

分类号：
学号：20222108018

密级：公开
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



基于深度学习的遥感影像防护林信息提取方法 研究及应用

学位申请人	舒纪凯
指导教师	尹小君
申请学位类别	专业硕士
专业名称	电子信息
研究领域	计算机技术
所在学院	信息科学与技术学院

中国·新疆·石河子
2025年5月

分类号：
学号：20222108018

密级：公开
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



基于深度学习的遥感影像防护林信息提取方法 研究及应用

学位申请人	舒纪凯
指导教师	尹小君
申请学位类别	专业硕士
专业名称	电子信息
研究领域	计算机技术
所在学院	信息科学与技术学院

中国·新疆·石河子
2025年5月

**Research and Application of Deep Learning-based Remote Sensing
Image Shelterbelt Information Extraction Method**

A Dissertation Submitted to
Shihezi University
In Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of
Master of Engineering

By

Shu Ji-Kai
(Electronic Information)

Dissertation Supervisor: A/Prof. Yin Xiao-jun

May, 2025

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所提交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：舒亿航

时间：2025 年 5 月 26 日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：舒亿航

时间：2025 年 5 月 26 日

导师签名：尹小君

时间：2025 年 5 月 26 日

摘要

防护林工程作为维护生态安全屏障、防治荒漠化及水土流失的关键措施，在保障农业生产、改善区域生态环境等方面发挥着不可替代的作用。尤其在干旱、半干旱地区，科学构建与持续维护防护林体系已成为实现生态治理与可持续发展的重要基础。然而，防护林工程建设和维护的过程中，获取防护林空间分布信息的时间和经济成本过高以及提取精度不高，一直是制约防护林工程精细化管理与动态监测的核心瓶颈。针对这些问题，本文提出了一种基于超分辨率重建与语义分割协同作用的遥感影像防护林信息提取方法，以实现从低分辨率影像到高精度防护林矢量数据的转换。具体研究内容如下：

(1) 针对高分辨率遥感影像获取成本高的问题，构建了基于 IN-ESRGAN 的遥感影像超分辨率重建模型。以 ESRGAN 模型为基础，针对其卷积核尺寸单一，无法获取多尺度特征的缺陷，提出了一种多尺度特征融合卷积结构，将其引入 ESRGAN 网络的 RRDB 模块中代替其原有的卷积结构。实验表明，改进后的模型在 PSNR 上达到 26.56dB、SSIM 及 LPIPS 分别达到了 0.79 和 0.285，比所比较的基线模型性能更优，验证了该模型的有效性。

(2) 针对遥感影像中地物复杂，干扰信息多的问题，构建了基于 CPPM-UNet 的遥感影像防护林信息提取模型。一方面，通过在跳跃连接部分嵌入卷积块注意力模块 (CBAM)，增强了特征图在空间和通道上的局部相关性。另一方面，在解码器末端引入改进型金字塔池化模块 (CPPM)，通过四级并行池化层捕获全局上下文信息，解决防护林因尺度差异导致的局部断裂问题，池化输出经双线性插值还原后，与高层语义特征进行加权融合，显著提升了模型对防护林网格化拓扑结构的感知能力。优化后的模型在 MIoU 指标上达到 78.95%，在 PA 上达到了 80.23%，F1 分数为 84.21%，较未优化模型在各项指标上均有显著提升。

(3) 基于 Sentinel-2 遥感影像数据，采用改进的防护林信息提取方法，实现了阿拉尔市防护林信息的精准提取，并进行了应用分析。首先，通过 IN-ESRGAN 超分辨率重建模型将 10m 分辨率影像提升至 2.5m，显著增强防护林边缘细节与纹理特征。然后利用 CPPM-UNet 模型进行遥感影像防护林信息的提取，并生成高精度防护林专题图。最后，结合地理信息系统 (GIS) 技术，从空间分布特征与面积统计两个维度开展分析。

(4) 基于 IN-ESRGAN 模型和 CPPM-UNet 模型的遥感影像防护林信息提取系统设计与实现。系统设计遵循软件开发行业规范，从可行性分析、需求分析、数据库设计、架构设计与实现到系统测试，确保了系统的全面性与可靠性。

