doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.02.033

基于深度学习和遥感影像的黄土丘陵沟壑区浅沟提取及其发育特征

刘勃洋　苑紫岩　郭家龙　石学瑾　吴淑芳　冯　浩
（西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室，陕西杨凌 712100）

摘要：浅沟侵蚀是黄土高原坡耕地的主要侵蚀方式之一，严重破坏了黄土高原的耕地资源。为探究基于遥感影像的黄土高原浅沟快速识别方法，并分析浅沟变化及其时空分布特征，本研究选取陕西省延安市周屯沟流域浅沟为研究对象，利用高空间分辨率遥感影像与深度学习图像语义分割模型，探究了 U－Net 和 SegNet 模型在黄土高原丘陵沟壑区浅沟识别性能，阐明了周屯沟流域浅沟时空分布与发育特征。结果表明：SegNet 模型在浅沟识别中具有较好的完整性和准确性，其准确率和召回率分别不小于 82.59% 和 91.12%；浅沟主要集中分布于流域地形破碎的南部区域，在河谷平原地区鲜有浅沟分布，浅沟分布具有丛生特点；2009—2021 年间共有 215 条浅沟消失，938 条空间位置未发生明显变化浅沟（原位浅沟），新增 1 374 条浅沟；浅沟沟长主要分布在 25～40 m 之间，沟宽在 1.00～1.50 m 之间，浅沟沟长、沟宽、面积、沟密度、割裂度和沟头前进距离多年间平均发育速率分别为 1.66 m/a、0.04 m/a、1.83 m^2/a、4.94×10^{-5} km/($km^2\cdot a$)、5.45×10^{-6} a^{-1}和 1.66 m/a。流域内“治沟造地”工程实施和油气平台开发以及近年来极端降雨事件频发，极大地促进了流域内浅沟的空间分布变化及形态发育。本研究为黄土高原丘陵沟壑区浅沟识别提供了一种有效方法，同时也为黄土高原地区土壤侵蚀和坡沟治理提供了参考。

关键词：高空间分辨率遥感影像；语义分割模型；浅沟识别；浅沟发育；黄土高原
中图分类号：S157　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2026)02-0344-10　　**OSID**：

Extraction and Development of Ephemeral Gullies in Hilly and Gully Areas of Loess Plateau Based on Deep Learning and Remote Sensing Image

LIU Boyang　YUAN Ziyan　GUO Jialong　SHI Xuejin　WU Shufang　FENG Hao
(*Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Areas*, *Ministry of Education*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: Ephemeral gully erosion is one of the main erosion modes on sloping farmland, which seriously damages the farmland resources, exacerbates the contradiction between people and food, and seriously hinders the sustainable economic and social development of the Loess Plateau. In order to explore the identification method and analyze the spatial-temporal distribution and development characteristics of ephemeral gullies in the Loess Plateau based on remote sensing images, ephemeral gullies in the Zhoutungou watershed of Yan'an City, Shaanxi Province were selected as the research object, combined high-resolution remote sensing images and deep learning image semantic segmentation model, the application effect of the U－Net and SegNet model in identifying ephemeral gullies and the spatiotemporal distribution were explored and the development characteristics of ephemeral gullies in the Zhoutungou watershed were cleared. The results showed that the SegNet model had excellent integrity and accuracy in ephemeral gully recognition, with model accuracy and recall no less than 82.59% and 91.12%, respectively. The ephemeral gully length and width between predicted and measured values had RMSE values of 6.78 m and 0.50 m, respectively, indicating that the model had an excellent recognition effect. Ephemeral gullies were mainly distributed in the southern region of the watershed with fragmented terrain, and there were few ephemeral gullies in the valley plain area. The distribution of ephemeral gullies had a clustered characteristic. Totally 215 ephemeral gullies disappeared, 938 ephemeral gullies (in-situ

收稿日期：2024－09－30　修回日期：2024－10－22
基金项目：国家自然科学基金项目(41977064)
作者简介：刘勃洋(1997—)，男，博士生，主要从事土壤侵蚀过程研究，E-mail：13992733170@163.com
通信作者：吴淑芳(1977—)，女，研究员，博士生导师，主要从事土壤侵蚀过程研究，E-mail：wsfjs@163.com

ephemeral gullies) with no significant changes in spatial location, and 1 374 new ephemeral gullies were added from 2009 to 2021. Ephemeral gullies were mainly distributed between 25 ~ 40 m in length and 1.0 ~ 1.5 m in width. The average annual development rates of ephemeral gullies in length, width, area, density, dissection degree and head advance distance were 1.66 m/a, 0.04 m/a, 1.83 m^2/a, 4.94×10^{-5} km/(km^2·a), 5.45×10^{-6} a^{-1} and 1.66 m/a, respectively. The implementation of the gully land consolidation project, the development of oil and gas platforms, and the frequent occurrence of extreme rainfall events in recent years had greatly promoted the spatial distribution changes and morphological development of ephemeral gullies in the study area. The research result can provide an efficient and accurate method for identifying ephemeral gullies in hilly and gully areas of the Loess Plateau, and also provide a reference for soil erosion and slope and gully management in the Loess Plateau.

Key words: high resolution remote sensing images; semantic segmentation models; ephemeral gully identification; ephemeral gully development; Loess Plateau

0　引言

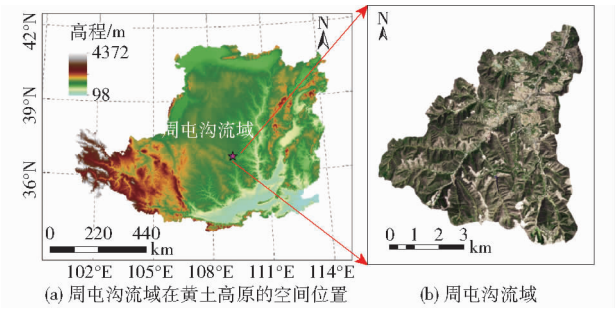
中国黄土高原作为全球黄土地貌发育最典型区域,被誉为全球最具有地学研究价值的独特地理区域之一,同时也是我国土壤侵蚀最严重地区。黄土高原地貌破碎、土质松散、暴雨集中,加之不合理的人类活动,使得该地区水土流失异常严重,侵蚀区域面积达 4.3×10^5 km^2[1-4]。浅沟侵蚀是一种常发生在陡坡耕地上的线性侵蚀方式,其沟槽加剧了径流汇集和冲刷,导致更加严重的水土流失,使得耕地资源和生态环境遭到极大破坏。

