

doi: 10.6046/zrzyyg.2021157

引用格式: 马晓宇, 张新, 刘吉磊, 等. 基于深度学习的中国边境地区城市发展与安防研究[J]. 自然资源遥感, 2022, 34(2): 231–241. (Ma X Y, Zhang X, Liu J L, et al. Research on urban development and security in border areas of China based on deep learning [J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(2): 231–241.)

基于深度学习的中国边境地区城市发展与安防研究

马晓宇¹, 张新^{2,3}, 刘吉磊⁴, 周楠^{2,3}, 刘克俭³, 魏春山⁵, 杨鹏⁵

(1. 河北工程大学地球科学与工程学院, 邯郸 056000; 2. 中国科学院空天信息创新研究院遥感科学国家重点研究室, 北京 100101; 3. 中国科学院大学, 北京 100101; 4. 中国人民公安大学公安遥感应用工程技术研究中心, 北京 100101; 5. 苏州喆鑫信息科技有限公司, 苏州 215000)

摘要: 为探究我国边境城市发展态势, 评估城市戍边能力, 基于 D-LinkNet34 深度学习算法对西藏自治区托林镇、狮泉河镇和普兰镇建筑物、道路进行自动化提取, 并结合景观指数及人口规模分析边境乡镇发展态势和戍边能力。分析表明: ①基于 D-LinkNet 深度学习网络的提取方法能够有效地对城市建设用地进一步分类, 平均总精度高于 80%, IOU 值在 70% 以上。②普兰镇和狮泉河镇斑块分布呈聚集趋势发展, 城市扩张趋势减弱, 托林镇斑块分布则呈分散趋势发展, 城市扩张趋势明显。③建筑面积同常住人口呈线性关系, 托林镇 2002—2018 年建筑面积增加约 68.75%, 常住人口增加约 39.00%; 狮泉河镇 2004—2020 年建筑面积增加约 70.75%, 常住人口增加约 68.44%; 普兰镇 2005—2018 年建筑面积增加约 68.36%, 常住人口增加约 25.04%。研究为定量评价边境城市扩张特征及戍边能力提供新方法, 同时为建设祖国边疆戍边能力提供参考。

关键词: 遥感; 边境乡镇; 城市发展; 景观指数; D-LinkNet

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2022)02-0231-11

0 引言

我国陆地边境线总长逾 2.28 万 km, 同印度、蒙古、巴基斯坦等 15 个国家接壤, 西藏与缅甸、印度、不丹、尼泊尔、克什米尔等 5 国相邻, 陆地边境县市多达 21 个^[1]。受边境效应、边境地区发展条件以及边境两端竞争性政治和经济策略的共同作用, 沿着国家边境线分布的地区出现大规模人口迁移现象, 导致陆地边境地区“空心化”问题的产生^[2-3]。这不再仅仅是人口外流和城市发展的问

题, 而是典型的边界安全问题。新时期以来, 中国边境的战略地位日益重要, 但边境安全问题日益突出, 提高边境城镇化水平是保障边境安全的重要途径^[4]。目前, 国内针对“京津冀协同发展”、“长三角一体化发展”、“粤港澳大湾区建设”等重大战略, 将城市扩张研究中心多放于内陆中心城市^[5-9], 对边境地区关注甚少^[10]。国外将关注点聚焦在经济、人口发展较快的城市^[11-15], 对发展迟缓、人烟

稀少的边境交界地带鲜有研究。边境地区因其地理位置和政治地位的特殊性, 精准获取邻边城市的发展情况对我国边境安防部署尤为重要。已有研究显示, 内陆中心城市有效区域占比大于无效区域, 研究大多采用的影像为 Landsat 系列数据^[16-20]、DMSP/OLS 夜光数据^[21-23]、MODIS 产品数据^[24-25]等中低空间分辨率数据, 可通过传统机器学习方法以及人机交互的方式对研究区建成区进行统计, 而对于边境地区, 无效区域占比远大于有效区域, 继续使用传统方案不但无法提升分析效率, 分析结果的精度也会受到影响。其次, 城市扩张一般被视为影响城市经济和生态的驱动力因子^[26-31], 少有将其与城市安全性联系起来, 分析城市的自保能力。针对上述研究不足, 要对城市发展及安防进行更准确的评估, 需要从土地分类方法、分类尺度以及跨领域结合 3 方面进行优化。

本次研究主要探究边境城市发展态势及安防问题, 主要包括 3 部分: ①利用 D-LinkNet 深度学习网络对研究区建筑物及道路进行提取; ②在 Fragstats 平台中通过 12 种景观指数完成对研究区

收稿日期: 2021-05-18; 修订日期: 2021-07-10

基金项目: 高分辨率对地观测系统重大专项(编号: GFZX0404130307)资助。

第一作者: 马晓宇(1994-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为遥感技术与应用。Email: 505474279@qq.com。

通信作者: 刘吉磊(1989-), 男, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为公安遥感技术与应用。Email: liujilei@ppsuc.edu.cn。

发展态势分析;③通过研究城市建筑面积的变化情况估算戍边人口,探究城市发展特点及其戍边能力。

1 研究区概况

本文研究区位于我国西藏阿里地区札达县托林镇、噶尔县狮泉河镇和普兰县普兰镇。西藏边境地区地广人稀,为聚焦研究问题,选取各镇政府所在地周边为研究区域。托林镇隶属于阿里地区札达县,为札达县人民政府驻地,是全县经济政治文化中心。狮泉河镇是阿里地区行政公署和噶尔县人民政府驻地镇,是西藏西部的交通枢纽、经济文化和边境贸易中心。普兰镇隶属普兰县,是普兰县党政机关驻地,是西藏西北部对外贸易的主要口岸之一。

2 数据与方法

2.1 数据信息及预处理

通过 Google Earth 平台,获取了札达县托林镇

部分区域(2002 年、2013 年、2015 年、2018 年)、噶尔县狮泉河镇部分区域(2004 年、2013 年、2016 年、2020 年)和普兰县普兰镇部分区域(2005 年、2011 年、2016 年、2018 年)4 期卫星遥感影像。

本文选择与研究区相邻的日土县和革吉县作为样本区制作建筑物和道路的样本集,其中建筑物样本 50 个,道路样本 52 个,按照 7:2:1 的比例划分训练集、测试集和验证集。为了提升模型的学习效果,对训练样本集影像及对应标签进行随机裁剪、翻转和镜像,将训练数据集扩充至原来的 16 倍。

2.2 研究方法

研究采用 D-LinkNet 网络模型实现对研究区内建筑物和道路自动化提取,并对提取的建筑物和道路进行计算和分析,分析结果用以评估城市发展和安保情况。评估城市发展和安保情况主要从乡镇建筑发展速率(development of township buildings rate, DTBR)、乡镇道路发展速率(development of township roads rate, DTRR)、景观格局指数和戍边能力 4 个方面出发。技术流程如图 1 所示。