关键词：防护林信息提取；超分辨率重建；语义分割；遥感影像

Abstract

Shelterbelt projects serve as a critical measure for maintaining ecological security barriers, combating desertification, and preventing soil erosion, playing an irreplaceable role in safeguarding agricultural production and improving regional ecological environments. Particularly in arid and semi-arid regions, the scientific construction and sustainable maintenance of shelterbelt systems have become essential foundations for achieving ecological governance and sustainable development. However, the high temporal and economic costs of acquiring spatial distribution information on shelterbelts, along with low extraction accuracy, remain core bottlenecks constraining refined management and dynamic monitoring of shelterbelt projects. To address these issues, this thesis proposes a remote sensing image-based shelterbelt information extraction method that synergizes super-resolution reconstruction with semantic segmentation. The specific research contents are as follows:

(1) To mitigate the high cost of acquiring high-resolution remote sensing images, a remote sensing image super-resolution reconstruction model based on IN-ESRGAN was developed. Building upon the ESRGAN framework, a multi-scale feature fusion convolutional structure was proposed to replace the original convolutional layers in its RRDB modules, addressing the limitation of single-scale feature extraction. Experimental results demonstrated that the improved model achieved 26.56 dB in PSNR, 0.79 in SSIM, and 0.285 in LPIPS, validating its effectiveness.

(2) To resolve challenges posed by complex ground objects and interference in remote sensing images, a CPPM-UNet-based shelterbelt information extraction model was constructed. On one hand, the Convolutional Block Attention Module (CBAM) was embedded in skip connections to enhance local spatial-channel correlations of feature maps. On the other hand, a Customized Pyramid Pooling Module (CPPM) was introduced at the decoder's terminal, capturing global contextual information through four parallel pooling layers to address fragmented shelterbelt patterns caused by scale variations. After bilinear interpolation, pooled features were weighted and fused with high-level semantic features, significantly improving the model's perception of shelterbelt grid-like topologies. The optimized model achieved 78.95% in MIoU, 80.23% in PA, and 84.21% in F1-score, showing marked improvements across all metrics compared to the baseline.

(3) Leveraging Sentinel-2 remote sensing data, the refined shelterbelt information extraction method was applied to achieve precise extraction and systematic analysis of shelterbelts in Alaer City. First, the IN-ESRGAN model enhanced 10-meter resolution imagery to 2.5 meters, significantly improving edge details and texture features of shelterbelts. Subsequently, the CPPM-UNet model extracted shelterbelt information and generated high-precision thematic maps. Finally, combined with GIS technology, spatial distribution patterns and area statistics were analyzed.

(4) A shelterbelt information extraction system was developed based on the IN-ESRGAN and CPPM-UNet models. The system design adhered to software industry standards, encompassing feasibility analysis, requirements analysis, database design, architecture implementation, and system testing to ensure comprehensiveness and reliability.

Key words: Shelterbelt Extraction; Super-Resolution Reconstruction; Semantic Segmentation; Remote Sensing Imagery

目录

摘要.....	I
Abstract.....	II
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 基于像元的遥感影像信息提取方法.....	3
1.2.2 面向对象的遥感影像信息提取方法.....	3
1.2.3 基于深度学习的遥感影像信息提取方法.....	4
1.3 研究内容与技术路线.....	6
1.3.1 研究内容.....	6
1.3.2 技术路线.....	7
1.4 论文结构安排.....	8
1.5 本章小结.....	8
第 2 章 相关理论与技术介绍.....	9
2.1 遥感影像相关理论.....	9
2.1.1 遥感影像分辨率.....	9
2.1.2 遥感影像处理.....	9
2.1.3 遥感影像增强.....	10
2.2 深度学习理论简介.....	10
2.2.1 卷积与反卷积.....	10
2.2.2 池化与上采样.....	11
2.2.3 激活函数.....	12
2.2.4 损失函数.....	13
2.3 深度学习相关模型.....	14
2.3.1 全卷积网络.....	14
2.3.2 U-Net 网络.....	15
2.3.3 ESRGAN 网络.....	16
2.4 本章小结.....	17
第 3 章 基于改进 ESRGAN 模型的遥感影像超分辨率重建.....	18