浅沟侵蚀作为黄土高原坡耕地的主要侵蚀方式之一,以往研究多集中于野外定位观测和室内模型试验[5-8]。近年来,随着遥感技术的快速发展,遥感影像数量和质量的不断提升为浅沟侵蚀研究提供了一种新思路。目前基于遥感影像的浅沟识别方法主要有目视解译法、面向像元分析法、面向对象分析法。其中,目视解译起源于 20 世纪 60 年代,仲原等[9]基于亚米级影像采用目视解译获取了黄土高原 137 个调查单元的浅沟信息,发现黄土高原 33.60% 调查单元存在浅沟,其中黄土丘陵沟壑区平均浅沟密度最大,浅沟侵蚀强度极强烈。虽然目视解译方法具有成本低、准确度高等优势,但其解译结果受遥感影像分辨率等影响,不确定性较大,同时也存在解译过程费时费力、效率低等缺点[10]。

面向像元分析方法以单个栅格为分析单元,通过设定规则逐栅格判断以实现整个研究区域的切沟识别。根据数据源的不同,该方法包含基于地形数据分析和基于影像数据分析 2 类方法。基于地形数据的方法依赖边缘检测、基于形态特征的分析或两者结合实现对浅沟信息提取[11-12]。使用地形数据比目视解译方法的提取效率固然高,但研究中需使用机载激光雷达数据构建高分辨率地形数据,对于大面积的高分辨率地形数据难以获取,并且基于地形数据的浅沟提取结果依赖于地形数据精度。基于影像数据分析方法主要利用地物光谱信息进行浅沟提取,其优势在于可发挥影像数据丰富且多时相特征,缺点在于需训练样点,要求用户在对研究区域有深刻了解的基础上仔细分析光谱特征。随着高分辨率遥感影像的出现,其包含的丰富多维信息如几何特征、纹理特征等在基于像元层次上不能被有效利用,由此,出现了面向对象分析方法,KARANI 等[13]研究表明面向对象分析方法更适合处理浅沟的光谱异质性。面向对象分析法通过将具有较高同质性的栅格组合成对象,以对象为分析单元进行特征提取,主要优点是充分利用几何信息、结构信息和光谱信息,效率高,但其缺少三维地形信息,同时极易受到地表覆盖物的影响[14-15]。

近年来,随着遥感技术和信息处理技术的快速发展,深度学习技术的出现为浅沟侵蚀研究带来了新机遇。深度学习作为一种无需人工设计特征、能够自动提取复杂特征的技术[16],在遥感影像分析中得到了广泛应用。尤其是卷积神经网络(Convolutional neural network, CNN)在图像分类、目标检测、语义分割等任务中展现了强大优势,成为浅沟侵蚀识别的新兴手段。与传统方法相比,CNN 能够从遥感影像中自动学习到浅沟的多级特征表示,使其更适应浅沟的复杂性和可变性。于佩鑫等[17]采用 CNN 对东北黑土区的侵蚀沟进行特征提取,结果表明中层和深层特征提取的识别精度较高,其中深层特征无需人工设计,识别过程高度自动化。自 KRIZHEVSKY 等[18]在 2012 年提出 AlexNet 并在 ImageNet 大赛中取得突破以来,基于 CNN 的深度学习模型如 U-Net、全卷积网络(Fully convolutional networks, FCNs)和 SegNet 等被广泛应用于遥感图像的语义分割任务。然而,浅沟形态更加复杂、尺度更小,如何高效、准确地在流域尺度上对浅沟进行识别与提取,仍是当前亟待解决的问题。

因此,本研究以黄土高原丘陵沟壑区周屯沟流域宽度为 0.5 ~ 4.0 m 浅沟为研究对象,基于高空间分辨率遥感影像和深度学习图像语义分割模型进行流域浅沟识别与提取研究,阐明浅沟在 2009—2021 年时间序列上的空间分布及发育特征,提出一种适合于黄土高原丘陵沟壑区浅沟识别与提取的有效方法,旨在为黄土高原地区土壤侵蚀和坡沟治理提供科学参考。



(a) 周屯沟流域在黄土高原的空间位置 (b) 周屯沟流域

图 1 研究区位置信息

Fig. 1 Location of study area

1 研究区概况

周屯沟流域位于陕西省延安市安塞区境内,地理空间为 36°42′10″ ~ 36°47′10″N、109°09′00″ ~ 109°13′45″E,流域面积 33.6 km^2,海拔在 1 026 ~ 1 439 m 之间(图 1)。该流域地处中温带大陆性半干旱季风气候区,年平均气温和降雨量分别为 8.8℃ 和 500 mm 左右(7—9 月降雨量占全年 74%)。流域内沟壑纵横、梁峁遍布,土壤以黄绵土为主,土壤疏松,多粉沙,易受水力侵蚀。

2 材料与方法

2.1 基础数据

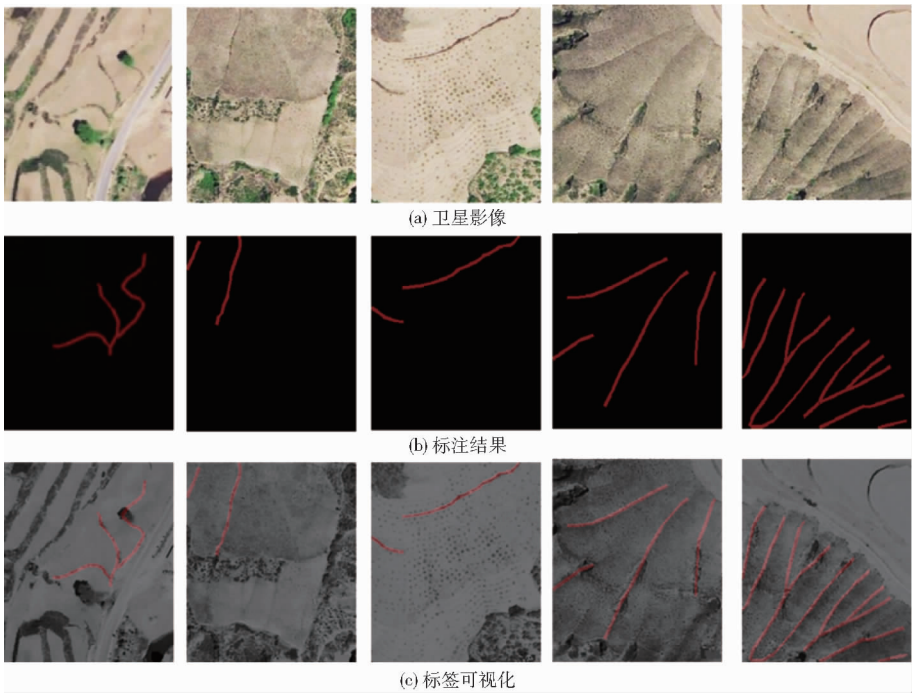
采用 2009 年和 2021 年周屯沟流域遥感影像数据,其中,2009 年影像数据来源于 QuickBird 卫星,空间分辨率为 0.61 m。2021 年影像数据为大疆精灵 4 RTK 型无人机拍摄,经过数据拼接及处理后获得空间分辨率为 0.50 m 的影像数据。

