引文格式：尹莉莉,夏辉,王成. 饮用水源地农业面源风险源遥感监测与分析[J]. 地理空间信息, 2025, 23(12):68-71. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.12.015

饮用水源地农业面源风险源遥感监测与分析

——以丹江口水库为例

尹莉莉[1,2,3,4]，夏　辉[1,2,3,4]，王　成[1,2,3,4]

（1. 长江空间信息技术工程有限公司（武汉），湖北 武汉 430010；2. 长江勘测规划设计研究有限责任公司，湖北 武汉 430010；
3. 长江卫星遥感应用研究中心，湖北 武汉 430010；4. 流域水安全保障湖北省重点实验室，湖北 武汉 430010）

摘　要：以丹江口水库（河南辖区）饮用水水源保护区为研究区，针对农业面源污染对水质的威胁，构建了农业面源风险源遥感监测技术体系，监测指标为大棚种植、农业自然种植、经济林种植、畜禽养殖、水产养殖5类。利用深度学习模型结合人工解译修正，对风险源进行识别分析，绘制了风险源的空间分布图。结果显示，研究区农业面源风险源呈现斑块化分布特征，农业自然种植在各级保护区均为主导潜在污染源，且不同类型风险源在各级保护区分布各异。研究成果展现了研究区农业面源风险源现状，提升了风险源监测能力，为水源保护提供了科学依据与技术支撑。

关键词：丹江口水库；饮用水源地；遥感监测；农业面源风险源；深度学习

中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）12-0068-04

Remote Sensing Monitoring and Analysis of Agricultural Non-point Source Risk Sources in the Drinking Water Source Areas

YIN Lili[1,2,3,4], XIA Hui[1,2,3,4], WANG Cheng[1,2,3,4]

(1. Changjiang Spatial Information Technology Engineering Co., Ltd., (Wuhan), Wuhan 430010, China;
2. Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430010, China;
3. Changjiang Satellite Remote Sensing Application Research Center, Wuhan 430010, China;
4. Hubei Key Laboratory of Basin Water Security, Wuhan 430010, China)

Abstract: Taking the Danjiangkou Reservoir (Henan Province) drinking water source protection area as the research region, in the face of the threat posed by agricultural non-point source pollution to water quality, we meticulously constructed a remote sensing monitoring technology system for agricultural non-point source risk sources. We refined the monitoring indicators into five distinct categories, such as greenhouse cultivation, natural agricultural cultivation, economic forest cultivation, livestock and poultry farming, and aquaculture. By integrating a deep learning model with manual interpretation and rectification, we effectively identified and analyzed the risk sources, and accurately plotted a high-resolution spatial distribution map of these risk sources. The results show that the agricultural non-point source risk sources in the research area display a patchy distribution pattern. Natural agricultural cultivation emerges as the dominant potential pollution source across all levels of protection areas, with different types of risk sources demonstrating diverse distribution patterns in each level of protection area. The research findings not only vividly portray the current status of agricultural non-point source risk sources in the study area, but also significantly enhance the monitoring capabilities of risk sources, thereby providing a solid scientific basis and robust technical support for water source protection.

Key words: Danjiangkou Reservoir, drinking water source, remote sensing monitoring, agricultural non-point source risk source, deep learning

随着农业活动的日益频繁，农业面源污染已成为威胁水库水质的主要因素之一。传统的地面调查方法虽然能够提供详细的现场数据，但在大规模区域内的应用存在时间和人力成本较高的问题。随着遥感技术的发展，为水源地风险源监测提供了新的手段，尤其是高分辨率卫星遥感影像的应用[1]，极大地提升了监测的精度和效率[2]。

近年来，研究者们在水源地风险源的遥感监测与识别方面取得了一些进展[3-9]。相关研究在识别精度、可识别地物类型及处理效率方面取得了显著进步，但多集中于部分风险源监测，受分辨率或方法局限，难以实现精细的分类监测，针对大范围饮用水源地农业面源各类风险源指标的系统性监测仍较为匮乏。

本研究以丹江口水库（河南辖区）饮用水水源保

项目来源：长江勘测规划设计研究有限责任公司自主创新项目（CX2024Z32）。

第一作者简介：尹莉莉（1989—），硕士，高级工程师，研究方向为水利遥感监测及水利信息化等，E-mail：Y_lili1011@163.com。

护区为研究区，利用高分系列卫星遥感影像，构建精细化的农业面源风险源遥感监测体系，将监测指标细分为大棚种植、农业自然种植、经济林种植、畜禽养殖、水产养殖5类，填补了前人在饮用水源地（农业面源风险源）全面监测方面的空白，从保护区的角度全面展现农业面源风险源现状，为水源保护和风险治理提供科学依据。