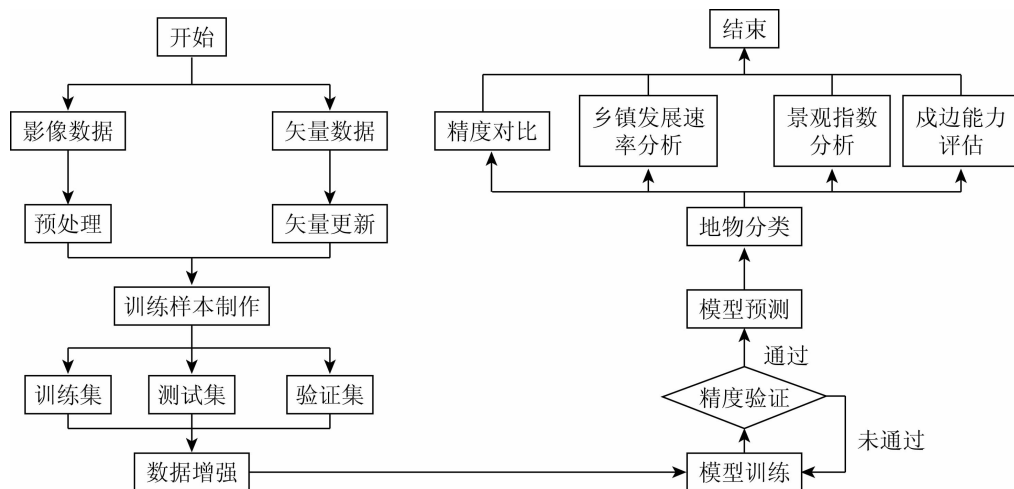


图 1 技术流程

Fig. 1 Technical flow chart

2.2.1 乡镇建筑发展速率

DTBR 表示乡镇在一段时间内建筑面积的变化情况。若 $DTBR > 0$, 则表示在该时间段内建筑面积在增加;反之,建筑面积在减少。公式为:

$$DTBR = (S_{TB2} - S_{TB1}) / d_{(1-2)}, \quad (1)$$

式中: S_{TB1} 和 S_{TB2} 分别为 $T1$ 和 $T2$ 时间乡镇建筑总面积; $d_{(1-2)}$ 为 $T1$ 时间与 $T2$ 时间的时间间隔。默认 $T2$ 时间在 $T1$ 时间之后,例如 $T2$ 为 2020 年, $T1$ 为 2010 年。

2.2.2 乡镇道路发展速率

DTRR 表示乡镇在一段时间内道路面积的变化情况。若 $DTRR > 0$, 则表示在该时间段内道路面积在增加;反之,道路面积在减少。公式为:

$$DTRR = (S_{TR2} - S_{TR1}) / d_{(1-2)}, \quad (2)$$

式中 S_{TR1} 和 S_{TR2} 分别为 $T1$ 和 $T2$ 时间乡镇道路总面积。

2.2.3 D-LinkNet 网络

D-LinkNet 网络继承了 LinkNet 网络编码-解码结构,并在其网络框架基础上引入膨胀卷积层作为中心部分来扩大感受野,网络结构如图 2 所示,图中 m 表示特征图长度; n 表示特征图宽度。

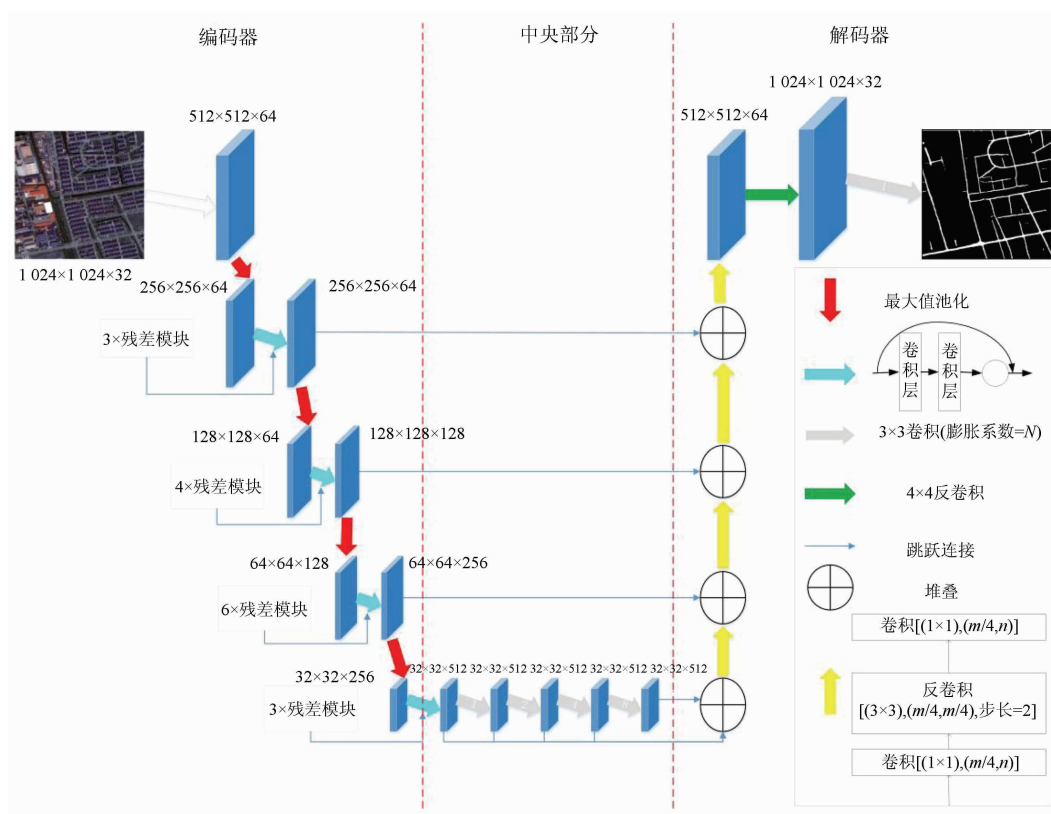


图2 D-LinkNet34 网络结构

Fig. 2 D-LinkNet34 network structure

针对高分辨率卫星影像地物识别, D-LinkNet 算法相比 UNet, LinkNet 和 PSPNet 等算法有明显优势。由于输入的数据源为高分辨率图像, 要求网络需要有较大的接受范围得以覆盖整个图像, 又考虑提取目标自身天然的连通性和复杂细长的特点, 前景背景占比悬殊, 在提取过程中需要保存详细的空间信息, 传统的方法是通过 pooling 层增大感受野后

通过上采样的方式恢复之前的分辨率, 但在恢复过程中难免会将一些特征信息损失掉, 而 D-LinkNet 自身在 LinkNet 的框架基础上, 在中心部分引入了膨胀卷积层^[32], 不需要通过 pooling 层以降低特征图分辨率为代价来扩大视野域, 这样由外界因素带来的分割难题迎刃而解。

训练提取流程如图3所示。建筑物和道路的提

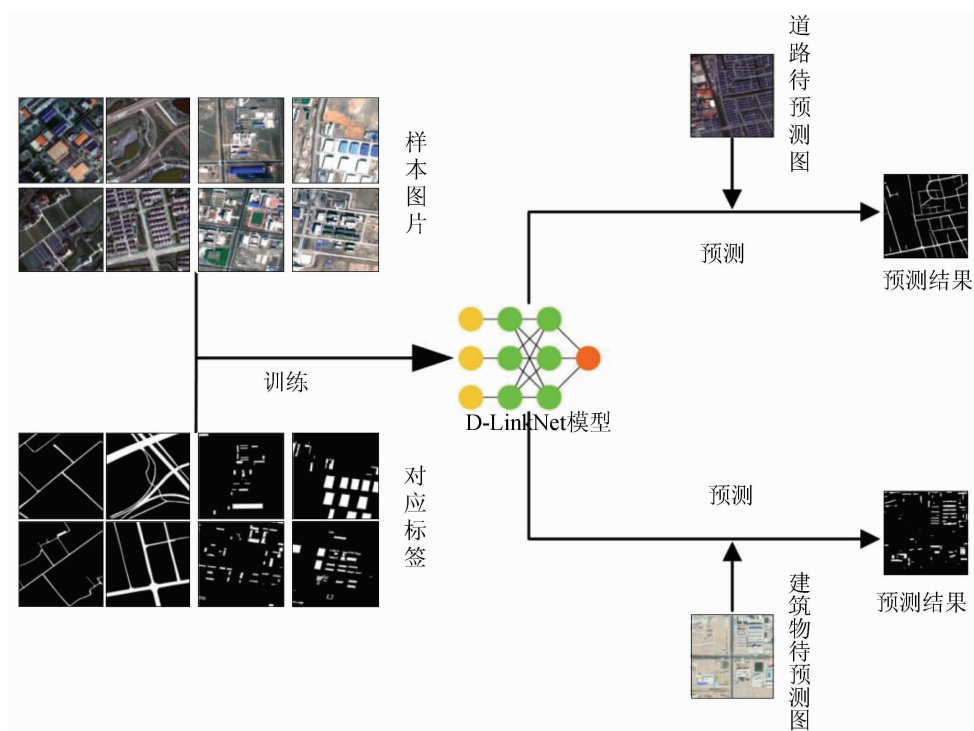


图3 训练提取流程

Fig. 3 Training extraction flowchart

取其实是像素级的二值语义分割任务。在高分辨率卫星图像中的道路细长且复杂,并且仅覆盖整幅图像的一小部分,保留详细的空间信息对提取完整道路格外重要。同时,道路自身跨度大,可能会贯穿整个样本,需要较大的视野域对道路的连通性以及跨度特征进行学习,D-LinkNet 模型中附加的膨胀卷积层可以较好地扩充视野域,解决道路提取问题。另外从 D-LinkNet 框架结构出发,其主干是在 Unet 的结构基础上进行优化得来,Unet 模型最初用于生物细胞图像分割,近年来与遥感结合实现了对影像地物的分类,且取得了不错的效果^[33]。本文基于 D-LinkNet 模型对研究区建筑物进行提取,经过多次实验验证,效果满足研究需求。