2.2 样本数据集制作与处理

在使用图像语义分割模型训练前需制作数据集。若输入图像尺寸过大会导致模型计算量过大,从而影响模型效率,反之,输入图像尺寸过小会影响模型训练精度,因此将遥感影像切割成 256 像素 × 256 像素图像,采用 Labelme 标注软件对图像进行标签制作,部分数据集标注结果如图 2 所示。本研究只识别浅沟,故将每个像素分为浅沟和背景 2 类。

在构建的样本数据集中,由于每一维特征的来源不同,其特征值分布范围差异很大,同时也存在由曝光不足或过度曝光引起的图像误差,需对样本数据集进行数据预处理以消除图像误差和提高图像处理效率,采用伽马变换、灰度变化和图像标准化等处理方法。

深度学习算法一般需要大量训练数据才能获得比较理想的结果,在数据量有限情况下,一般通过数据增强增加训练样本量,常用数据增强方法包括翻转、旋转、缩放比例、裁剪和移位等。采用翻转、旋转和移位进行数据增强,经过数据增强后共有 18 000 个样本数据。为使模型得到充分训练,将


(a) 卫星影像

(b) 标注结果

(c) 标签可视化

图 2 部分数据集标注结果

Fig. 2 Some samples of dataset

90% 数据用于模型训练，10% 数据用于模型验证，独立的验证集不仅能检测和防止模型过拟合，也能提供对模型泛化能力的可靠评估。

2.3　语义分割模型构建与评价

U－Net 模型是由 Encoder 网络和 Decoder 网络构成的语义分割模型[19]，其中 Encoder 网络结构先通过卷积和池化获得深层次的特征图，然后在 Decoder 网络对特征图进行上采样扩展，将上采样后的特征图与 Encoder 网络中的特征图合并。U－Net 模型是一个经典的全卷积网络模型，已被广泛应用于建筑和道路识别等领域[20－22]。采用的 U－Net 模型共有 9 层结构，Encoder 结构共有 5 组卷积和 4 次池化，每组卷积由 2 层卷积组成，卷积核尺寸为 3×3，在每层卷积之后接 1 个归一化层，池化采用最大池化；Decoder 结构先通过上采样，再和编码结构相应的特征图连接，然后进行卷积，卷积过程中采用 ReLU 激活函数（图 3）。模型结构最后一层使用 1×1 的卷积输出分割结果，激活函数采用 Sigmoid 函数。

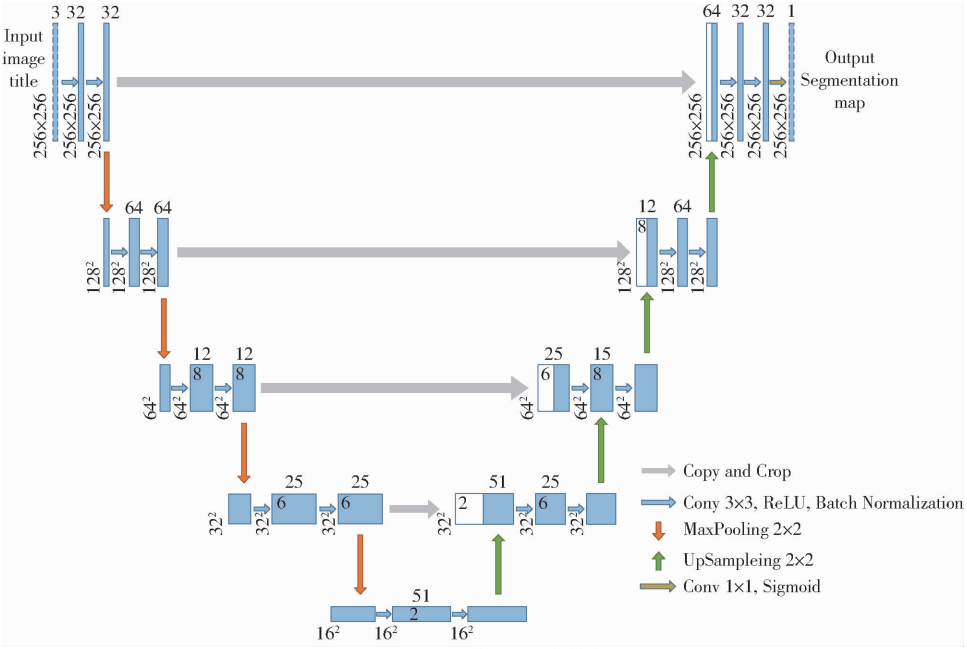


图 3　U－Net 模型网络结构图

Fig. 3　Network structure diagram of U－Net model

SegNet 模型是一种通过像素到像素实现图像分割的卷积神经网络，其核心组件由 Encoder 网络、相对应的 Decoder 网络以及像素级别的分类器 3 部分组成[23]。SegNet 模型与其他模型相比，具有训练参数较少、占用内存小和网络训练时间短等优点，已被应用于各项研究[24－26]。本模型 Encoder 部分通过卷积层提取影像的高维特征，卷积层由 3×3 卷积核、ReLU 激活函数和 Batch Normalization 归一化函数组成，通过最大池化降低卷积操作输出特征图尺寸；Decoder 通过反卷积获得图像特征，上采样增大图像尺寸，最后通过 Sigmoid 分类器输出分类图谱。由于 Encoder 部分经过大量池化操作丢失了特征图的边界信息，在 Decoder 部分采用最大池化索引对输入特征图进行上采样，提升特征图边缘刻画度的同时减少模型训练参数，并在分割中保持高频细节的完整性（图 4）。

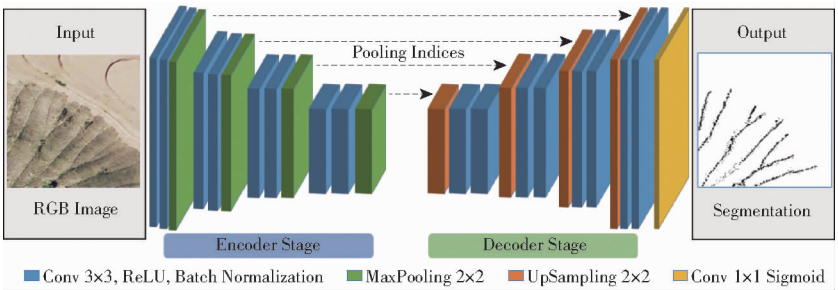


图 4　SegNet 模型网络结构图

Fig. 4　Network structure diagram of SegNet model

模型训练与验证均基于 Python 编程语言，运行框架为 TensorFlow（GPU）和 Keras，硬件配置为 Inter（R）Core（TM）i7－8700@3.20 GHz＋GeForce GTX 1050 Ti 4G，模型优化器选用 Adam 优化器，初始学

