Dali City based on Sentinel-2A image. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2022, 39(6): 1350-1358. (in Chinese)
- [13] 孙亚楠, 李仙岳, 史海滨, 等. 基于特征优选决策树模型的河套灌区土地利用分类[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(13): 242-251.
SUN Yanan, LI Xianyue, SHI Haibin, et al. Classification of land use in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia using feature optimal decision trees. *Journal of Agricultural Engineering*, 2021, 37(13): 242-251. (in Chinese)
- [14] 青铜峡灌区——西北地区的塞外江南[J]. *河北水利*, 2019(4): 21.
Qingtongxia irrigation district—South of the Great Wall in northwest China. *Hebei Water Conservancy*, 2019(4): 21. (in Chinese)
- [15] 白照广. 高分一号卫星的技术特点[J]. *中国航天*, 2013(8): 5-9.
BAI Zhaoguang. Technical characteristics of GF1 satellite. *China Aerospace*, 2013(8): 5-9. (in Chinese)
- [16] 高菲. 高分六号卫星[J]. *卫星应用*, 2018(6): 74.
GAO Fei. Gaofen-6 satellite. *Satellite Applications*, 2018(6): 74. (in Chinese)
- [17] 高国龙. 欧洲“哨兵”卫星 2 号将采用多光谱仪器[J]. *红外*, 2011, 32(5): 44-45.
GAO Guolong. European Sentinel-2 satellite will adopt multi-spectral instruments. *Infrared*, 2011, 32(5): 44-45. (in Chinese)
- [18] 周志华. 机器学习[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016.
ZHOU Zhihua. Machine learning. Beijing: Tsinghua University Publishing House, 2016. (in Chinese)
- [19] 李航. 统计学习方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
LI Hang. Statistical learning methods. Beijing: Tsinghua University Publishing House, 2012. (in Chinese)
- [20] 杨可明. 遥感原理与应用[M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 2016: 231-234.
YANG Keming. Principle and application of remote sensing. Beijing: China University of Mining and Technology Press, 2016: 231-234. (in Chinese)