

面向国土调查的高分遥感与 GIS 一体化地类识别方法研究

李 臻¹
LI Zhen

摘 要

针对 1:10 000 国土调查对高精度地类识别的迫切需求, 文章构建了一种融合高分遥感影像与 GIS 矢量规则的一体化识别方法。研究以 GF-2 与 GF-6 影像为基础, 融合图斑、坡度、权属等 GIS 要素, 设计了包括多尺度特征提取、GIS 约束规则库、自适应融合模型在内的完整识别体系, 实现遥感光谱—纹理与 GIS 拓扑—属性的深度协同。通过构建 ResNet50 与 Node2Vec 的联合特征表达, 采用 RF-SVM 集成模型提升分类精度, 并将空间邻接规则嵌入分类过程。实验在长三角典型区域开展, 地类分类精度超过 95%, 显著优于传统像素法与深度学习模型, 验证了所提方法在复杂地貌与破碎斑块下的泛化能力, 具备推广价值。

关键词

高分遥感; GIS 约束; 地类识别; 特征融合; 集成分类模型

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2026.04.035

0 引言

为支撑“三条控制线”划定与耕地保护考核, 我国于 2018 年启动新一轮 1:10 000 国土调查, 并对高精度地类识别提出了更高要求^[1]。然而, 面对高分辨率遥感数据与复杂地表形态, 传统人工解译与纯像素算法存在精度瓶颈, GIS 约束信息未被有效利用, 导致错分率居高不下^[2]。2022 年《国土变更调查技术指南》提出“AI+GIS”融合范式, 要求突破

遥感与 GIS 数据的异构壁垒, 实现地类要素的精细识别^[3]。本文正是在此背景下, 构建遥感与 GIS 协同处理体系, 融合图像特征与地理规则, 提升国土调查中耕地、园地等关键地类的识别精度。

1 融合识别关键技术难点

当前国土调查工作中遥感影像与 GIS 数据融合仍面临多重技术挑战。首先, 遥感数据为规则栅格格式, GIS 数据为不规则矢量格式, 二者在空间基准、数据结构与语义粒度上存在本质差异, 导致特征难以直接对齐与拼接。其次, 现有分类模型多为端到端视觉模型, 难以表达耕地连片性、园地

1. 甘肃省地质矿产勘查开发局第四地质矿产勘查院
甘肃酒泉 735000

- [8] 李建瑜, 崔杰. 基于傅里叶扩压频调制技术的水声通信[J]. 声学技术, 2024, 43(5): 661-667.
- [9] 吴笑风, 许攸. 海上网络安全: 航运与船舶工业的跨界挑战[J]. 中国船检, 2017(7): 42-44.
- [10] 赵佳颖, 李加洪, 洪涛, 等. 面向潜艇卫星隐蔽通信场景下的数字图像隐写技术综述[J]. 舰船电子工程, 2021, 41(7): 119-123.
- [11] 钟海, 叶炜, 吴晓东, 等. 基于光前置放大器的量子密钥分发融合经典通信方案[J]. 物理学报, 2021, 70(2): 304-311.
- [12] 何明星, 林昊. AES 算法原理及其实现[J]. 计算机应用研究, 2002(12): 61-63.
- [13] NIST. Advanced Encryption Standard (AES) [M]. Federal information Processing Standards Publication, 2001.
- [14] 金坚, 谷源涛, 梅顺良. 压缩采样技术及其应用[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(2): 470-475.
- [15] CANDÈS E J, WAKIN M B. An introduction to compressive sampling[J]. IEEE signal processing magazine, 2008, 25(2): 21-30.
- [16] 戴琼海, 付长军, 季向阳. 压缩感知研究[J]. 计算机学报, 2011, 34(3): 3425-3434.