习率为 1×10^{-5},模型迭代次数为 75 次,批量大小为 2,采用 Tversky Loss 损失函数。

使用准确率(Accuracy)、精确率(Precision)、召回率(Recall)、F1 值和曲线下面积(Area under curve,AUC)5 个指标评价 U-Net 和 SegNet 模型性能,其中,准确率是指所有预测正确像元占总像元比重;精确率是指正确预测为正的像元占全部预测为正的像元比重;召回率是指正确预测为正的像元占全部为正的像元比重;F1 值是对精确率和召回率进行加权,其值越大表明模型越好;AUC 定义为接收者操作特征(Receiver operating characteristic curve,ROC)曲线下的面积,其取值范围一般在 50% ~ 100% 之间。

2.4 浅沟形态参数提取

将浅沟识别后结果图导入 ArcGIS 软件,利用 Spatial Analyst 工具和 3D Analyst 工具提取浅沟形态参数,包括浅沟数量、长度、宽度、面积、沟密度和割裂度。浅沟长度是在 ArcGIS 软件中,利用属性计算功能获取浅沟的投影长度,用该长度除以对应的坡面坡度余弦值。浅沟宽度是在一条浅沟内等距离选取 5 个断面,用距离测量功能计算各断面水平距离,取 5 个断面宽度平均值。浅沟面积是在 ArcGIS 软件中通过属性表获得。沟密度和割裂度分别是指流域单位面积上的浅沟长度和面积。

3 结果与分析

3.1 语义分割模型浅沟识别效果与评价

选取 U-Net 和 SegNet 2 种深度学习语义分割模型经过多次迭代训练后的最优权重,将其应用于影像预测(图 5,图中椭圆表示假阳性),结果表明 U-Net 和SegNet 在黄土高原丘陵沟壑地区浅沟识别中均具有良好效果。与 U-Net 模型相比,SegNet 模型在浅沟识别中具有更好的效果,但 2 种模型均存在将田坎等地物错误识别为切沟(即假阳性)。

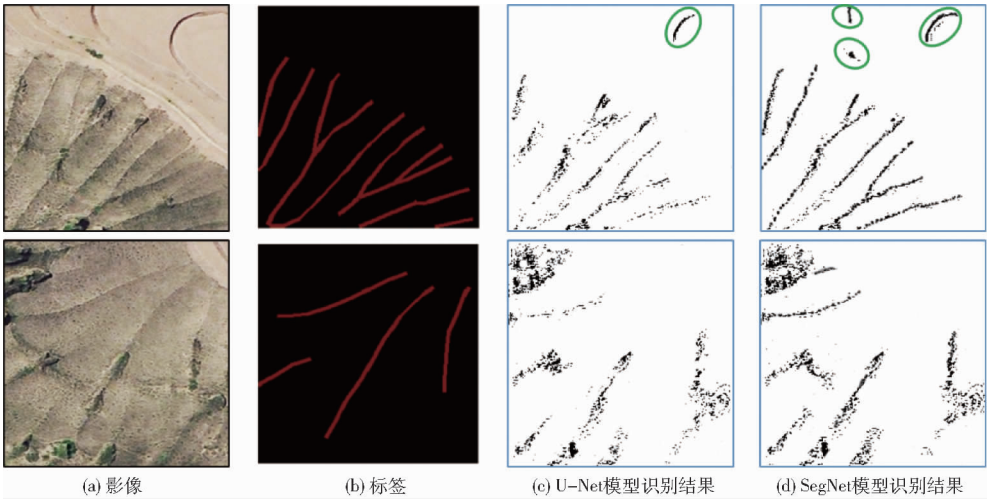


图 5 深度学习语义分割模型在周屯沟流域浅沟识别结果

Fig. 5 Recognition results of semantic segmentation models in Zhoutungou watershed

2 种模型在训练与测试数据集的准确率、精确率、召回率、F1 值和 AUC 评价语义分割模型识别浅沟的精度如表 1 所示,在训练数据集上 SegNet 模型准确率和召回率分别为 89.84% 和 93.69%,比 U-Net 模型提高 4.21、3.72 个百分点;在测试数据集上 SegNet 模型准确率和召回率分别为 82.59% 和 91.12%,比 U-Net 模型提高 1.85、2.50 个百分点,表明 SegNet 模型在浅沟识别中具有更好的完整性和准确性。从 AUC 来看,SegNet 模型在训练和测试数据集的 AUC 均超过 63%,比 U-Net 模型均提高 10% 以上,表明 SegNet 模型在黄土高原丘陵沟壑区的浅沟识别和提取中具有更好的适用性。

表 1 深度学习语义分割模型浅沟识别精度

Tab. 1 Assessment of semantic segmentation models in Zhoutungou watershed %

数据集	模型	准确率	精确率	召回率	F1 值	AUC
训练	U-Net	85.63	62.18	89.97	73.54	59.42
	SegNet	89.84	66.03	93.69	77.46	65.38
测试	U-Net	80.74	57.25	88.62	69.56	57.51
	SegNet	82.59	59.83	91.12	72.24	63.64

3.2 SegNet 模型实地验证

为进一步评价 SgeNet 模型对黄土丘陵沟壑区浅沟识别效果及基于其提取的浅沟形态参数,重新选择 2 幅未标注图像来评价 SgeNet 模型识别效果(图 6,图中黑色为正确识别浅沟,绿色为假阴性)。从图 6 可看出,模型对黄土丘陵沟壑区浅沟识别仍表现出优异的识别效果,2 幅图像中共识别出 18 条浅沟,有 1 条浅沟未被识别,这表明 SgeNet 模型可以适用于黄土高原丘陵沟壑区的浅沟识别。

通过野外实地调查采样,实测了 2 幅图像中 18



图 6　SegNet 模型在黄土丘陵沟壑区浅沟识别效果

Fig. 6　Extraction ephemeral gulluies by using SegNet model in hilly and gully areas of Loess Plateau

条浅沟沟长和沟宽参数，并与在本文模型浅沟识别结果提取的形态参数进行对比，18 组沟长和 157 组沟宽实测值与预测值间关系如图 7 所示。浅沟沟长实测值与预测值之间决定系数 R^2 为 0.981 7（$p < 0.000\ 1$），均方根误差（RMSE）为 6.78 m；浅沟沟宽实测值与预测值之间 $R^2 = 0.857\ 3$（$p < 0.000\ 1$），RMSE 为 0.50 m。表明 SegNet 模型在浅沟识别方面具有较好的完整性和准确性，可以适用于黄土高原丘陵沟壑区浅沟识别及浅沟形态参数提取。