2.2.4 景观指数

景观指数,通过简单的定量指标浓缩景观格局信息^[34],反映地物类型空间配置和景观组成特征,通过分析景观指数变化来间接描述景观及组成景观各斑块的演变过程。本次研究分别从景观水平和斑块类型 2 个层面分析边境城市发展特征。通过分析城市房屋建筑物和道路的形状及分布特征,参考相关文献,从 4 个景观指标类中初步选取了 12 个景观指数。在斑块类型(Class)层面,选取了斑块类型面积(CA)、斑块所占景观面积比(PLAND)、边缘密度(ED)、斑块密度(PD)、聚合度(AI)和凝聚度(COHESION)。景观水平(Land)层面,选取了景观面积(TA)、蔓延度(CONTAG)、景观分裂指数(DIVISION)、分离度(SPLIT)、香浓多样性指标(SHDI)和香浓均匀指标(SHEI)。具体的景观指数类型划分见表 1。

表 1 城市景观指数类型

Tab.1 Classification of urban landscape index types

城市景观格局指数类型	城市景观格局指数
面积、密度指数类	CA, PLAND, TA, PD
边缘指数类	ED
多样性指数类	SHDI, SHEI
聚散性指标类	AI, COHESION, CONTAG, DIVISION, SPLIT

2.2.5 戍边能力

人是戍边行为主体,也是整个戍边活动最能动、起到决定性的因素。人的多少,直接反映当地戍边能力的强弱,本文通过 D-LinkNet 深度学习网络提取 3 个镇的建筑物,并计算建筑总面积,依据计算公

式(3)对边境乡镇人口总数进行预估,透露出边境安防现状,为祖国边防事业献计献策^[35],即

$$G = T_s / S, \quad (3)$$

式中: G 为区域戍边能力; T_s 为研究区建筑总面积; S 为全国人均居住面积,数据来源于国家统计局历年统计年鉴。

3 结果与分析

3.1 精度评定

对比本文用到的深度学习方法在地物提取方面的准确性和有效性,同时选用传统的支持向量机(support vector machine, SVM)分类方法对研究区进行同步分类。3 个乡镇 4 期影像 SVM 分类结果总体精度在 70% ~ 90%, D-LinkNet 网络分类精度在 80% ~ 90%。如图 4 所示,狮泉河镇 2020 年 SVM 分类总体精度 85.18%, Kappa 系数为 0.868,但研究区内大量硬化路面被误划分为建筑物,建筑面积被严重高估,无法用建筑面积变化推测居住人口变化情况。而基于 D-LinkNet 网络分类结果显示,提取的建筑物以独立单元呈现,减少了硬化路面对建筑面积的影响,精度和交集占并集的比重(intersection over union, IOU)分别为 85.2% 和 79.3%。托林镇和普兰镇 2018 年分类结果对比如图 5 所示。3 个镇部分年份分类精度评价如表 2 所示。验证结果说明,利用 D-LinkNet 深度学习网络可实现城市建设用地长时间序列、精细化分类。

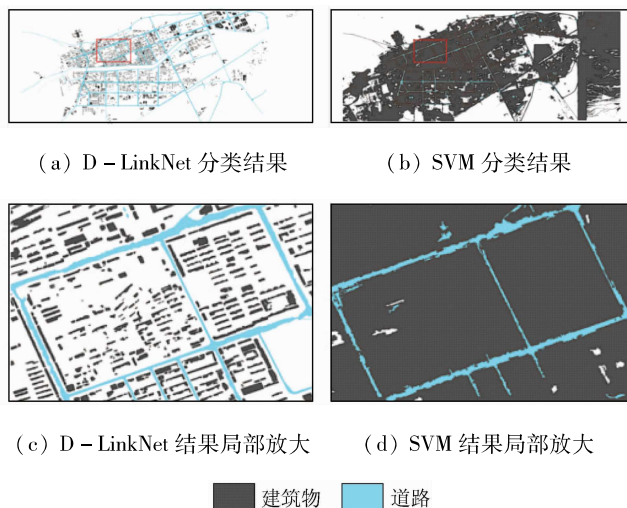


图 4 狮泉河镇 2020 年分类结果对比
Fig.4 Comparison of classification results of Shiquanhe Town in 2020

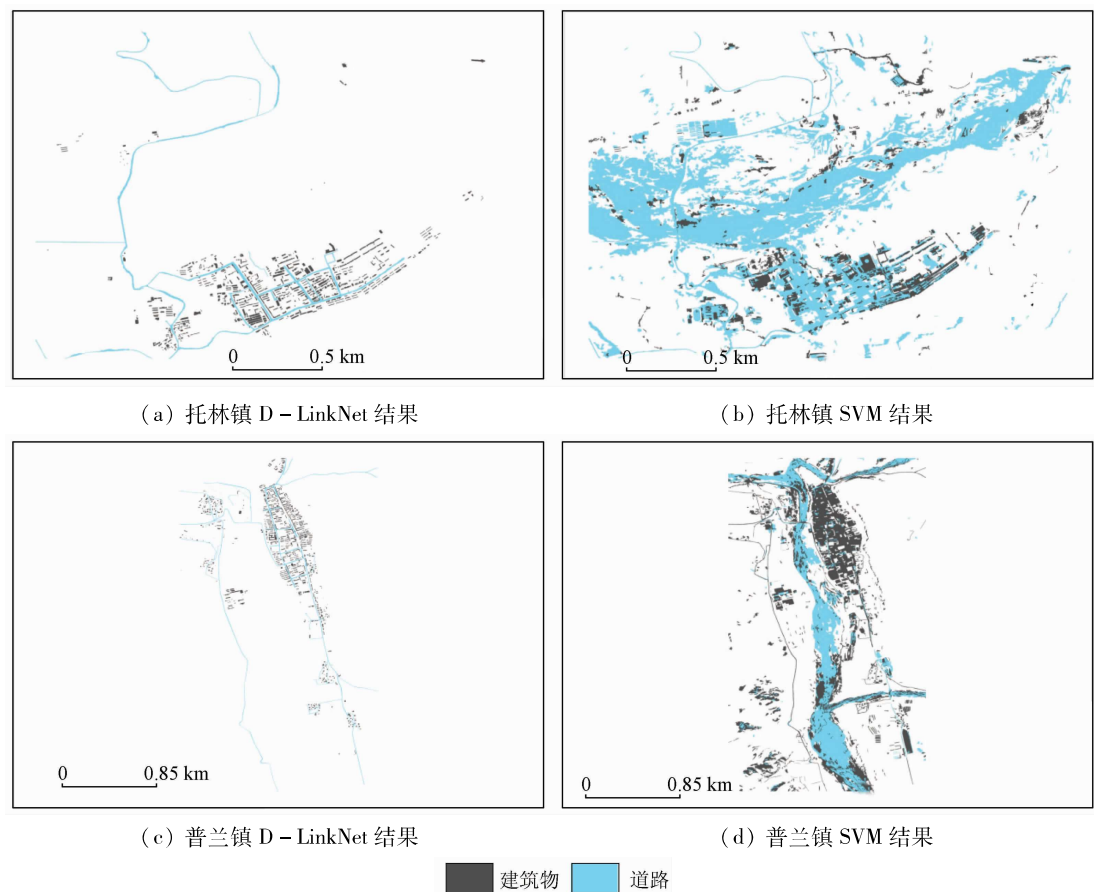


图 5 托林镇和普兰镇 2018 年分类结果对比

Fig. 5 Comparison of classification results of Tuolin Town and Pulan Town in 2018