3.1	引言	18
3.2	遥感影像超分辨率重建模型的构建	19
3.2.1	改进 ESRGAN 模型的网络结构	19
3.2.2	多尺度特征融合 RRDB 模块	20
3.2.3	损失函数	22
3.3	实验与分析	24
3.3.1	SEN2NAIP 数据集	24
3.3.2	实验设置	25
3.3.3	评价指标	26
3.3.4	实验结果分析	27
3.4	本章小结	29
第 4 章	基于改进 U-Net 模型的防护林信息提取	31
4.1	引言	31
4.2	数据集构建	31
4.2.1	遥感影像数据获取	31
4.2.2	遥感影像处理	33
4.2.3	数据集标注	34
4.3	防护林信息提取模型构建	35
4.3.1	改进的 U-Net 网络架构	35
4.3.2	卷积注意力机制	36
4.3.3	CPPM 模块	39
4.4	实验与分析	41
4.4.1	实验设置	41
4.4.2	评价指标	42
4.4.3	实验结果分析	43
4.4.4	消融实验	45
4.5	本章小结	46
第 5 章	防护林信息提取方法在阿拉尔市的应用	47
5.1	应用区域概况	47
5.2	数据与处理	48
5.2.1	遥感影像数据	48
5.2.2	遥感影像数据处理	51
5.2.3	高程数据	52

5.2.4	水系数据	53
5.2.5	实地调查数据	53
5.3	防护林信息提取方法应用	54
5.3.1	阿拉尔市遥感影像超分辨率重建	55
5.3.2	阿拉尔市防护林信息提取	57
5.3.3	实地调查数据验证	58
5.4	阿拉尔市防护林信息提取结果及分析	59
5.4.1	专题地图制作	59
5.4.2	空间特征分析	60
5.4.3	面积统计分析	62
5.5	本章小结	64
第 6 章	遥感影像防护林信息提取系统设计与实现	65
6.1	系统可行性分析	65
6.1.1	技术可行性分析	65
6.1.2	经济可行性分析	65
6.1.3	社会可行性分析	66
6.2	系统需求分析	66
6.2.1	系统总体需求	66
6.2.2	系统功能性需求	66
6.2.3	系统非功能性需求	67
6.2.4	系统用例图	67
6.3	系统架构设计	68
6.3.1	系统整体架构设计	68
6.3.2	系统功能模块设计	69
6.4	数据库设计	70
6.5	系统实现	72
6.5.1	用户管理功能模块	72
6.5.2	遥感影像库相关功能实现	73
6.5.3	影像上传与防护林信息提取模块	74
6.6	系统测试	75
6.7	本章小结	76
第 7 章	总结与展望	77
7.1	总结	77

7.2 展望	78
参考文献	79
致谢	83
作者简介	84

第 1 章 绪论

1.1 研究背景及意义

防护林工程是我国生态建设的重要组成部分，通过大规模植树造林和保护现有林地资源，构建生态屏障，改善生态环境，促进经济社会可持续发展。我国防护林工程体系包括七大工程，三北防护林体系、长江中上游防护林体系、沿海防护林体系、太行山绿化工程、平原绿化工程、黄土高原水土保持林工程和全国防治沙漠化工程。防护林通过降低风速、改变气流方向，有效减少风蚀和沙尘暴的侵袭，保护土地资源；能够拦截地表径流，减少水土流失，改善土壤结构，保持水土；同时通过蒸腾作用和遮阴效应，降低地表温度，增加空气湿度，调节局部气候^[1]。目前国内的防护林面积已达到 3000 万公顷，占全国造林总面积 10%-13%，其中三北防护林工程累计治理沙化土地面积达 5.38 亿亩，被誉为“绿色长城”。防护林工程的实施带动了林业、畜牧业、旅游业等相关产业的发展，促进经济发展和提高社会效益方面取得了显著成效，为我国乃至全球的生态安全作出了巨大贡献^[2]。

然而，在当下全球化进程加速、人类活动强度不断攀升的大背景下，气候变化的加剧以及人类开发活动的扩张，使得防护林面积退化问题日益严峻，成为了生态保护领域中亟待解决的难题。气候变化带来了诸如温度升高、降水模式改变、极端天气事件频发等多方面的挑战，这些因素共同作用于防护林生态系统，导致其生长环境恶化，树木生长受限，甚至死亡。在一些干旱和半干旱地区，降水的减少使得防护林的水分供应不足，树木因缺水而生长缓慢，林分密度降低；而在一些频发暴雨和洪涝的区域，防护林则面临着被冲毁、根系受损等风险，进一步加剧了其面积的退化。同时，人类活动的不合理开发，如过度砍伐、过度放牧、城市扩张等，直接侵占和破坏了防护林的生存空间，使得其面积不断缩减，生态功能逐渐弱化。