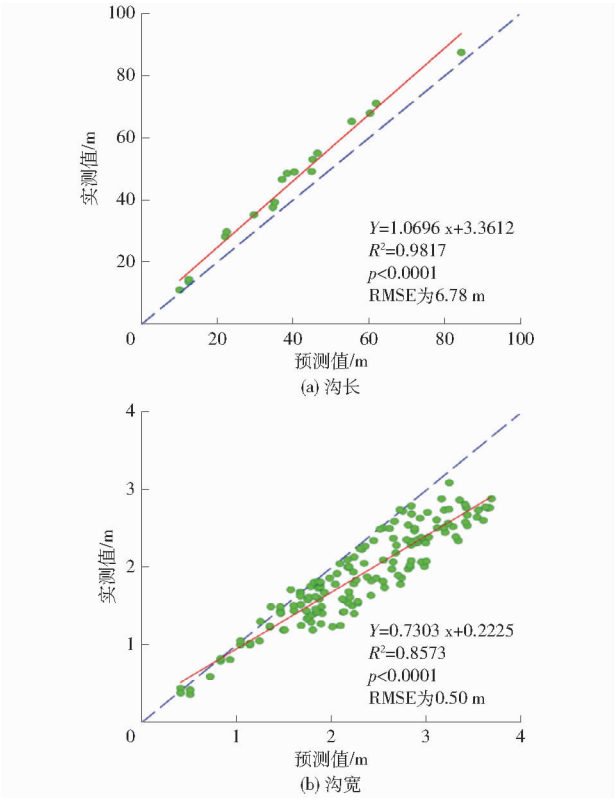


图 7　浅沟沟长和沟宽实测值与预测值比较

Fig. 7　Relationship between predicted and measured values for gully length and width of ephemeral gullies

3.3　浅沟时空分布特征

图 8 为 2009—2021 年浅沟空间分布及其变化情况，明确、清晰地反映了流域内浅沟的空间分布演变情况，流域内浅沟出现密集分布情况，具有丛生特点。浅沟主要集中分布于流域南半部分区域（36°42′10″～36°45′12″N、109°10′19″～109°13′32″E），该部分区域多为梁峁，地形地貌复杂，坡面坡度较大，在径流冲刷下易发生浅沟侵蚀。流域内浅沟在 2009—2021 年间发生了巨大变化，浅沟数量从 1 153 条增加到 2 312 条。2009—2021 年间共有 215 条浅沟消失，占 2009 年浅沟数量的 18.65%；938 条原位浅沟（2009—2021 年空间位置未发生过明显变化的浅沟），占 2009 年浅沟数量的 81.35%；新增 1 374 条浅沟，占 2021 年浅沟数量的 59.43%。新增浅沟多分布于流域地形复杂区域，在河谷平原地区鲜有浅沟形成；与此同时，流域内也有少量浅沟消失。造成浅沟消失的原因主要有：①部分浅沟发育成为切沟。②油气井平台建设和治沟造地工程实施以及相配套的道路建设掩埋了坡面上的浅沟从而使得浅沟消失。

3.4　浅沟形态发育特征

2009 年浅沟沟长为 7.00～209.50 m，平均沟长 48.39 m；2021 年浅沟沟长为 5.00～209.50 m，平均沟长 45.84 m（表 2）。2009 年和 2021 年浅沟沟宽分别为 0.50～2.50 m 和 0.50～2.00 m，近 70% 的浅沟沟宽为 1.00～1.50 m，2021 年与 2009 年相比未出现沟宽 2.50 m 浅沟。2009 年浅沟面积为 6.50～230.71 m^2，平均值为 49.12 m^2；2021 年浅沟面积为 5.36～209.50 m^2，平均值为 46.36 m^2。2009 年和 2021 年浅沟密度平均值分别为 1.44×10^{-3}、1.36×10^{-3} km/km^2，2009 年和 2021 年浅割裂度平均值分别为 1.46×10^{-4} 和 1.38×10^{-4}。2009—2021 年浅沟沟头前进距离为 −180.00～153.00 m，平均值为 19.90 m，沟头前进距离为负值的原因是包括消失浅沟沟头前进距离变化情况。

2009 年和 2021 年原位浅沟沟长分别为 7.00～209.50 m 和 9.00～209.50 m，平均值分别为 50.07、54.96 m；原位浅沟沟宽均为 1.00～1.50 m，其发育速率较小；原位浅沟面积分别为 6.50～230.71 m^2 和 8.36～209.50 m^2，平均值分别为 50.59、55.70 m^2；原位浅沟沟头前进距离为 −120.00～87.50 m，平均值为 4.76 m。

2009—2021 年平均每条浅沟沟长、沟宽、面积、沟密度、割裂度和沟头前进距离发育速率分别为 1.66 m/a、0.04 m/a、1.83 m^2/a、4.94×10^{-5} $km/(km^2 \cdot a)$、5.45×10^{-6} a^{-1} 和 1.66 m/a，其中，原位浅沟沟长、沟宽、面积、沟密度、割裂度和沟头前进距离发育速率分别为 0.41 m/a、4.76×10^{-4} m/a、0.43 m^2/a、1.22×10^{-5} $km/(km^2 \cdot a)$、1.28×10^{-6} a^{-1} 和 0.40 m/a。