表 2 分类精度评价

年份及 乡镇	D-LinkNet(建筑物)		D-LinkNet(道路)		SVM	
	分类 精度	<i>IOU</i>	分类 精度	<i>IOU</i>	总体精 度/%	<i>Kappa</i>
2018 年 托林镇	82.8	72.1	81.8	74.3	84.99	0.756
2020 年 狮泉河镇	85.2	79.3	85.5	79.3	85.18	0.868
2018 年 普兰镇	80.9	75.4	81.2	76.4	80.89	0.698

3.2 斑块类型指数分析

3 个乡镇不同时期斑块类型指数如图 6 所示。

①CA。由于狮泉河镇 CA 值与其他 2 镇相差较大、数值对应右侧坐标轴。从图 6(a)和图 7 中可以看出,2002—2018 年托林镇建筑物 CA 总体呈现上升趋势,具体表现为 2013—2015 年建筑物 CA 增长速率最快,DTBR 值为 143.12 hm²/a,2002—2013 年期间的 CA 增长速率较慢,DTBR 值仅为 43.93 hm²/a。对比道路 CA 变化情况,如图 7(b),2013—2015 年

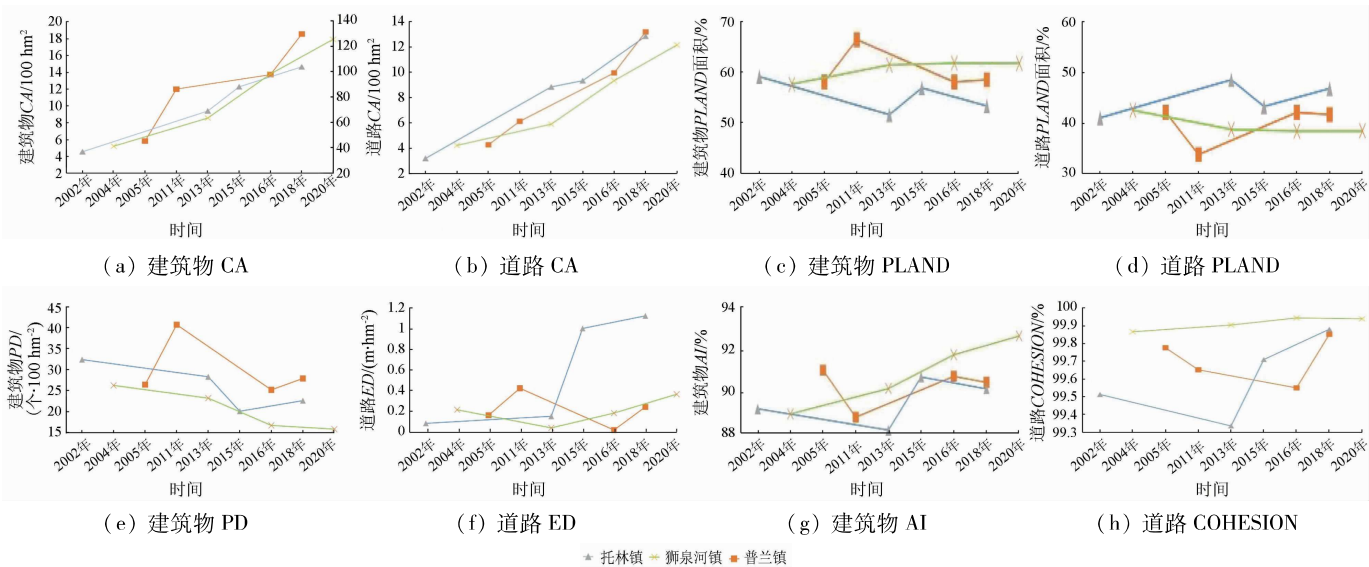


图 6 3 个乡镇不同时期斑块类型指数变化

Fig. 6 Changes of patch type index in different periods in 3 townships

道路 CA 增长速率最慢, DTRR 值仅为 $24.54 \text{ hm}^2/\text{a}$, 道路增长速率最快的时期出现在 2015—2018 年, DTRR 值高达 $117.29 \text{ hm}^2/\text{a}$ 。普兰镇的发展态势和托林镇相似, 2005—2011 年 DTBR 值可达到 $102.54 \text{ hm}^2/\text{a}$, 但 DTRR 值仅为 $31.05 \text{ hm}^2/\text{a}$ (最低值), 2011—2016 年 DTBR 值和 DTRR 值分别为 $34.06 \text{ hm}^2/\text{a}$ (最低值) 和 $76.63 \text{ hm}^2/\text{a}$ 。与托林镇不同的是, 普兰镇 DTBR 值和 DTRR 值的峰值均出现在 2016—2018 年期间, 分别为 $240.47 \text{ hm}^2/\text{a}$ 和 $162.26 \text{ hm}^2/\text{a}$, 域内房建和交通同步高速发展。狮泉河镇整体发展态势呈上升趋势, 但 DTBR 值和 DTRR 值峰值出现在 2013—2016 年, 分别为 $1\,217.08 \text{ hm}^2/\text{a}$ 和 $737.64 \text{ hm}^2/\text{a}$, 结合 2016—2020 年乡镇发展速率值, 发现狮泉河镇发展有用力过猛、动力不足的态势, 需要寻找新的发展动力源。

②PLAND。图 6(c) 和 (d) 呈现了 3 个乡镇 PLAND

的变化情况, 直观反映了托林镇、普兰镇和狮泉河镇的发展状况, 即托林镇和普兰镇前期侧重发展现象较严重, 后期发展逐渐趋于均衡; 狮泉河镇建筑物和道路发展速率趋于一致, 在其 PLAND 值上反应不明显。

③PD。图 6(e) 显示, 3 个乡镇 PD 值的变化规律大致相仿, 表现为先降低后回升。2013 年后建筑物 PD 值直线下降, 分析由于边境地区大力开荒拓土, 致使建筑物 PD 值逐年降低。2016 年开始, 随着边境地区常驻人口的增多, 区域内建筑物逐渐增多, PD 值逐渐回升。

④ED。ED 指的是景观范围内单位面积上异质景观斑块间的边缘长度, 值越大分布越分散。从图 6(f) 数据分析可以发现, 3 个地区 ED 值呈现上升态势, 建筑物和道路呈现分散均匀分布。狮泉河镇和普兰镇的 ED 值中期出现下降的情况, 对比表 3—4 地物提取结果和 AI 值变化情况 (图 6(g)) 发现, 受期

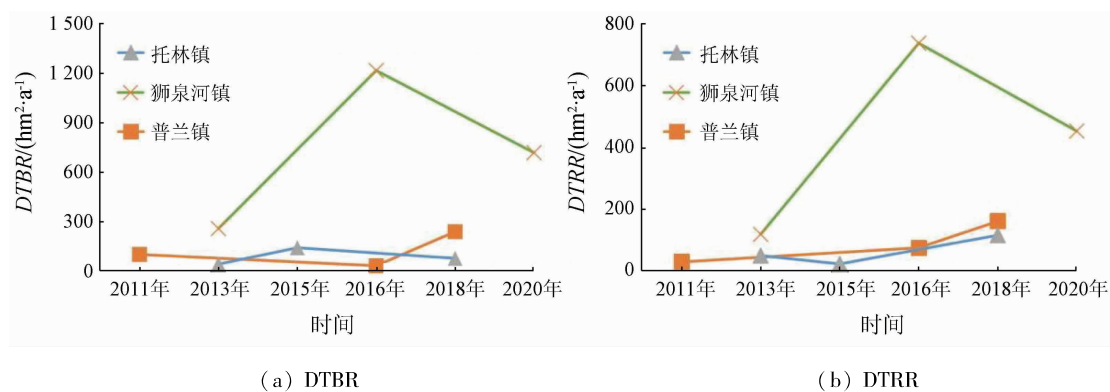


图 7 3 个乡镇建筑、道路发展速率

Fig. 7 Development rate of buildings and roads in 3 towns

表 3 3 个乡镇不同时期建筑变化可视化

Tab. 3 Visualization of architectural changes in 3 townships in different periods