面对日益严峻的防护林退化问题，急需一种高效的防护林信息监测手段以支持防护林工程的科学管理。传统的防护林监测方法主要依赖于地面调查，通过样地布设、树种识别、林分参数测量等人工勘测手段获取数据。虽然通过地面调查在一定程度上能够提供精准有效的信息，但由于其效率低且劳动强度大，难以应对大范围、多时相的动态监测需求^[3]，导致管理部门无法及时获取林带破碎化、退化等关键信息。近年来，随着高分系列卫星、哨兵 2 号等对地观测系统的发展，遥感数据空间分辨率与时间分辨率显著

提升,为精细化防护林信息提取提供了数据基础。然而,遥感影像中地物信息复杂的空间异质性和光谱混淆问题,给防护林要素的精准识别带来了挑战。最典型的就是防护林带与农田林网、果园等植被类型在遥感影像中出现的“异物同谱”现象,目前传统的基于阈值分割或指数计算的方法难以对这些地物实现有效区分。并且高分辨率遥感影像的高昂获取成本对其实际应用形成了制约。这种成本约束迫使一些中小型的防护林工程区选择使用中低分辨率的遥感影像进行防护林信息提取,导致一些宽度较小的破碎林带无法被正确识别。

与此同时,深度学习技术的发展,为破解上述难题提供了新的技术路径。深度学习方法的核心优势在于能够自动挖掘遥感影像中隐含的纹理、形态、空间上下文等深层特征,突破传统方法对光谱特征的单维度依赖。特别是在处理异物同谱、混合像元等复杂场景时,卷积神经网络可通过局部感受野捕捉林带走向、斑块连通性等空间结构特征,而注意力机制则能动态增强防护林关键区域的表征权重。更为重要的是,超分辨率重建方法能够通过深度学习算法提升中低分辨率遥感影像的空间细节表现力,使其逼近高分辨率影像的纹理特征,从而以更低成本实现防护林带破碎化斑块、窄幅林网等细微结构的精准识别,为解决影像获取成本与监测精度之间的矛盾提供了可行性。

鉴于此,本文提出基于深度学习开展防护林信息提取方法研究。首先运用超分辨率重建技术提升中低分辨率遥感影像空间细节,为后续防护林信息提取模型提供高辨识度的数据基础。然后,针对遥感影像中防护林的形态与光谱特征构建语义分割模型实现防护林信息的精准提取。最后,本文将研究成果应用于阿拉尔市,进行阿拉尔市的防护林信息提取,并将成果集成到系统,开发一款进行遥感影像防护林信息提取的系统。

1.2 国内外研究现状

目前,有关防护林工程的理论与技术相对完善,主要包括以下几方面:规划设计、树种选择、空间配置和造林方法^[4]。通过遥感影像提取规划区域内已有的防护林信息能为防护林工程的规划设计、空间配置提供重要的数据支撑。而对于已建成的防护林工程来说,后续的养护工作是其能否长期发挥生态修复作用的关键所在,因养护成本过高,缺乏后续养护资金投入出现的林分退化等问题在全国范围内的各个林场都较为普遍^[5]。为保证防护林工程的养护工作正常进行,需要定期对防护林生长情况进行监测,传统的人工监测方法耗费大量人力财力,因此一种可以快速准确低成本提取防护林信息的方法是极具研究价值的。针对防护林信息提取任务,众多研究者提出了各种遥感图像分割方法如阈值分割法、边缘检测法和多尺度分析法等,这些方法虽各有优势,但在一些特定场景下仍存在局限性。随着遥感影像分辨率的提高,以及科研人员对准确率的不追求,

这些传统方法逐渐无法满足现有的需求。

与此同时，深度学习方法，尤其是卷积神经网络的快速发展，为防护林信息提取任务提供了一种更高效的解决方案^[6]。与传统的遥感影像地物信息提取方法相比，深度学习技术能够自动提取影像中的多层次特征，不仅可以捕捉到影像的低级特征（如纹理、颜色和几何形态），还能够挖掘高级语义特征，从而实现对遥感影像中防护林信息的快速精准提取^[7]。遥感影像信息提取的方法主要包括基于像元的信息提取、面向对象的信息提取和基于深度学习的的信息提取。