1　研究区与数据源

1.1　研究区概况

丹江口水库作为中国南水北调中线工程的水源地[10]，横跨湖北省丹江口市和河南省南阳市淅川县，其水质安全直接影响着沿线数千万居民的生活用水和区域生态系统的健康[11]。然而，由于区域内存在复杂的工农业生产活动、潜在的地质灾害以及城市化进程给水源地保护带来了一系列隐患[12]。河南是中线工程的核心水源地和渠首所在地，承担着确保水源免受污染的艰巨任务，对风险源实施高效、精准的实时监控显得尤为关键。

丹江口水库（河南辖区）饮用水水源保护区主要位于河南省南阳市淅川县，根据相关资料和政策规定，其保护区划分为一级保护区、二级保护区和准保护区，面积分别约为47.06、253.57、1 295.26 km^2。

1.2　数据及预处理

本研究采用的遥感影像数据源为高分系列卫星数据。高分系列卫星是中国自主研制的一系列高分辨率遥感卫星，具有高空间分辨率、高时间分辨率、多光谱波段以及大范围覆盖的能力，较适合丹江口水库这种大型水域范围的遥感监测。

本研究数据来自中国资源卫星应用中心，获取的遥感影像云量不超过5%且未对区域内的重要风险源目标形成覆盖遮掩，数据源信息如表1所示。

表1　原始卫星影像信息

序号	数据源	分辨率/m	云量/%	影像时间	景数/景
1	GF1C	2	<5	2023年3月–2023年5月	2
2	GF6				2

原始遥感影像通常存在几何畸变与信息误差等问题，因此需要进行一系列预处理以确保数据的质量和适用性[13]。本研究针对研究区遥感影像，首先采用了区域内公开的SRTM DEM数据作为控制基础，利用“云控制”智能影像处理系统完成了影像的几何校正，其精度控制在1~2个像元范围内，确保了空间位置的准确性。同时采用沃韦影像智能处理软件对研究区影像进行了融合、色彩调整等进一步预处理工作，消除了辐射误差，获得了适用于开展风险源遥感解译的高质量正射影像。

2　研究方法

2.1　技术路线

针对丹江口水库（河南辖区）饮用水水源保护区农业面源风险源监测需求，本研究构建了一套农业面源风险源遥感监测技术体系。具体如图1所示。

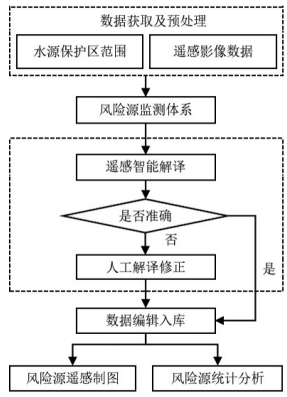


图1　技术路线

2.2　监测指标体系

水源地风险源是指能向饮用水水源地释放有毒有害物质，造成水质恶化的污染源[14]，根据饮用水水源保护区农业面源监测的要求，结合高分卫星数据的特征，构建了详细的农业面源风险源分类体系，包含大棚种植、农业自然种植、经济林种植、畜禽养殖、水产养殖5个类型。同时，建立了基于高分影像的农业面源风险源的遥感解译标志，辅助训练样本的选取。具体如表2所示。

2.3　风险源提取方法

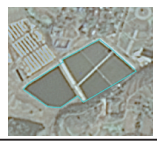
水源保护区内地表覆盖类型多样，地物光谱特征复杂，传统的遥感人工解译方法虽然准确但效率较低，难以满足大范围饮用水水源地风险源快速识别的需求。为此，本研究结合了遥感人工解译和智能解译技术的优势[15]，实现水源地农业面源风险源的高效、精准识别。

本研究选用广受认可的U–Net深度学习模型作为风险源（以水产养殖为例）提取的智能模型[16]。模型结构遵循典型的编码–解码架构，具体如图2所示。

图像尺寸统一为256像素×256像素，编码器通过3×3卷积（ReLU激活）提取特征，搭配2×2最大池化下采样；解码器以2×2上采样还原特征维度，再经3×3卷积（ReLU激活）处理，最终通过1×1卷积输出分类结果。

针对研究区农业面源风险源，采集并制作样本

表2 农业面源风险源监测指标及解译标志

序号	分类	影像示例	空间特征	影像特征描述
1	大棚种植			影像几何特征明显，地类边界线规则，地块整齐有均匀条带状，颜色呈黑色或者白色，纹理清晰。
2	农业自然种植			影像几何特征明显，地类边界线不规则，地块不整齐，颜色呈浅绿色，纹理清晰，质地细光滑。
3	经济林种植			影像几何特征明显，地类边界线清晰，颜色呈绿色，质地较粗糙，朵簇状且多呈条形排列，色调均匀。
4	畜禽养殖			影像几何特征明显，地类边界线清晰，有整齐规则建筑群，色调均匀。
5	水产养殖			影像几何特征明显，地类边界规则，颜色呈浅绿色，色调均匀一致。