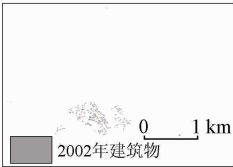
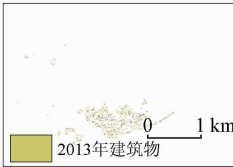
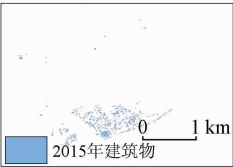
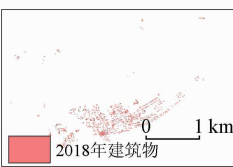
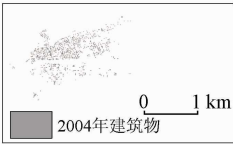
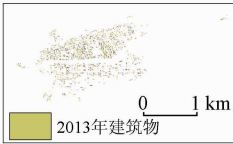
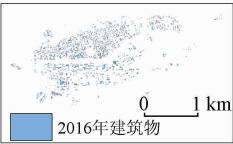
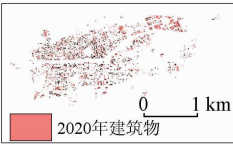
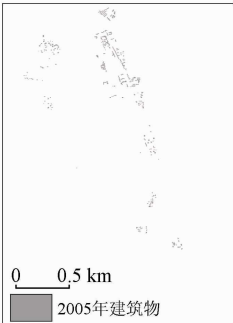
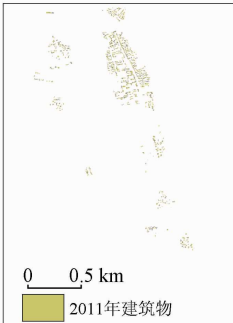
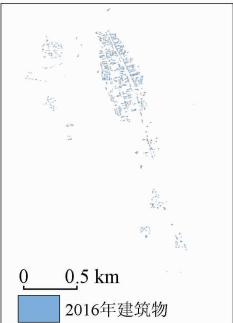
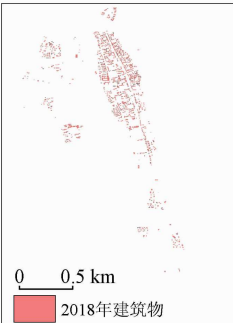
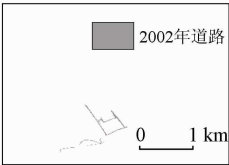
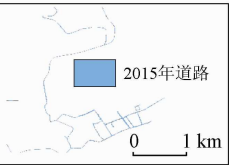
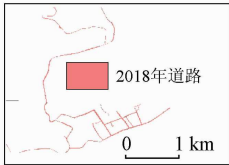
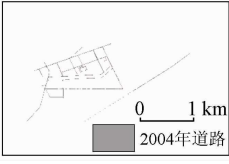
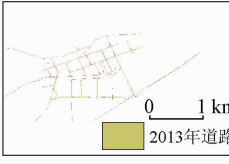
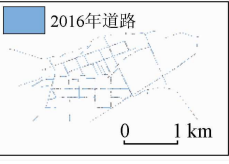
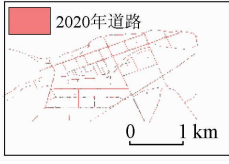
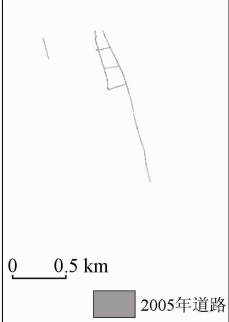
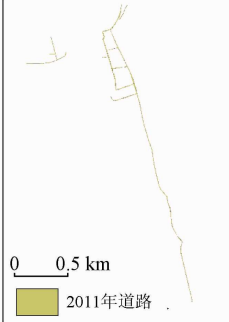
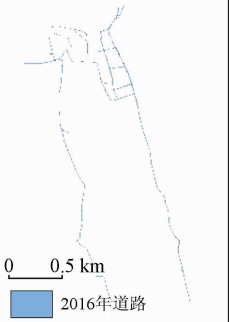
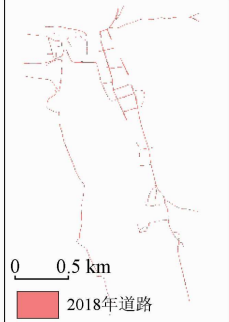
地区	第 1 期	第 2 期	第 3 期	第 4 期
托林镇	 2002年建筑物	 2013年建筑物	 2015年建筑物	 2018年建筑物
狮泉河镇	 2004年建筑物	 2013年建筑物	 2016年建筑物	 2020年建筑物
普兰镇	 2005年建筑物	 2011年建筑物	 2016年建筑物	 2018年建筑物

表 4 3 个乡镇不同时期道路变化可视化

Tab.4 Visualization of road changes in 3 townships in different periods

地区	第 1 期	第 2 期	第 3 期	第 4 期
托林镇				
狮泉河镇				
普兰镇				

间域内新增建筑物和道路所致。⑤COHESION。3 个乡镇的道路 COHESION 指数如图 6(h) 所示,托林镇和普兰镇 COHESION 值呈现先降后升趋势,反映当地道路连通性在中期一度恶化,后期逐渐得以改善。相反,狮泉河镇 COHESION 值呈现先升后降趋势,反映城市道路趋于饱和,随着建筑单元的持续增加,打破了道路饱和的现状,连通性有下降态势。

3.3 景观水平指数分析

3 个乡镇不同时期景观水平指数如图 8 所示。

①TA。如图 8(a) 所示,3 个地区 TA 值均呈不同程度的上升,结合各地区 CA 和 PLAND 值的变化情况,景观 TA 的变化趋势和建筑物斑块 CA 的变化趋势相仿,符合实际情况。②CONTAG。CONTAG 反应景观里斑块类型的离散或聚合程度。如图 8(b) 所示,狮泉河镇和普兰镇 CONTAG 值有较小的上升,托林镇 CONTAG 值在下降。表明狮泉河镇和普兰镇建筑物和道路聚合程度逐年提升,乡镇没有明显向外扩张迹象。反观托林镇,受城市扩张的影响,