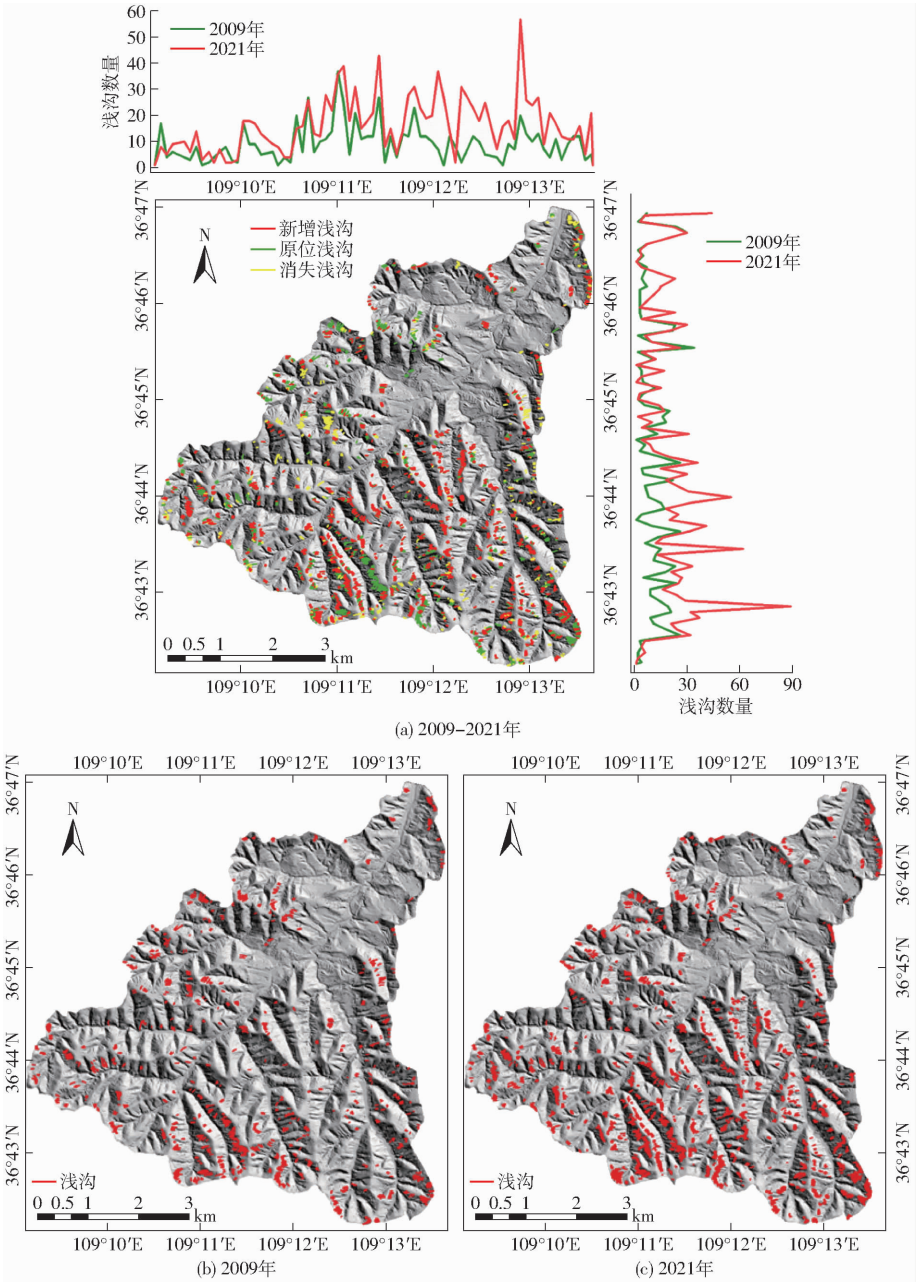


图 8 2009—2021 年周屯沟流域浅沟时空分布

Fig. 8 Spatial-temporal distribution of ephemeral gullies in Zhoutungou watershed from 2009 to 2021

4 讨论

本研究结果表明深度学习语义分割模型在黄土高原丘陵沟壑地区浅沟识别中具有良好的应用效果,但该方法的预测结果中也存在一些误差,如图 5 中绿色椭圆所示模型将田坎或其他地物识别为浅沟,即假阳性,这是由于该部分地物的像素值和形状与浅沟相似,降低了模型精度;此外,由于本研究所采用的遥感影像均是正射投影,部分浅沟受到植被或其他地物遮挡,导致流域内部分浅沟未被正确识别,即假阴性,与前人研究一致[27]。因此在选取遥感影像时需避免植被茂盛时期影像,在黄土高原丘陵沟壑区,建议选取 3—5 月的遥感影像进行浅沟识别。此外,浅沟具有独特的地表形态特征,若在模型训练过程中光谱信息与地形信息相叠加将有助于提高浅沟识别结果,然而浅沟作为一种微地貌,其对 DEM 数据的分辨率要求较高,现有的 DEM 数据分辨率无法满足浅沟识别需求,尤其是在大面积上的浅沟识别和提取。

本研究依据 2009 年遥感影像共识别出 1 153 条浅沟,与姜永清等[28]在 1999 年基于 1∶13 000 全色黑白航片的 4 495 条浅沟相比,周屯沟流域浅沟数量锐减,其主要原因是经过 10 年的自然发育,浅沟已经发育成切沟;此外,退耕还林工程大幅提高了黄土高原的植被覆盖度,减少了坡面土壤侵蚀,从而抑制了浅沟形成与发育[29-33]。2009—2021 年期间浅沟出现了

表 2　2009 年和 2021 年浅沟形态参数统计

Tab. 2　Statistics of ephemeral gullies morphological features in 2009 and 2021

参数		所有浅沟		原位浅沟	
		2009 年	2021 年	2009 年	2021 年
沟长	最小值/m	7.00	5.00	7.00	9.00
	最大值/m	209.50	209.50	209.50	209.50
	平均值/m	48.39	45.84	50.07	54.96
	2009—2021 年平均发育速率/(m·a^{-1})	1.66		0.41	
沟宽	最小值/m	0.50	0.50	1.00	1.00
	最大值/m	2.50	2.00	1.50	1.50
	平均值/m	1.01	1.01	1.00	1.00
	2009—2021 年平均发育速率/(m·a^{-1})	0.04		4.76×10^{-4}	
面积	最小值/m^2	6.50	5.36	6.50	8.36
	最大值/m^2	230.71	209.50	230.71	209.50
	平均值/m^2	49.12	46.36	50.59	55.70
	2009—2021 年平均发育速率/(m^2·a^{-1})	1.83		0.43	
沟密度	最小值/(km·km^{-2})	2.08×10^{-4}	1.49×10^{-4}	2.08×10^{-4}	2.68×10^{-4}
	最大值/(km·km^{-2})	6.24×10^{-3}	6.24×10^{-3}	6.24×10^{-3}	6.24×10^{-3}
	平均值/(km·km^{-2})	1.44×10^{-3}	1.36×10^{-3}	1.51×10^{-3}	1.64×10^{-3}
	2009—2021 年平均发育速率/(km·km^{-2}·a^{-1})	4.94×10^{-5}		1.22×10^{-5}	
割裂度	最小值	1.93×10^{-5}	1.60×10^{-5}	1.93×10^{-5}	2.49×10^{-5}
	最大值	6.87×10^{-4}	6.24×10^{-4}	6.87×10^{-4}	6.24×10^{-4}
	平均值	1.46×10^{-4}	1.38×10^{-4}	1.51×10^{-4}	1.66×10^{-4}
	2009—2021 年平均发育速率/a^{-1}		5.45×10^{-6}		1.28×10^{-6}
沟头前进距离	最小值/m	−180.00		−120.00	
	最大值/m	153.00		87.50	
	平均值/m	19.90		4.76	
	2009—2021 年平均发育速率/(m·a^{-1})	1.66		0.40	

一定数量的增加，即从 1 153 条增加至2 312 条浅沟，该现象主要由 2 个因素引起：①近年来黄土高原极端降雨事件愈发频繁，结合黄土高原的土壤特性，极易在坡面形成浅沟[34-36]。②2011 年以来研究区实施“治沟造地”工程，该工程给黄土高原创造了更多耕地和一定程度上减少了流域侵蚀，但治沟造地工程实施过程中涉及表土剥离和田坎修筑等工程手段，严重破坏了坡面植被和土壤环境，使得坡面变陡和土体结构松散，导致在坡面上形成新的浅沟[37-39]。

本研究发现浅沟长度为 5.00 ~ 209.50 m，且主要分布在 25 ~ 40 m 之间。相比之下，在黄土高原其他研究中发现的浅沟比本研究的浅沟更长[28,40]，前人研究发现浅沟长度为 7.71 ~ 237 m，平均长度 56.50 m，60% 浅沟分布在 30 ~ 60 m 之间。这种差异归因于：①研究区内油气资源开采和“治沟造地”工程实施严重破坏了坡面，埋没或切断了坡面上的浅沟，尽管 2009—2021 年新形成了大量浅沟，但其发育时间短，浅沟长度和宽度等形态参数值较小。②黄土高原降雨多集中于夏秋季，存在暴雨多、强度大、历时长等特点，在溯源侵蚀和沟壁崩塌作用下浅沟易发育成切沟。