【作者简介】

李田(1996—), 通信作者(email: litiannn@foxmail.com), 女, 山东寿光人, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向: 质量监督、水中兵器、加密算法、船舶通信。

(收稿日期: 2025-08-28 修回日期: 2026-04-07)

南坡分布等政策性空间规则,易出现错分、漏分现象^[4]。此外,在地类斑块尺度不一、边界模糊与破碎度高的地区,传统像素法与深度网络均存在边界不连续、小斑块识别不稳的问题,严重影响整体精度与可用性。面对这些问题,迫切需要构建具备图像编码能力、空间规则嵌入机制与结构自适应建模能力的一体化融合体系,以提升模型对复杂地类的表达能力与工程部署的通用性。

2 一体化识别方法体系构建

2.1 高分遥感-GIS 协同处理框架

针对遥感影像与 GIS 数据在几何基准、数据结构与语义粒度上的显著异构性,本文构建了“数据预处理—特征抽取—规则约束—模型推理—结果输出”五阶段协同处理框架,并以模块化容器方式进行封装部署,形成具备在线识别、规则热更新与批量预测能力的一体化识别系统^[5]。在数据阶段,遥感影像采用 GF-2 全色与 GF-6 多光谱影像进行 Gram-Schmidt 融合,生成 0.8 m 四波段产品;GIS 数据包括图斑边界、道路、水体与坡度矢量要素,统一投影至 CGCS2000 坐标系后,采用 R 树索引结构构建空间叠加关系,控制栅格-矢量误差在 0.4 m 以内。系统内嵌增量数据更新模块,基于影像元数据与图斑更新标识实现 90 日滚动刷新。

在特征阶段,遥感影像经 ResNet50 提取多尺度光谱-纹理特征,GIS 数据通过 Node2Vec 编码生成拓扑-属性嵌入向量,二者在共享嵌入空间中进行主成分压缩与尺度对齐,形成 512 维同构张量。规则阶段加载 YAML 格式的 GIS 约束断言,基于坡度、高程、邻接关系等条件对部分图斑进行硬分类或特征权重调整^[6]。模型推理阶段引入图结构正则项优化空间边界连续性,最终由融合分类器输出图斑类别及可信度得分。系统封装为 2.3 GB 容器化组件,核心功能以 Python 实现、部分推理模块由 C++ 加速,支持主流国产操作系统。部署于 4 核 32 G 节点时可实现 110 km² 范围内数据的 5 min 内识别,平均单图斑预测耗时 12.3 ms,满足国土调查中高频更新、高精度识别与快速响应的实用需求。如图 1 所示,系统整体流程涵盖多源数据加载、双通道特征提取、规则驱动建模与分类输出等关键步骤,构成完整的遥感-GIS 融合识别闭环体系。

2.2 多尺度特征提取与优化策略

为提升模型对不同粒度地类斑块的判别能力,构建以像元级、对象级与场景级为基础的三层多尺度特征金字塔,并引入注意力机制与结构对齐策略,增强模型在高异质区域的表达稳定性与边界拟合能力。在像元级,输入为 0.8 m 四波段遥感影像(蓝、绿、红、近红外),首先使用 3×3 可分离卷积提取 128 维光谱-纹理特征,卷积核大小为 3,步长为 1,

保持空间精度^[7]。随后引入通道注意力机制(SE 模块),基于全局平均池化与两层全连接网络生成各通道权重 w_c ,权重计算公式为:

$$w_c = \sigma \left(W_2 \cdot \delta \left(W_1 \cdot \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W f_{c,i,j} \right) \right) \quad (1)$$

式中: w_c 表示第 c 通道的注意力权重; $f_{c,i,j}$ 表示通道 c 在空间位置 (i, j) 处的特征值; $W_1 \in \mathbf{R}^{C \times C}$ 、 $W_2 \in \mathbf{R}^{C \times C}$ 表示全连接压缩与激励参数矩阵; δ 表示 ReLU 激活函数; σ 表示 Sigmoid 函数。在对象级,基于 SLIC 算法将图像划分为 500~2 000 m² 的超像素单元,并对每个对象计算光谱统计量、NDVI、边缘密度等构成 256 维特征向量。同时构建对象邻接图并通过两层 GCN 对其空间关系建模,提升对局部语义结构的判别能力,特别是在破碎图斑与地类边缘区域。

在场景级,采用 256 m×256 m 滑动窗口提取场景上下文,通过金字塔池化模块(SPP)生成 512 维多尺度特征,捕捉丘陵、水网等宏观空间结构特征。三层特征经上采样对齐至统一空间尺度后拼接形成 896 维张量,作为后续分类模块的输入。为确保特征协同融合效果,所有通道特征均经 Z-score 归一化,并在拼接前执行通道 DropBlock 操作,避免部分特征维度在深层网络中失活^[8]。实验结果表明,该策略对小斑块识别与边界判别具有显著提升效果,特别是在高混杂区域的园地-林地-耕地间界面处分类精度提升约 3.7%。