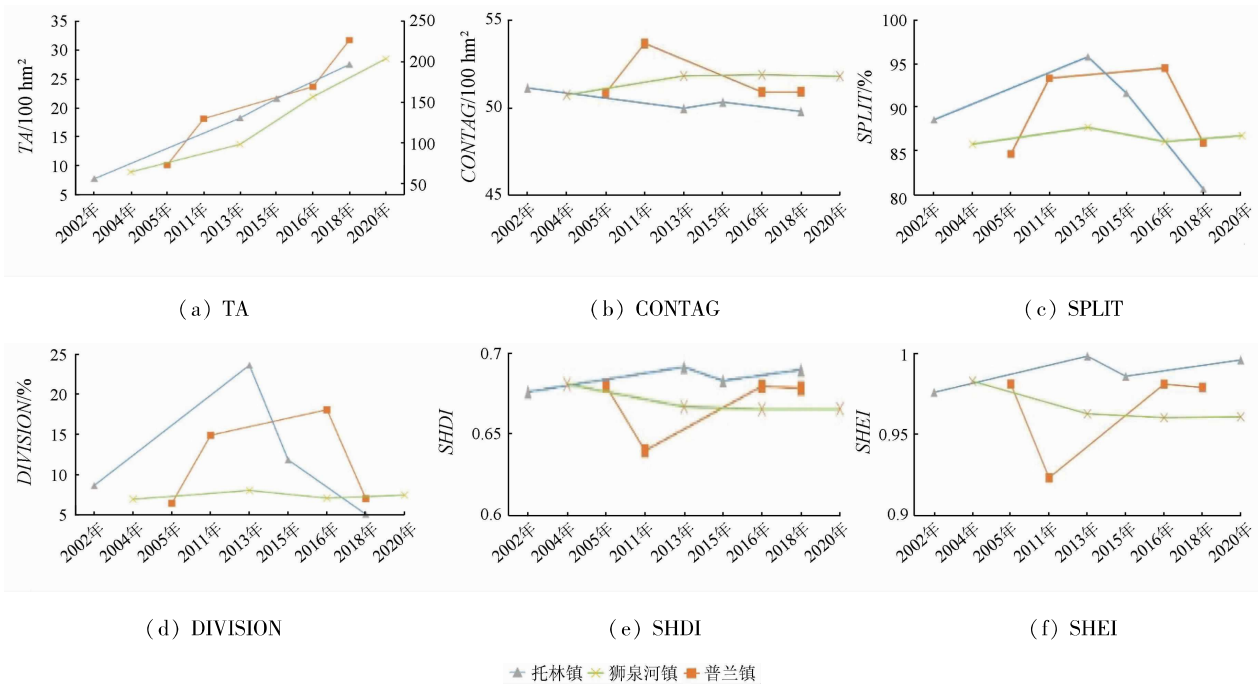


图 8 3 个乡镇不同时期景观水平指数变化

Fig. 8 Changes in the landscape level index of 3 townships in different periods

景观内斑块分散分布。③SPLIT 和 DIVISION。如图 8(c) 和 (d) 所示,托林镇和普兰镇 SPLIT 和 DIVISION 值先升后降,反映出 2 个地区在中期景观内斑块空间位置分散。随着后期城镇均衡化发展程度的提高,SPLIT 和 DIVISION 回降,景观内斑块分布呈均匀分布。④多样性指标。SHDI 和 SHEI 反映了景观内斑块的分布情况,值越大表明景观内优势斑块数量越少,各斑块分布越分散。8(e) 和 (f) 所示,狮泉河镇和普兰镇 2 个数值都呈现减小趋势,托林镇呈现增大趋势。结合影像和图 8(e) 发现,狮泉河镇和普兰镇建成区中建筑物斑块逐渐成为当地景观中优势斑块,趋于集中化。而托林镇受城市扩张作用影响,没有形成较为明显的优势斑块,斑块空间位置分散,这与 CONTAG 指数反映出的实际情况一致。

图 9—11 分别将托林镇、狮泉河镇以及普兰镇不同时期建筑物和道路的变化情况进行可视化表达。托林镇向北延伸道路以形成规模,建筑物围绕南部道路两侧密集分布;狮泉河镇道路发展向东北

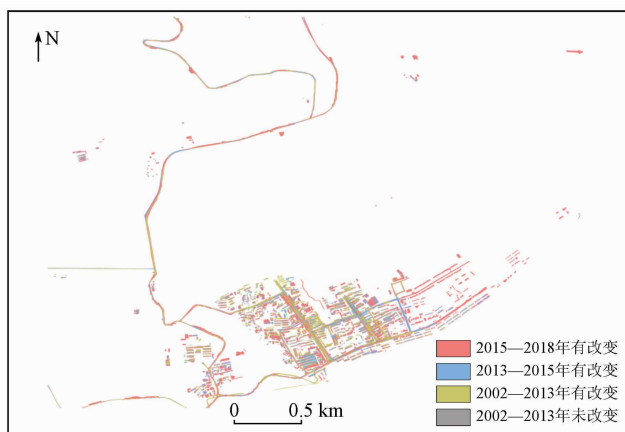


图 9 托林镇不同时期景观变化可视化
Fig. 9 Visualization of landscape changes in different periods in Tuolin Town

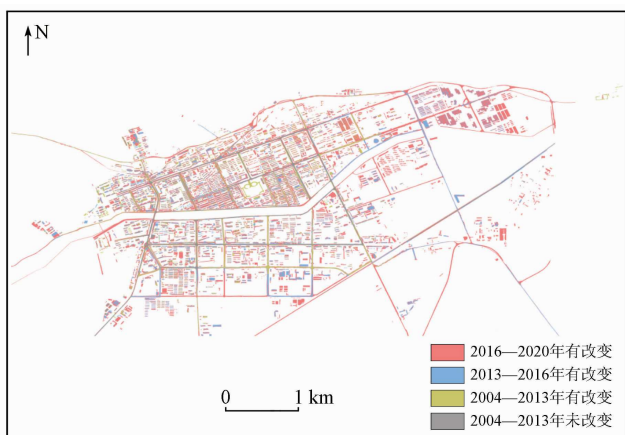


图 10 狮泉河镇不同时期景观变化可视化
Fig. 10 Visualization of landscape changes in different periods in Shiquanhe Town

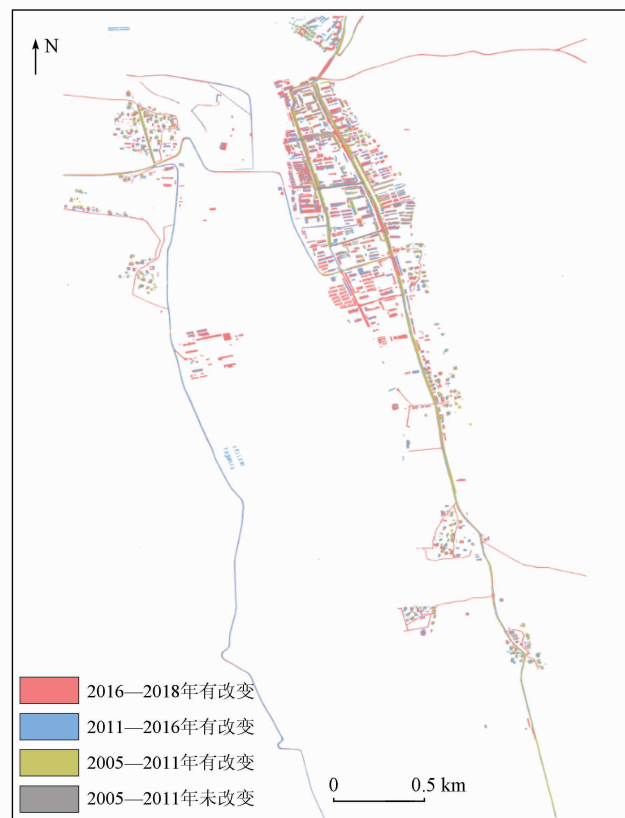


图 11 普兰镇不同时期景观变化可视化
Fig. 11 Visualization of landscape changes in different periods in Pulan Town

方向延伸,沿路两侧建筑物分布趋于密集;普兰镇整体向东南方向发展,建筑物和道路呈狭长分布。综上,托林镇向西北方向扩张,狮泉河镇向东北方向扩张,普兰镇向东南方向扩张。

3.4 戍边能力评估

戍边能力如表 5 数据所示,普兰镇和狮泉河镇戍边能力逐年提升,托林镇在 2015 年后,戍边能力有所下降。截止到 2018 年底,托林镇是 3 个镇中戍边能力最弱的一个,在未来的边防建设中应加大对托林镇的关注,着重提升当地边防实力,弥补边防漏洞。

表 5 3 个镇戍边能力变化情况
Tab. 5 Changes in border security capabilities of 3 towns

时期	托林镇	狮泉河镇	普兰镇
第 1 期	2 686.775	20 191.68	3 001.505
第 2 期	4 056.206	26 147.55	4 953.469
第 3 期	5 195.010	34 256.21	4 751.383
第 4 期	4 791.725	41 314.61	5 967.396

4 结论和展望

基于 D-LinkNet 深度学习网络,对边境地区托林镇、狮泉河镇以及普兰镇区域内建筑物和道路进

行提取,并通过计算12项景观格局指数分析乡镇发展特征,得出以下结论:

1) D-LinkNet深度学习网络提取建成区建筑物、道路时较传统的SVM方法有更高的精度和适用性,分类精度均在80%以上,IOU值保持在70%以上。传统的机器学习分类方法适用于大范围土地的粗分类,类似D-LinkNet深度学习分类方法在面对城市土地精细化分类时优势更大。