5　结论

（1）针对黄土丘陵沟壑区复杂地形下浅沟侵蚀发育监测，验证了深度学习语义分割模型（U − Net 和 SegNet 模型）识别浅沟的可行性。与 U − Net 模型相比，SegNet 模型在黄土高原丘陵沟壑区浅沟识别中具有更好的应用效果，能够高效准确地识别浅沟。

（2）黄土丘陵沟壑区浅沟具有丛生特点，浅沟主要分布在研究区域南部（36°42′10″ ~ 36°45′12″N、109°10′19″ ~ 109°13′32″E），2009—2021 年间共有 215 条浅沟消失（18.65%），938 条原位浅沟（81.35%），新增 1 374 条浅沟（59.43%）。流域内“治沟造地”工程实施和油气平台开发以及近年来极端降雨事件频发，促进了流域内浅沟的空间分布变化及形态发育。

（3）多年间平均每条浅沟沟长、沟宽、面积、沟密度、割裂度和沟头前进距离发育速率分别为 1.66 m/a、0.04 m/a、1.83 m^2/a、4.94×10^{-5} km/(km^2·a)、5.45×10^{-6} a^{-1}和1.66 m/a。本研究为黄土丘陵沟壑区浅沟识别提取提供了一种有效方法，也为黄土高原土壤侵蚀监测和坡沟治理技术提供了理论参考和实践指导。

参 考 文 献

[1] 朱显谟. 黄土高原的形成与整治对策[J]. 水土保持通报, 1991, 11(1): 1 - 8, 11.
ZHU Xianmo. The formation of Loess Plateau and its harnessing measures[J]. Bulletin of the Soil and Water Conservation, 1991, 11(1):1 - 8, 11. (in Chinese)

[2] 郑粉莉, 王占礼, 杨勤科. 我国土壤侵蚀科学研究回顾和展望[J]. 自然杂志, 2008, 30(1): 12 - 16.
ZHENG Fenli, WANG Zhanli, YANG Qinke. The retrospection and prospect on soil erosion research in China[J]. Chinese Journal of Nature, 2008, 30(1): 12 - 16. (in Chinese)

[3] 高江波, 周巧富, 常青, 等. 基于 GIS 和土壤侵蚀方程的农业生态系统土壤保持价值评估——以京津冀地区为例[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2009, 45(1): 151 - 157.
GAO Jiangbo, ZHOU Qiaofu, CHANG Qing, et al. Evaluating the ecological service function of soil conservation based on RUSLE and GIS[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2009, 45(1): 151 - 157. (in Chinese)

[4] 齐晓君, 王恩德, 贾三石. 基于 GIS 和 RS 的抚顺市土壤侵蚀动态研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2008, 29(9): 1342 - 1345.
QI Xiaojun, WANG Ende, JIA Sanshi. Dynamic study on soil erosion in Fushun City based on GIS and RS[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2008, 29(9): 1342 - 1345. (in Chinese)

[5] 王文龙, 雷阿林, 李占斌, 等. 土壤侵蚀链内细沟浅沟切沟流动力机制研究[J]. 水科学进展, 2003, 14(4): 471 - 475.
WANG Wenlong, LEI Alin, LI Zhanbin, et al. Study on dynamic mechanism of rills, shallow furrows and gully in the soil erosion chain[J]. Advances in Water Science, 2003, 14(4): 471 - 475. (in Chinese)

[6] 徐锡蒙, 郑粉莉, 武敏. 雨强和坡度对黄土陡坡地浅沟形态特征影响的定量研究[J]. 农业工程学报, 2017, 33(11): 124 - 132.
XU Ximeng, ZHENG Fenli, WU Min. Quantification study of rainfall intensity and slope gradient impacts on ephemeral gully morphological characteristic on steep loessial hillslope[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(11): 124 - 132. (in Chinese)

[7] 龚家国, 周祖昊, 贾仰文, 等. 黄土区浅沟侵蚀沟槽发育及其水流水力学基本特性模拟实验研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(5): 92 - 96.
GONG Jiaguo, ZHOU Zuhao, JIA Yangwen, et al. Simulation experiment of ephemeral gully erosion on basis hydraulics parameters of concentrated flow and erosion morphology in loess area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(5): 92 - 96. (in Chinese)

[8] 康宏亮, 王文龙, 薛智德, 等. 冲刷条件下黄土丘陵区浅沟侵蚀形态及产流产沙特征[J]. 农业工程学报, 2016, 32(20): 161 - 170.
KANG Hongliang, WANG Wenlong, XUE Zhide, et al. Erosion morphology and runoff generation and sediment yield on ephemeral gully in loess hilly region in field scouring experiment[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(20): 161 - 170. (in Chinese)

[9] 仲原, 王春梅, 庞国伟, 等. 黄土高原浅沟空间分异特征[J]. 生态学报, 2022, 42(5): 1798 - 1810.
ZHONG Yuan, WANG Chunmei, PANG Guowei, et al. Spatial variation of ephemeral gully in the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(5): 1798 - 1810. (in Chinese)

[10] CHEN Yixian, JIAO Juying, WEI Yanhong, et al. Accuracy assessment of the planar morphology of valley bank gullies extracted with high resolution remote sensing imagery on the Loess Plateau, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(3): 369.

[11] 晏实江, 汤国安, 李发源, 等. 利用 DEM 边缘检测进行黄土地貌沟沿线自动提取[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36(3): 363 - 367.
YAN Shijiang, TANG Guoan, LI Fayuan, et al. An edge detection based method for extraction of loess shoulder-line from grid DEM[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011, 36(3): 363 - 367. (in Chinese)

[12] 周毅, 汤国安, 王春, 等. 基于高分辨率 DEM 的黄土地貌正负地形自动分割技术研究[J]. 地理科学, 2010, 30(2): 261 - 266.
ZHOU Yi, TANG Guoan, WANG Chun, et al. Automatic segmentation of loess positive and negative terrains based on high resolution grid DEMs[J]. Scientia Geographica Sinica, 2010, 30(2): 261 - 266. (in Chinese)

[13] KARANI A, KHOORANI A, NOOHEGAR A, et al. Gully erosion mapping using object-based and pixel-based image classification methods[J]. Environmental & Engineering Geoscience, 2015, 21(2): 101 - 110.

[14] LIU Kai, DING Hu, TANG Guoan, et al. Large-scale mapping of gully-affected areas: an approach integrating google earth images and terrain skeleton information[J]. Geomorphology, 2018, 314: 13 - 26.

[15] 常虹, 詹福雷, 杨国东, 等. 面向对象的高分遥感影像信息提取技术研究[J]. 测绘通报, 2015(1): 99 - 101, 130.
CHANG Hong, ZHAN Fulei, YANG Guodong, et al. Information extraction technology research based on objects oriented high resolution remote sensing image[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2015(1): 99 - 101, 130. (in Chinese)

[16] HINTON G E, SALAKHUTDINOY R R. Reducing the dimensionality of data with neural networks[J]. Science, 2006, 313(5786): 504 - 507.