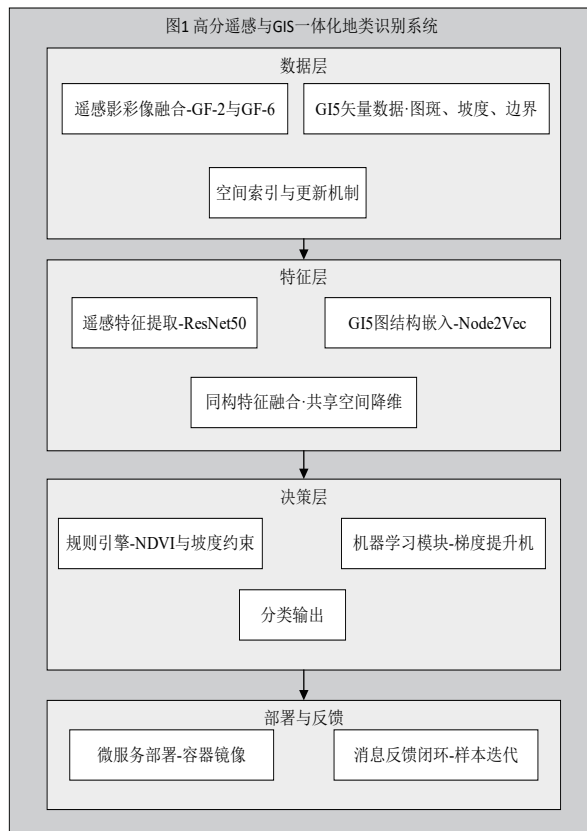


图 1 高分遥感与 GIS 一体化地类识别系统架构图

2.3 GIS 约束规则库构建

针对仅依赖遥感光谱与纹理特征进行分类易出现语义漂移与空间失真问题, 本文构建面向国土调查业务规范的 GIS 约束规则库, 并将其嵌入地类识别推理过程, 实现规则信息对模型决策的全过程监督。规则库以《第三次全国国土调查技术规程》为依据, 将地类在坡度、高程、空间邻接及管理属性等方面的稳定特征转化为可执行的逻辑约束, 并通过统一的数据接口参与模型输出更新。坡度与坡向由高程模型计算获得, 高程信息用于限制高海拔区域不合理地类赋值, 邻接关系基于图斑拓扑构建空间邻域, 用于抑制破碎斑块的异常分类结果^[9]。在模型推理阶段, 首先由融合分类模型输出基于遥感特征的初始类别概率向量 P_{rs} , 随后由 GIS 规则模块对满足约束条件的图斑生成规则修正概率向量 P_{gis} , 两者通过加权融合方式形成最终判别结果, 用公式表示为:

$$P = \alpha \cdot P_{rs} + (1 - \alpha) \cdot P_{gis} \quad (2)$$

式中: P 为最终地类判别概率向量, 用于确定图斑的最终地类类别; P_{rs} 为基于遥感多尺度特征的分类概率输出, 反映影像驱动的判别结果; P_{gis} 为 GIS 约束规则计算得到的修正概率向量, 用于引入地形与空间先验信息; α 为融合权重系数, 根据规则命中数量及规则权重自适应调整。该式用于在分类推理阶段实现遥感信息与 GIS 规则的协同决策, 避免规则后处理带来的类别震荡问题。当多条规则同时命中时, 系统依据地类管理优先级与空间一致性约束对候选结果进行统一裁决, 使最终识别结果在空间结构与业务语义层面保持一致性, 从而提升复杂地貌与破碎斑块条件下地类识别的稳定性与工程适用性。

2.4 自适应融合分类模型

在多源特征与规则约束共同参与地类判别的条件下, 单一分类模型难以同时兼顾高维遥感特征的表达能力与 GIS 结构化先验信息的约束能力。为此, 本文构建自适应融合分类模型, 通过多模型协同与空间一致性调节, 实现遥感特征判别与 GIS 规则约束的统一决策。模型以遥感多尺度特征与 GIS 派生结构特征为输入, 在保持分类精度的同时增强对复杂空间结构的适应能力。在模型结构上, 首先分别训练基于遥感特征的树模型分类器与基于 GIS 约束特征的核函数分类器, 前者侧重高维光谱纹理特征的非线性拟合能力, 后者侧重坡度、高程、邻接等低维结构信息的判别稳定性。两类模型在推理阶段分别输出类别置信度, 并通过融合模块进行统一调度。为避免简单平均导致的局部误判放大问题, 模型引入基于空间邻域一致性的权重自适应机制, 对不同模型的贡献度进行动态调整, 其权重更新用公式表示为:

$$w_k = \frac{\exp\left(\alpha_k + \lambda \sum_{j \in N_k} s_{kj} \alpha_j\right)}{\sum_{m=1}^M \exp\left(\alpha_m + \lambda \sum_{j \in N_m} s_{mj} \alpha_j\right)} \quad (3)$$