2) 分析景观指数发现,研究区建筑物和道路空间分布各有特点。托林镇城市扩张趋势依旧继续,域内建筑物和道路斑块的分布较为分散。狮泉河镇和普兰镇城市扩张势头相比减弱,域内斑块分布趋于集中,斑块间的连通性得到改善,居住环境更加聚集,安全性更高。另外,值得关注的是后期狮泉河镇道路凝聚度有下降的趋势,注意提防建筑物日渐聚集的同时,疏忽对交通可达性的改良,道路的连接性会直接影响城市发展。

3) 经过近20a的发展,托林镇、狮泉河镇和普兰镇的建筑物、道路交通面积和常驻人口增长迅猛,其中建筑物分别同比增长68.75%,70.75%和68.36%,道路分别同比增长75.27%,65.39%和67.76%,人口净增长分别为39.00%,68.44%和25.04%(数据来源于第五次和第六次人口普查数据)。显然,建筑面积和常住人口呈线性关系,利用建筑面积变化情况评估城市戍边能力成为一种新思路。

研究采用了Google Earth平台0.5m遥感影像,通过D-LinkNet深度学习方法进行建筑物和道路信息的提取,受地方环境影响,研究区内存在与道路颜色相近的建筑物,在提取时存在一定的误差。另外,边境乡镇人口统计数据较难获取,在分析人口变化时会存在些许误差,但不会影响整体趋势。本次研究只是一个初步探索,后续的研究应多结合建筑物和道路的颜色、纹理等特征,提升地物信息的提取精度,在更多边境城市进行更深入的研究。

参考文献(References):

- [1] 窦红涛,齐亚楠,贾若祥. 支持边境地区加快发展的思路和对策[J]. 中国发展观察,2020,249(21):39-43.
Dou H T, Qi Y N, Jia R X. Thoughts and countermeasures to accelerate the development of border areas[J]. China Development Observation, 2020, 249(21): 39-43.
- [2] 史诗悦,倪佳瑜. 系统论视域下新时代党的治藏方略的价值意蕴与形成审思——基于中央第七次西藏工作座谈会精神[J]. 西藏民族大学学报(哲学社会科学版), 2021, 42(1): 8-14, 153.
Shi S Y, Ni J Y. The value implication and formation of the party strategy of governing Tibet in the new era from the perspective of system theory[J]. Journal of Xizang Minzu University(Philosophy

- and Social Sciences Edition), 2021, 42(1): 8-14, 153.
- [3] 杨明洪,王周博. 我国陆地边境地区“空心化”的类型、成因与治理[J]. 四川师范大学学报(社会科学版), 2020, 47(6): 13-24.
Yang M H, Wang Z B. Types, causes and governance of “hollowing” in China’s land border areas[J]. Journal of Sichuan Normal University (Social Sciences Edition), 2020, 47(6): 13-24.
- [4] 方盛举,赵若州. 国家安全视角下边境城镇的戍边功能及其开发[J]. 哈尔滨工业大学学报(社会科学版), 2020, 22(5): 1-8.
Fang S J, Zhao R Z. The border-town’s garrison role and development from the perspective of national security[J]. Journal of Harbin Institute of Technology (Social Science Edition), 2020, 22(5): 1-8.
- [5] 陈宝行,孙小涛,宋红丽. 济南市中心城区空间扩张特征与机理[J/OL]. 测绘地理信息, 2020: 1-5 [2021-05-18].
Chen B X, Sun X T, Song H L. The characteristics and mechanism of spatial expansion in Jinan City center[J/OL]. Journal of Geomatics, 2020: 1-5 [2021-05-18].
- [6] 陈明发,刘帆,赵耀龙,等. 1987—2017年粤港澳大湾区城市群的不透水地表扩张与梯度演化[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(3): 443-455.
Chen M F, Liu F, Zhao Y L, et al. The expansion and gradient evolution of impervious surface within the Guangdong-HongKong-Macao Greater Bay Area from 1987 to 2017[J]. Geo-Information Science, 2021, 23(3): 443-455.
- [7] 张秋仪,高银宝,张杨,等. 海岛型城市建成区扩张特征及空间演化模式——以厦门岛(2002—2018年)为例[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2021, 37(1): 98-106.
Zhang Q Y, Gao Y B, Zhang Y, et al. Spatial process, motivation and model of the expansion of built-up areas of island city: A case study of Xiamen Island (2002—2018)[J]. Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition), 2021, 37(1): 98-106.
- [8] 陈菲尔,杨武年. 郑州大都市区城市发展格局演变——基于DMSP/OLS夜间灯光数据[J]. 西华师范大学学报(自然科学版), 2021, 42(2): 167-173.
Chen F E, Yang W N. Evolution of urban development pattern in Zhengzhou metropolitan area: Based on DMSP/OLS night light data[J]. Journal of China West Normal University (Natural Science), 2021, 42(2): 167-173.
- [9] 宋艳华,焦利民,刘稼丰,等. 城市扩张程度的影响因素分析——以武汉市为例[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(3): 417-426.
Song Y H, Jiao L M, Liu J F, et al. Analysis of the factors affecting the degree of urban expansion: Taking Wuhan City as an example[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(3): 417-426.
- [10] 周润芳,周亮. 中国典型边境城市空间扩张特征分析[J]. 测绘科学, 2019, 44(9): 54-60.
Zhou R F, Zhou L. Analysis of spatial expansion characteristics of typical Chinese border cities[J]. Science of Surveying and Mapping, 2019, 44(9): 54-60.
- [11] Vani M, Prasad P R C. Assessment of spatio-temporal changes in land use and land cover, urban sprawl, and land surface temperature in and around Vijayawada City, India[J]. Environment, De-