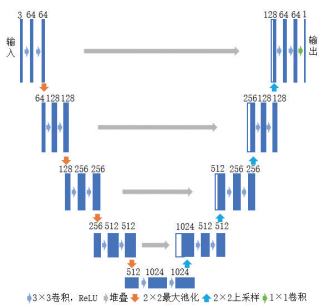


图2 U-Net网络结构

集，包含训练样本、验证样本以及测试样本，确保样本覆盖地物特征，支撑模型训练与验证。利用训练样本训练U-Net模型，以交叉熵损失函数优化参数，迭代50轮，学习率设为0.001。

经过U-Net模型初步解译后，结果存在碎小图斑和空洞[17]。为提升解译结果的精度，本研究采用小图斑剔除和空洞填充的形态学后处理方式进行优化[18]，并对边界模糊、分类不明确的区域（如养殖与非养殖图斑边界）进行人工修正。此外，考虑到后续数据建库和制图等应用需求，进一步对优化后的解译结果添加坐标信息，并进行栅格向矢量的转换，最终获得满足实际应用的准确解译结果。

3 结果与分析

3.1 风险源识别结果及精度验证

针对研究区内农业面源风险源，构建样本数据集。以水产养殖类型为例，共采集制作样本1 200个，样本分布覆盖研究区水库周边，丹江、老灌河等主要支流。样本的大小均设定为256像素×256像素，确保有足够的分辨率来捕捉地物特征。通过分层随机抽样，将样本按7∶2∶1的比例划分为：训练样本840个、验证样本240个以及测试样本120个。

基于上述样本对U-Net卷积神经网络模型进行训练与验证，水产养殖的提取准确率达到了约90%，召回率约为80%，显示了模型在风险源识别方面的有效性。

经形态学后处理与人工修正，对整体解译结果开展精度验证：选取100个验证样本（覆盖3个保护区、5种不同风险源类别，样本分布随机且均匀），通过比对遥感影像、真实地物情况与解译结果，整体解译结果的精度达到了95%以上，实现研究区农业面源风险源的精准识别。

3.2 风险源识别结果

基于前文所述的数据和研究方法框架，对丹江口水库（河南辖区）饮用水水源保护区内的农业面源风险源开展识别与解译，精准提取风险源空间位置分布、类型、面积等信息，掌握研究区风险分布格局，具体监测结果如图3所示。

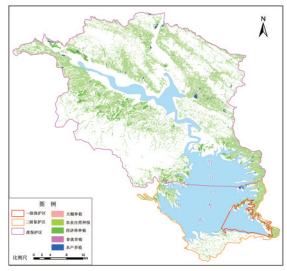


图3 农业面源风险源遥感监测专题图

审图号：豫S(2019)029号

3.3 研究区结果讨论

1）风险源空间分布特征。从不同保护区层级看，一级保护区面积约47.06 km^2，农业面源风险源整体占比12.69%，虽占比不高，但因紧邻核心水域，农业自然种植产生的面源污染易直接进入水体，需重点管控种植过程的化肥、农药使用；二级保护区面积约253.57 km^2，农业面源风险源占比16.86%，随保护范围扩大，农业活动类型增加，但畜禽养殖仍受限制，反映出过渡缓冲区需平衡农业发展与水源保护，重点防控新增风险源的扩散。准保护区面积约1 295.26 km^2，农业面源风险源占比25.87%，各类风险源规模大、分布广，农业活动多样性对水源构成长期潜在威胁，是污染防控的重要关注区域。

从各类风险源分布形态看，农业自然种植在一级保护区呈碎小块状，多分布于水域边缘等局部区域，

受限于核心区严格管控，难以形成大规模连片种植；二级保护区内，沿周边山坡、平地分布范围扩大，形成较大斑块；准保护区靠近水库平坦地带，广泛连续分布，形成大面积连续斑块（图4可直观呈现），这种分布特征与保护区管控强度梯度变化紧密相关，管控越严格，风险源斑块越破碎、规模越小。经济林种植在二级保护区、准保护区集中于山坡呈相对集中斑块。水产养殖在一级保护区为孤立小斑块，二级保护区沿水库边缘呈带状分布，准保护区呈较大斑块。大棚种植集中在准保护区，一级保护区未出现，二级保护区少量斑块。畜禽养殖仅在准保护区有少量孤立斑块。