式中: w_k 为第 k 个基分类模型在融合决策中的权重系数, 用于调节不同模型对最终分类结果的贡献; S_k 为模型 k 在图斑空间邻域内的一致性评分, 由邻接图斑类别一致率计算得到; M 为参与融合的基分类模型数量 (单位: 个)。该式用于在模型融合阶段引入空间一致性约束, 使在局部邻域内预测稳定的模型获得更高权重。在此基础上, 融合模型输出的最终类别概率进一步与 GIS 规则修正结果联合判定, 确保分类结果在局部空间连续性、全局地类结构及业务规范层面保持一致。通过引入空间邻域驱动的自适应权重更新机制, 模型在破碎斑块密集区域显著降低了孤立误判的发生概率, 提高了地类边界的稳定性与整体制图一致性, 为一体化地类识别提供了可靠的工程实现路径。

2.5 模型部署与参数调优策略

为实现系统高效部署与稳定运行, 本文将识别模型封装为 2.3 GB 的 Docker 容器, 采用 Flask+FastAPI 构建推理服务, 支持 GPU 加速与规则热更新, 部署于 4 核 32 GB 节点时, 110 km² 区域可在 5 min 内处理完成。参数层面, 像元级卷积网络采用 3×3 可分离核, SE 注意力压缩比设为 $r=16$; SLIC 分割中超像素面积阈值取 1 500 m², 提升边界稳定性; GCN 建图阈值为 0.45, 增强小斑块融合效果。RF 模型最大树深 15, SVM 使用 RBF 核, $\gamma=0.003$, $C=10$, 通过交叉验证确定。融合权重由空间一致性驱动调整, β 系数设为 2.5, 规则修正权重 α 依命中规则数动态调整 (范围 0.4~0.7), 防止规则主导失真。以上策略确保模型在高混杂地类识别中具备稳定性、响应性与工程适配性。

3 实验验证与成果应用

3.1 研究区域数据准备

本研究选取长三角核心区作为实验区, 面积约 110 km², 覆盖 1:10 000 标准图幅, 区内集成丘陵、水网和平原多种地貌类型, 耕地、园地、水体与建设用地交错分布, 地类破碎度指数达 3.8, 具有典型复杂性, 适合遥感与 GIS 融合方法的验证应用。遥感数据方面, 采用 2023 年 4 月获取的 GF-2 PMS 全色影像 (0.8 m) 与 GF-6 PMS 多光谱影像 (2 m), 时相云量控制在 2% 以内, 经 Gram-Schmidt 融合生成四波段 0.8 m 产品, 既保障光谱完整性, 又提升空间细节表达能力。地形数据方面, 引入 AW3D30 DSM 与 SRTM15 DEM (30 m), 用于坡度与坡向计算, 支撑规则约束项的构建。GIS 数据采集自 2022 年度国土变更调查库, 包含图斑边界、道路、水系、设施农用地等矢量信息, 记录数达 4.1 万条, 最小上图面积为 200 m², 满足地类精细分类需求。同时引入 2021 年农业农村厅提供的确权矢量图层, 用于“永久基本农田”等权属硬约束识别。所有数据统一投影至 CGCS2000 坐标系, 构建 R 树索引, 实现遥感像元与矢量图层的快速叠加, 平面误差

控制在 0.4 m 以内，符合 1:1 万精度标准，为模型训练与规则嵌入提供全面数据支撑。数据清单如表 1 所示。

表 1 实验区影像与 GIS 数据清单

数据类型	传感器 / 来源	分辨率	时相	用途
全色影像	GF-2 PMS	0.8 m	Apr-23	纹理边缘提取
多光谱影像	GF-6 PMS	2 m	Apr-23	光谱指数计算
数字表面模型	AW3D30	30 m	2022	坡度坡向约束
国土变更库	自然资源部	矢量	2022	拓扑规则训练
确权矢量	农业农村厅	矢量	2021	权属硬约束