1.2.1 基于像元的遥感影像信息提取方法

最早发展的遥感影像信息提取方法主要是围绕以像元为基本单元的局部空间特征计算的算法设计。在基于像元的设计思路上，研究者们使用不同的处理方法设计了多种遥感图像信息提取方法。

有些研究者使用传统的数学形态学方法进行遥感图像中的信息提取。梁俊等^[8]提出了一种基于数学形态学的第四系地层遥感影像分割方法，该方法先用形态学函数高帽变换和低帽变换进行最大对比度的调整。然后通过阈值分割获得包含小对象的图像，进行开闭操作后获得包含大对象的图像，对这两张图像进行与操作并求补即可得到最终的分割结果。潘建平等^[9]结合数学形态学和多结构元素进行道路提取，在 SPOT5 图像上进行形态学开闭、膨胀、腐蚀等运算得到道路基本骨架，最终完成了中高空间分辨率遥感图像中的道路网络信息提取。张丽华等^[10]采用数学形态学方法对 NDVI 梯度图像进行了边缘检测，得到了边缘 NDVI 梯度图，并对其进行了二值化处理，基于圆环形结构元素构建了太仆寺旗人工草地提取模型，从 NDVI 梯度图的二值图像中提取了形状规则的圆形人工草地。另外，有的研究者使用了监督分类或半监督分类的方法。朱建华等^[11]提出了一种多光谱遥感图像的自适应最小距离分类方法，该方法在最小距离法的基础上进行了改进，其设计的自适应最小距离分类器的集合划分是一个由上到下，逐步细化的过程，在实验中该方法相较于最小距离法有了较大的提升。

综上所述，基于像元的方法与具体任务的联系过于紧密，处理的目标往往较为单一，方法的普适性较差。这是因为像元级分割方法主要关注单个像素的分类，而忽略了像素之间的空间关系和语义关联。这种局限性导致其面对复杂的遥感影像时，难以有效处理地物之间的边界和纹理信息，尤其是处理大规模数据时，分割精度和效率都会受到限制。

1.2.2 面向对象的遥感影像信息提取方法

基于像元的信息提取方法根源上是一种简单操作层次上的图像分析，能被表达与计

算的特征非常有限,这种基于局部规则化空间的特征处理方式与人们认识和描述世界的方式实际上是脱节的,并且大多数的基于像元的处理方法与具体任务的联系过于紧密,普适性较差。随着遥感图像空间分辨率的逐渐提高,在计算机视觉的图像分割基础上发展出了面向对象的遥感影像信息提取方法。这种方法首先通过分割提取出图像的基本单元,这种基本单元即为对象,是图像分割后得到的内部属性相对一致或者均质程度较高的图像块,然后计算对象的各种特征并进行归并和标识,完成影像分类和信息提取。这种基本单元相较于像元更加贴近人类对影像视觉感知的认知意义。

Shackelford 和 Davis^[12]对比面向对象分类方法与面向像元分类方法对城市区域高分辨率多光谱影像的分类结果说明面向对象分类方法更适合于城市或城郊区域的分类。曹宝等^[13]利用面向对象方法对 SPOT5 遥感图像进行分类,不仅使分类结果具有丰富的语义信息,有效抑制“椒盐现象”的发生,还可以显著提高分类精度。张峰等^[14]在分析 LIDAR 数据和航空影像、面向对象支持向量机分类技术的基础上提出了融合 LIDAR 数据和航空影像的面向对象支持向量机的建筑物提取方法,克服了阴影对建筑物提取的影响和像素级斑点噪声现象,可以快速而精确地提取建筑物表面,但建筑物边界仍然存在锯齿现象。幸泽峰等^[15]利用面向对象方法处理二值图像,并结合数学形态学方法及 GIS 技术提取出了农田防护林的矢量化结果。周静平等^[16]采用决策树和面向对象相结合的分类方法提取黑龙江省双河农场主要农作物分布信息,并与传统决策树分类方法进行对比,根据实验结果,决策树和面向对象相结合的分类方法能有效剔除田间道路及附属林带沟渠对作物分类的干扰。夏清等^[17]对影像进行面向对象多尺度分割,采用红树林淹没指数作为顾及潮汐影响的表征参数,结合随机森林分类方法完成中国红树林高分遥感制图。He 等^[18]提出了一种基于关键点检测的遥感影像定向目标检测方法,通过将定向边界框简化为中心旋转椭圆,并利用六参数表示法描述每个中心旋转椭圆,结合高分辨率门控聚合网络和偏心率加权方向损失,有效解决了复杂背景和大尺度变化对检测精度的影响。