[17] 于佩鑫, 周询, 刘素红, 等. 东北黑土区侵蚀沟遥感影像特征提取与识别[J]. 遥感学报, 2018, 22(4): 611 - 620.
YU Peixin, ZHOU Xun, LIU Suhong, et al. Feature extraction and recognition of erosion gully based on remote sensing image in the black soil region in Northeast China[J]. Journal of Remote Sensing, 2018, 22(4):611 - 620. (in Chinese)

[18] KRIZHEYSKY A, SUTSKEVER I, HINTON G E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks[J].

Communications of the ACM, 2012, 60(6): 84 – 90.
[19] RONNEBERGER O, FISCHER P, BROX T. U – Net: convolutional networks for biomedical image segmentation[C]// Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention-MIICAI 2015, 2015: 234 – 241.
[20] SCHUEGRAF P, BITTNER K. Automatic building footprint extraction from multi-resolution remote sensing images using a Hybrid FCN[J]. International Journal of Geo-Information, 2019, 8(4): 191.
[21] ZHANG Jun, MO Jian, XU Huajun, et al. A semantic segmentation method for exposed rebar on dam concrete based on Unet [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1651(1): 012169.
[22] HOU Yuewu, LIU Zhaoying, ZHANG Ting, et al. C – UNet: complement UNet for remote sensing road extraction[J]. Sensors, 2021, 21(6): 2153.
[23] BADRINARAYANAN V, KENDALL A, CIPOLLA R. SegNet: a deep convolutional encoder-decoder architecture for image segmentation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2017, 39(12): 2481 – 2495.
[24] 邓天民, 王琳, 杨其芝, 等. 基于改进 SegNet 算法的车道线检测方法[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(36): 14988 – 14993.
DENG Tianmin, WANG Lin, YANG Qizhi, et al. Lane line detection method based on improved SegNet network algorithm [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(36): 14988 – 14993. (in Chinese)
[25] 程换新, 蒋泽芹, 成凯. 基于改进 SegNet 模型的斑马线图像语义分割[J]. 电子测量技术, 2020, 43(23): 104 – 108.
CHENG Huanxin, JIANG Zeqin, CHENG Kai. Semantic segmentation of zebra crossing based on improved SegNet model[J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(23): 104 – 108. (in Chinese)
[26] 郭亚萍, 顾智聪, 彭宏京. SegNet 在工件表面缺陷检测中的应用[J]. 计算机工程与设计, 2019, 40(10): 2979 – 2984.
GUO Yaping, GU Zhicong, PENG Hongjing. Application of SegNet in surface defect detection of workpieces[J]. Computer Engineering and Design, 2019, 40(10): 2979 – 2984. (in Chinese)
[27] LI Wei, DI Kaichang, YUE Zongyu, et al. Automated detection of Martian gullies from HiRISE imagery[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2015, 81(12): 913 – 920.
[28] 姜永清, 王占礼, 胡光荣, 等. 瓦背状浅沟分布特征分析[J]. 水土保持研究, 1999, 6(2): 181 – 184.
JIANG Yongqing, WANG Zhanli, HU Guangrong, et al. Distribution features of shallow gully[J]. Research of Soil and Water Conservation, 1999, 6(2): 181 – 184. (in Chinese)
[29] 汪滨, 张志强. 黄土高原典型流域土壤侵蚀对退耕还林土地利用变化的响应[J]. 农业工程学报, 2023, 39(12): 60 – 70.
WANG Bin, ZHANG Zhiqiang. Response of soil erosion to land use change driven by Grain for Green Project in a typical watershed of the Loess Plateau[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(12): 60 – 70. (in Chinese)
[30] CHEN Chi, PARK T, WANG Xuhui, et al. China and India lead in greening of the world through land-use management[J]. Nature Sustainability, 2019, 2: 122 – 129.
[31] DOU Yanxing, YANG Yang, AN Shaoshan, et al. Effects of different vegetation restoration measures on soil aggregate stability and erodibility on the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2020, 185: 104294.
[32] 黑哲, 王飞, 韩剑桥, 等. 退耕还林(草)以来陕北白于山区植被覆盖与土壤侵蚀强度变化[J]. 水土保持研究, 2020, 27(4): 39 – 46.
HEI Zhe, WANG Fei, HAN Jianqiao, et al. Change in vegetation cover and soil erosion in Baiyushan hilly area since the Grain for Green Project[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(4): 39 – 46. (in Chinese)
[33] 田云, 刘俊艳, 白爽, 等. 近 20 年黄河流域甘肃段植被覆盖度变化与驱动因素分析[J]. 农业机械学报, 2024, 55(7): 365 – 372, 404.
TIAN Yun, LIU Junyan, BAI Shuang, et al. Fractional vegetation cover change and driving factors in Gansu Section of Yellow River Basin[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(7): 365 – 372, 404. (in Chinese)
[34] LI Pengfei, CHEN Jiannan, ZHAO Guangju, et al. Determining the drivers and rates of soil erosion on the Loess Plateau since 1901[J]. Science of the Total Environment, 2022, 823: 153674.
[35] 郑明国, 梁晨, 廖义善, 等. 极端降雨情形下黄土区水土保持治理的减沙效益估算[J]. 农业工程学报, 2021, 37(5): 147 – 156.
ZHENG Mingguo, LIANG Chen, LIAO Yishan, et al. Estimation of sediment reduction benefit by soil and water conservation under extreme rainfall in a loess watershed[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(5): 147 – 156. (in Chinese)
[36] 刘展, 李文华, 刘斌, 等. 黄土高塬沟壑区小流域暴雨侵蚀特征分析[J]. 中国水土保持, 2023(11): 16 – 18, 59.
[37] 贺春雄. 延安治沟造地工程的现状、特点及作用[J]. 地球环境学报, 2015, 6(4): 255 – 260.
HE Chunxiong. The situation, characteristics and effect of the Gully Reclamation Project in Yan'an[J]. Journal of Earth Environment, 2015, 6(4): 255 – 260. (in Chinese)
[38] 陈怡平, 骆世明, 李凤民, 等. 对延安黄土沟壑区农业可持续发展的建议[J]. 地球环境学报, 2015, 6(5): 265 – 269.
CHEN Yiping, LUO Shiming, LI Fengmin, et al. Proposals on the sustainable development of agriculture in Yan'an gully regions[J]. Journal of Earth Environment, 2015, 6(5): 265 – 269. (in Chinese)
[39] JIN Zhao, GUO Li, WANG Yunqiang, et al. Valley reshaping and damming induce water table rise and soil salinization on the Chinese Loess Plateau[J]. Geoderma, 2019, 339: 115 – 125.
[40] CHENG Hong, ZOU Xueyong, WU Yongqiu, et al. Morphology parameters of ephemeral gully in characteristics hillslopes on the Loess Plateau of China[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 94: 4 – 14.