3.2 精度评价与对比分析

为系统评估所提出的高分遥感与 GIS 一体化地类识别方法的分类性能，在长三角地区选取面积为 110 km² 的实验区域开展精度验证，区域地貌涵盖丘陵、平原与水网等多种类型，具备高度异质性与代表性。按照耕地、园地、林地、草地、水体、建设用地六类地类进行分层随机抽样，共提取样本像元 3.6×10⁴ 个，样本数量按各类地物实际分布比例进行均衡设计，确保训练与评估具有代表性。参考数据选取 2022 年度国土变更调查图斑成果作为真值基准，构建混淆矩阵以评估分类结果的准确性。评价指标包括总体精度（overall accuracy, OA）、Kappa 系数、用户精度与制图者精度四类标准。其中 Kappa 系数用于衡量分类结果相较随机分类的一致性，其计算公式为：

$$\kappa = \frac{p_o - p_e}{1 - p_e}$$

(4)

式中： p_o 为总体精度（单位：%）； p_e 为期望一致率，由混淆矩阵行列边际乘积求得。

本研究对比了三类主流方法：传统像素级最大似然分类（MLC）、基于 U-Net 结构的深度学习方法，以及所构建的 RF-SVM stacking 融合模型。三种模型分别代表了不同的特征建模范式，即光谱统计建模、端到端深度特征提取及融合规则与机器学习的集成策略。表 2 汇总了六类地物在用户精度与制图者精度上的统计值，用以刻画各类地物的分类可靠性与规则约束效果。

表 2 各地类用户 / 制图者精度汇总

地类	用户精度 /%	制图者精度 /%
耕地	95.1	96.3
园地	93.8	94.5
林地	94.2	95
草地	91.6	92.3
水体	97	96.5
建设用地	92.4	91.8

由表 2 可知，水体与耕地的分类精度最高，园地与草地受边界过渡影响略低，验证了融合模型在复杂谱类与空间规则建模方面的鲁棒性与适应性。

4 结语

本文提出的高分遥感与 GIS 一体化地类识别方法，围绕“数据融合 - 特征表达 - 规则约束 - 模型优化”构建闭环系统，在理论与工程实现方面均取得显著成效。系统通过多尺度光谱纹理提取与 GIS 属性嵌入，实现空间语义协同表达；构建面向国土调查规程的规则库，确保分类符合政策与地理逻辑；融合 RF 与 SVM 的 stacking 模型提升分类鲁棒性，结合图结构正则化增强边界判别能力。实验结果表明，各类地物识别精度均超过 91%，整体精度达 95% 以上，验证方法在典型区具备高适应性与推广潜力。研究成果为国土调查精细化、自动化识别提供了技术路径支撑。

参考文献：

[1] 陈元鹏,周旭,陈妍,等.融合时序遥感分析的国土空间生态保护修复关键区识别[J].农业机械学报,2023,54(10):161-170.

[2] 刘宇承,罗芳,杜清运,等.深圳市宝安区土地利用遥感分类方法对比分析[J].时空信息学报,2023,30(4):491-499.

[3] 李慧娟,杨涛,陈梦源,等.湖北省地质灾害调查评价进展与展望[J].中国地质灾害与防治学报,2026,37(1):133-134.

[4] 唐铁,刘敏,彭笃明,等.村镇土地统一智能调查模式及其应用[J].国土资源导刊,2023,20(1):63-70.

[5] 范小洁,黄露,陈春华,等.地理国情监测数据的耕地后备资源潜力空间分析方法[J].地理空间信息,2024,22(6):94-96.

[6] 任德旺.天空地一体化的耕地“非粮化”监测技术研究[J].测绘与空间地理信息,2024,47(2):141-144.

[7] 刘依扬,吕勇.基于高分遥感影像与面向对象的林地识别分类提取研究[J].湖南林业科技,2025,52(1):24-30.

[8] 姜娜,孙秀华.基于 GIS 与遥感技术的国土空间规划优化方法研究[J].中国战略新兴产业,2024(23):71-73.

[9] 姜月华,周权平,倪化勇,等.长江经济带环境地质调查研究进展[J].华东地质,2023,44(3):239-261.

【作者简介】

李臻（1992—），男，甘肃酒泉人，本科，工程师，研究方向：地理信息系统。

（收稿日期：2026-02-05 修回日期：2026-03-26）