- velopment and Sustainability, 2020, 22(4): 3079–3095.
- [12] Robert S, Fox D, Boulay G, et al. A framework to analyse urban sprawl in the French Mediterranean coastal zone[J]. Regional Environmental Change, 2019, 19(2): 559–572.
- [13] Kovacs Z, Farkas Z J, Egedy T, et al. Urban sprawl and land conversion in post-socialist cities: The case of metropolitan Budapest [J]. Cities, 2019, 92(SEP): 71–81.
- [14] Canedoli C, Crocco F, Comolli R, et al. Landscape fragmentation and urban sprawl in the urban region of Milan[J]. Landscape Research, 2018, 43(5): 632–651.
- [15] Jain M, Dimri A P, Niyogi D. Urban sprawl patterns and processes in Delhi from 1977–2014 based on remote sensing and spatial metrics approaches [J]. Earth Interactions, 2016, 20(14): 160310134344005.
- [16] 谭竹婷, 王旭红, 蒋晓辉, 等. 2000—2018 年“一带一路”之中亚 5 国首都城市扩张的遥感监测[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2020, 56(6): 814–821.
- Tan Z T, Wang X H, Jiang X H, et al. Expansion of megacities in five central Asian countries along “One Belt and One Road” routes (2000–2018) [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2020, 56(6): 814–821.
- [17] 朱滨, 程小龙, 胡煦航. 基于 Landsat 影像的莆田市仙游县城市扩张研究[J]. 江西理工大学学报, 2020, 41(5): 48–54.
- Zhu B, Cheng X L, Hu X H. Research on urban expansion of Xianyou County in Putian City based on Landsat image[J]. Journal of Jiangxi University of Science and Technology, 2020, 41(5): 48–54.
- [18] 任晓燕, 何艳芬, 王宗明. 基于遥感的辽中南城市群建设用地扩张及其占用耕地的时空特征[J]. 国土资源遥感, 2020, 32(3): 98–105. doi:10.6046/gtzyyg. 2020.03.13.
- Ren X Y, He Y F, Wang Z M. Spatial-temporal characteristics of construction land expansion and occupation of cultivated land in urban agglomeration of central and southern Liaoning Province based on Remote Sensing[J]. Remote Sensing of Land and Resources, 2020, 32(3): 98–105. doi:10.6046/gtzyyg. 2020.03.13.
- [19] 王小龙, 闫浩文, 周亮, 等. 利用 SVM 分类 Landsat 影像的朝鲜主要城市建设用地时空特征分析[J]. 国土资源遥感, 2020, 32(4): 163–171. doi:10.6046/gtzyyg. 2020.04.21.
- Wang X L, Yan H W, Zhou L, et al. Using SVM classify Landsat image to analyze the spatial and temporal characteristics of main urban expansion analysis in Democratic People’s Republic of Korea[J]. Remote Sensing of Land and Resources, 2020, 32(4): 163–171. doi:10.6046/gtzyyg. 2020.04.21.
- [20] 卢琛, 陈俊华, 任梦茹. 基于 ESA 遥感影像的伊朗城镇空间时空演变分析[J]. 世界地理研究, 2021, 30(4): 864–872.
- Lu C, Chen J H, Ren M R. The spatiotemporal analysis on the evolution of urban space in Iran based on remote sensing images from ESA[J]. World Regional Studies, 2021, 30(4): 864–872.
- [21] 丛康林, 董超, 薄鑫宇, 等. 基于夜光遥感的山东省城市时空格局演化分析[J]. 测绘地理信息, 2021, 46(5): 78–82.
- Cong K L, Dong C, Bo X Y, et al. Evolution analysis of urban spatiotemporal patterns in Shandong Province based on nighttime light remote sensing[J]. Journal of Geomatics, 2021, 46(5): 78–82.
- [22] 陈征, 胡德勇, 曾文华, 等. 基于 TM 图像和夜间灯光数据的区域城镇扩张监测——以浙江省为例[J]. 国土资源遥感, 2014, 26(1): 83–89. doi:10.6046/gtzyyg. 2014.01.15.
- Chen Z, Hu D Y, Zeng W H, et al. TM image and nighttime light data to monitoring regional urban expansion: A case study of Zhejiang Province[J]. Remote Sensing of Land and Resources, 2014, 26(1): 83–89. doi:10.6046/gtzyyg. 2014.01.15.
- [23] 刘佳, 辛鑫, 刘斌, 等. 基于 DMSP/OLS 夜间灯光影像的 2000—2013 年鄂尔多斯市城市扩张遥感制图与驱动因子分析[J]. 国土资源遥感, 2018, 30(1): 166–172. doi:10.6046/gtzyyg. 2018.01.23.
- Liu J, Xin X, Liu B, et al. Urban expansion mapping and driving factor analysis of Ordos City during the period of 2000–2013 based on DMSP/OLS nighttime light data[J]. Remote Sensing of Land and Resources, 2018, 30(1): 166–172. doi:10.6046/gtzyyg. 2018.01.23.
- [24] 王霞. 基于支持向量机及 modis 数据的城市扩张监测研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2014.
- Wang X. Monitoring urban expansion with support vector machine using MODIS imageries: In the case study of Wuhan[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2014.
- [25] 闫晓天. 基于支持向量机及 MODIS 数据的南昌市城市空间格局演变研究[D]. 南昌: 东华理工大学, 2016.
- Yan X T. Study on evolution of urban spatial pattern of Nanchang base on support vector machine and MODIS data[D]. Nanchang: East China University of Technology, 2016.
- [26] 谷雨. 海上丝绸之路沿线港口城市扩张和生态效益评价研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020.
- Gu Y. Research on port city expansion and ecological benefit evaluation along the maritime silk road[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2020.
- [27] 时子童, 贾根锁, 胡永红. 基于卫星遥感揭示长三角台站周边城市土地利用扩张及其对气温记录的影响[J]. 气候与环境研究, 2018, 23(5): 607–618.
- Shi Z T, Jia G S, Hu Y H. Satellite remote sensing-based urban land-use expansion and its influence on surface air temperature records in the Yangtze River Delta, China[J]. Climatic and Environmental Research, 2018, 23(5): 607–618.
- [28] 陈馨, 匡文慧. 基于云平台的中哈干旱区典型城市地表覆盖变化遥感监测与比较[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(3): 548–557.
- Chen X, Kuang W H. Remote sensing monitoring and comparison of urban land cover changes in typical cities in China-Kazakhstan arid region based on cloud platform[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020, 35(3): 548–557.
- [29] 沈谦, 朱长明, 张新, 等. 1992—2013 我国干旱区城市不透水遥感制图与扩张过程分析[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(5): 1178–1186.
- Shen Q, Zhu C M, Zhang X, et al. Remote sensing mapping and expansion analysis of urban impervious surface in arid areas of China from 1992 to 2013[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020, 35(5): 1178–1186.
- [30] 李佳雨, 王华斌, 王光辉, 等. 中国中南半岛经济走廊重要节点城市发展状况遥感分析[J]. 遥感信息, 2018, 33(6): 71–78.
- Li J Y, Wang H B, Wang G H, et al. Monitoring and environmental analysis of important cities in China-Indochina Peninsula based on remote sensing data[J]. Remote Sensing Information, 2018, 33

- (6):71-78.
- [31] 林漳河. 基于 GIS 和 RS 的沿海县生态环境质量综合评价——以霞浦县为例[J]. 中国林业经济, 2019(5):134-137, 140.
- Lin Z H. Comprehensive evaluation of ecological environment quality of coastal counties based on GIS and RS: Taking Xiapu County as an example[J]. China Forestry Economics, 2019(5):134-137, 140.
- [32] Zhou L, Zhang C, Ming W. D-LinkNet: LinkNet with pretrained encoder and dilated convolution for high resolution satellite imagery road extraction[C]// 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW). IEEE, 2018.
- [33] 刘浩, 骆剑承, 黄波, 等. 基于特征压缩激活 Unet 网络的建筑物提取[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(11):1779-1789.
- Liu H, Luo J C, Huang B, et al. Building extraction based on SE-Unet[J]. Journal of Geo-Information Science, 2019, 21(11):1779-1789.
- [34] 李秀珍, 布仁仓, 常禹, 等. 景观格局指标对不同景观格局的反应[J]. 生态学报, 2004, 24(1):123-134.
- Li X Z, Bu R C, Chang Y, et al. The response of landscape metrics against pattern scenarios[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(1):123-134.
- [35] 冯甜甜. 基于高分辨率遥感数据的城市精细尺度人口估算研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2010.
- Feng T T. Urban small area population estimation based on high-resolution remote sensing data[D]. Wuhan: Wuhan University, 2010.

Research on urban development and security in border areas of China based on deep learning

MA Xiaoyu¹, ZHANG Xin^{2,3}, LIU Jilei⁴, ZHOU Nan^{2,3}, LIU Kejian³, WEI Chunshan⁵, YANG Peng⁵

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056000, China; 2. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Aerospace Information Innovation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 4. Public Security Remote Sensing Application Engineering Technology Research Center, People's Public Security University of China, Beijing 100101, China; 5. Suzhou Zhixin Information Technology Limited Company, Suzhou 215000, China)

Abstract: In order to explore the development trend of border cities in China and assess the city's border defense capability, the D-LinkNet34 deep learning algorithm is used to automate the extraction of buildings and roads in Tuolin, Shiquanhe and Pulan towns in Tibet Autonomous Region, and to analyze the development trend and border defense capability of border towns based on landscape index and population size. Analysis results show that: ① The extraction method based on D-LinkNet deep learning network can effectively further classify urban construction land, with average total progress of more than 80% and IOU above 70%. ② The distribution of plaques in the towns of Pulan and Shiquanhe shows a trend of aggregation, and the trend of urban expansion weakened. The distribution of plaques in Tuolin Town shows a scattered trend, and the trend of urban expansion is obvious. ③ The building area is linearly related to the resident population, and the building area of Tuolin Town increased by about 68.75% from 2002 to 2018, and the resident population increased by about 39.00%. The building area of Shiquanhe Town increased by about 70.75% from 2004 to 2020, while the resident population increased by about 68.44%. The building area of Pulan Town increased by about 68.36% from 2005 to 2018, while the resident population increased by about 25.04%. This study provides a new method for quantitative evaluation of the expansion characteristics and border defense capability of border cities, as well as a reference for building China's border defense capability.

Keywords: remote sensing; border towns; urban development; landscape index; D-LinkNet

(责任编辑: 陈理)