综上所述,面向对象的遥感图像信息提取方法与人类的空间认知逻辑具有内在一致性,其通过对象化语义单元构建的技术路径,相较于传统基于像元提取方法,更符合地理实体的空间整体性特征,且能够有效融合多源知识规则。然而,该方法体系在继承计算机视觉图像分割技术优势的同时,仍面临地理学机理表达不足、形态学特征与地学过程关联性弱、领域知识建模不充分等核心挑战,特别是在复杂地表覆盖场景下易出现语义鸿沟问题。

1.2.3 基于深度学习的遥感影像信息提取方法

现有方法在特定应用场景下虽可实现遥感影像信息提取,但为达到预期精度往往依赖人工干预参数优化(如分割阈值设定),这种手动调参过程不仅耗时费力且引入主观

偏差,难以适应现代大规模遥感数据处理对自动化、标准化处理流程的需求,而深度学习技术能很好的解决这个问题。

党宇等^[19]使用 AlexNet 模型进行遥感影像地表覆盖分类研究,在实验中对于数据量充足的房屋、耕地等地表类型的正确分类隶属度可达到 90%以上。在卷积神经网络的基础上 Long 等^[20]于 2015 年提出了全卷积神经网络,通过将卷积神经网络的全连接层更换为卷积层,卷积所具有的尺寸不变性让模型能够不限制输入图片的大小,输出保留上下文空间特征的图像,实现图像像素级别端到端的预测,扩大了模型的适用范围。Marmanis 等^[21]将 FCN 运用到了遥感图像的语义分割任务中,他们对 FCN 网络进行了改进,在该网络的不同层之间添加了一些跳跃连接来确保不同层次的特征信息能得到充分利用,取得了较好的实验结果。为了改善 FCN 网络在遥感图像地物信息提取任务上的表现,龚健雅等^[22]提出一种基于多源数据的遥感知知识感知与多尺度特征融合网络在网络编码器端融入遥感知知识感知模块,高效挖掘多源遥感数据中的遥感知知识信息;在网络编码器和解码器之间添加了串并联混合空洞卷积模块,提高网络对地物多尺度特征的学习能力;在解码器端使用了渐进式多层特征融合策略,细化最终的地物分类结果。Susana 等^[23]通过改进的深度卷积神经网络架构,对高分辨率遥感影像中的地物进行分类,显著提高了分类精度和模型的鲁棒性,为高分辨率遥感影像的地物分类提供了新的解决方案。U-Net 网络则在 FCN 的基础上添加了更多的跳跃连接,在解码阶段复用编码阶段的低层特征,从而能够更好的利用纹理信息。苏健民等^[24]使用 U-Net 网络进行了遥感图像的语义分割实验,并且根据遥感图像的特点对 U-Net 网络的结构进行了调整,使网络更适合于进行遥感影像的语义分割。Li 等^[25]则将一些有助于特征提取的深度学习模块如非对称卷积、通道注意力机制模块加入了 U-Net 网络中,并对 U-Net 的 skip-connection 进行了调整,根据实验结果,非对称卷积及注意力机制模块的加入让网络更侧重于中心信息的特征提取,忽略了一些边缘的无用信息,在城市土地分类中有较好的表现。

还有一些研究者将遥感影像中针对各种地物提出的遥感指数与深度学习方法相结合,提高模型对于特定地物的提取效果。薛雨等^[26]用计算植被归一化指数作为新波段替代红光波段与绿、蓝波段进行合成,更加突出植被信息,利用深度学习训练冬小麦提取模型,实现冬小麦种植范围的自动提取,提取精度为 94.39%。廖金雷等^[27]提出了一种融合植被指数的 3D-2D-CNN 高光谱图像植被分类方法,在输入数据中融合了主成分波段特征与植被指数信息,不仅提升了其在分类效果上的表现,而且不牺牲分类性能的基础上,减小了计算量。杜培军等^[28]提出了一个新型塑料大棚指数与高分 RGB 影像相融合的深度学习模型,研究发现,在注意力机制引导的融合框架下,中分辨率的新型塑料大棚指数可有效提升高分影像的塑料大棚识别能力。

综上所述,对于遥感影像防护林提取任务的研究,前两种方法需要人为选取特征,