整体上，研究区内农业面源风险源呈现空间差异显著、斑块化分布突出的特征，这与土地利用、地形条件及农业生产需求等因素密切相关。

2）研究区结果对水源地保护的意义。基于风险源空间分布特征，可构建“分层防控、精准施策”的水源地保护体系。一级保护区以“污染阻断”为目标，从源头切断污染直连水源的路径。二级保护区以“污染削减”为重点，平衡农业发展与水源保护。准保护区侧重“污染拦截”，作为水源地外围防护层，可建立农业面源污染监测网络，动态掌握风险，降低入库污染风险

3）方法应用效果与优化方向。U-Net模型结合形态学处理与人工修正，有效提升解译精度。但在农业自然种植与经济林种植交错区因光谱特征重叠存在误分，后续可通过引入高分辨率影像（如0.5 m分辨率无人机影像）或多源数据优化模型，增强复杂地物识别能力，进一步提升风险源提取精度。

4　结　语

本研究以丹江口水库（河南辖区）饮用水水源保护区为对象，通过运用高分系列卫星遥感影像与先进的U-Net卷积神经网络模型，并结合人工解译修正，构建了包含5类农业面源风险源的高分遥感监测体系，实现了丹江口水库保护区风险源的亚米级空间定位，为水源地分区管控提供了精准底图。

相较于既往研究，本研究监测指标的细化使其能更准确全面的反映风险源的现状，但复杂地形和光谱复杂区域解译精度问题仍存挑战，后续研究应聚焦多源数据融合。

参考文献

[1]　厉芳婷,胡菡,刘韬,等.基于深度学习的遥感影像地表水时空监测与分析[J]. 地理空间信息,2023,21(9):52-56

[2]　张英红,赵光磊,曲红拥,等. 基于遥感影像的湖库型饮用水源地污染源检测方法研究[J]. 环境科学与管理,2023,48(3):119-123

[3]　苏轶君,李利伟,刘吉平,等. GF-5卫星监测饮用水源地风险源潜力研究[J]. 人民黄河,2017,39(4):71-77

[4]　姚延娟,王雪蕾,吴传庆,等. 饮用水源地非点源风险遥感提取及定量评估[J]. 环境科学研究,2013,26(12):1 349-1 355

[5]　许芬,周小成,孟庆岩,等. 基于“源-汇”景观的饮用水源地非点源污染风险遥感识别与评价[J]. 生态学报,2020,40(8):2 609-2 620

[6]　Vakalopoulou M，Karantzalos K，Komodakis N，et al. Building Detection in very High Resolution Multispectral Data with Deep Learning Features[C]//IEEE lnternational Geoscience and Remote Sensing Symposium,2015:1 873-1 876

[7]　闫智. 迁移学习在水源地风险源遥感监测中的应用研究[D]. 焦作:河南理工大学,2019

[8]　曹琪,郑雅兰,沈谦,等. 基于高分辨率遥感的水源地风险源提取技术研究[J]. 测绘地理信息,2022,47(6):81-85

[9]　刘岳明,杨晓梅,王志华,等. 基于深度学习RCF模型的三都澳筏式养殖区提取研究[J]. 海洋学报,2019,41(4):119-130

[10]　刘金宝,刘轩,孙增慧,等. 丹江口水库土地利用与水质变化响应关系研究[J]. 遥感技术与应用,2023,38(2):285-296

[11]　王超,贾海燕,雷俊山,等. 丹江口库区典型小流域面源污染生态阻控系统效果评估[J]. 水土保持学报,2021,35(3):61-68

[12]　林莉,李全宏,曹慧群,等. 数字孪生丹江口水质安全建设挑战与举措[J]. 中国水利,2023,73(11):32-36

[13]　孙玉超,董迪,温玉波,等. 基于多源遥感数据的淇澳岛红树林范围提取研究[J]. 海洋技术学报,2022,41(5):5-12

[14]　生态环境部环境标准研究所. 集中式地表水饮用水水源地风险源遥感调查技术规范:HJ1236-20215[S].北京:生态环境部,2022

[15]　戴诗涛,张晶. 基于注意力机制与可变形卷积的遥感图像变化检测方法[J]. 地理空间信息,2024 ,22(10):22-25

[16]　Ronneberger O, Fischer P, Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmenta-tion [C]// MICCAI Society, Miccai 2015. Cham:Springer International Publishing,2015

[17]　陶从辉,高青山,赵梦琳. 改进U-Net网络的高分辨率遥感影像建筑物提取方法[J]. 地理空间信息,2025,23(1):9-12

[18]　周翔,罗爽,王成. 基于遥感智能解译技术的围堰溃决洪水没分析以旭龙水电站为例[J]. 水利水电快报,2024,45(5):111-116