REMOTE SENSING TECHNOLOGY AND APPLICATION

引用格式:WANG Yunchen,ZHOU Xiao,WANG Penglong, et al. Spatio-temporal analysis of land use/land cover pattern changes in Triangle of Central China in the past 30 years[J].Remote Sensing Technology and Application, 2025,40(1):132-143.[王昀琛,周晓,王鹏龙,等.近30年长江中游城市群土地利用/覆盖时空格局分析[J].遥感技术与应用,2025,40(1):132-143.]

DOI:10.11873/j.issn.1004-0323.2025.1.0132

# 近30年长江中游城市群土地利用/覆盖时空格局分析

王的琛1,2,周 晓3,王鹏龙4,李柏延5,韩伟孝4,侯金亮4

- (1.安徽省城镇化建设协同创新中心,安徽 合肥 230009;
  - 2. 西安邮电大学 计算机学院,陕西 西安 710061;
    - 3. 商洛市不动产登记中心,陕西 商洛 726000;
- 4. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 甘肃 兰州 730000;
- 5. 陕西师范大学 地理科学与旅游学院,陕西 西安 710119)

摘要:土地利用/覆被变化是研究全球环境变化和可持续发展的重要基础。基于 Google Earth Engine (GEE)平台和随机森林算法,对长江中游城市群1990、2000、2010 和2020年的 Landsat 卫星影像进行快速、高效地解译,追踪土地利用/覆被变化的时空格局变化。结果表明:①2020年长江中游城市群主要由耕地和植被构成,面积占比在86%以上,耕地和植被主要分布在城市群的四周、城乡建设用地呈散团式镶嵌其中的空间格局;②土地利用数量结构上整体呈现城乡建设用地和耕地持续增加、植被和未利用地呈波动式减少、水域波动式微弱增加的发展趋势;在土地利用转移上,主要呈现出建设用地斑块遍地开花并伴随局部爆炸式扩张,植被流向耕地,未利用地流向植被和耕地的演变态势;③在土地利用空间集聚演变方面,土地利用程度的较热点、热点都在增加,极热点区总体逐渐减少,而较热点则相反,热点呈增加的趋势,且全部位于武汉城市圈及其周围;土地利用程度较冷点总体上呈先减少后增加的趋势,且较冷点区由环长株潭城市群(湘潭市、萍乡市和株洲市)转向环鄱阳湖城市群(南昌市)。长江中游城市群建设用地和耕地空间集聚范围呈持续扩大态势,且集聚程度随集聚范围的扩张同步加强,中等密度和较低密度区扩展区随着城市群的快速发展逐渐演变为热点区域。研究结果为生态型城市群的土地资源保护与可持续利用提供了有效的决策依据。

关 键 词:Google Earth Engine; 土地利用/覆被变化; 时空特征; 随机森林算法; 长江中游城市群中图分类号:F301.2;P901 文献标志码: A 文章编号:1004-0323(2025)01-0132-12

## 1 引 言

随着我国城镇化率从1949年的11%提高到了2020年的60%,在各个地区引发了不同程度的土地

利用/覆被变化,与此同时,也促进了城市群的发育。中国十一五规划(2006~2010)期间正式提出把"城市群"作为我国城乡区域发展中的主导推动力量。2014年3月,国家正式发布了《国家新型城镇化

**收稿日期:**2023-07-07;**修订日期:**2024-12-08

基金项目:安徽省城镇化建设协同创新中心开放课题(XTCX2024KF03),国家自然科学基金项目(42301455),陕西师范大学教学改革研究项目(23GGYS-JG06),中央高校基本科研业务费专项资金(GK202304024),国家自然科学基金项目(42101259),陕西省科学技术协会青年人才托举计划项目(XXJS202234),甘肃省青年科技基金计划(22JR5RA090)。

作者简介:王昀琛,博士,讲师,主要从事城市可持续发展研究。E-mail: wangyunchen@lzb.ac.cn

通信作者:王鹏龙,博士,馆员,主要从事创新政策与可持续发展评价研究。E-mail:wangpl@llas.ac.cn

规划(2014~2020)》,规划指出,以城市群为推进城镇化的主体形态,符合全球化背景下的城镇化一般规律,符合我国资源与环境承载能力基本特征。随后,在十八大报告中明确提出,要科学规划城市群规模和布局。由此表明,在未来几十年,城市群将成为我国城市化发展的主要形态,全球城市群的发育正在进入21世纪的中国时代[1]。

土地利用/覆被变化可以最直接地表征人类活 动对地球表层系统影响程度[2-5]。近年来,国内外学 者关于土地利用/覆被变化的时空格局的研究在方 法上主要集中在基于统计方法的演变过程分析(如 土地利用动态度、热点分析等)[6-7]、基于景观指数的 演变格局分析(如斑块密集度、破碎度、形状复杂度 等)[8]、驱动力[9]等方面,其成果多集中在城市扩张、 驱动机制、景观格局和土地利用模拟与预测等方 面。国内研究主题以城市以及城市群和都市圈空 间扩张(展)与蔓延的时空格局、动力机制研究为 主。研究采用的数据主要来源于夜间灯光 DMSP/ OLS (Defense Meteorological Satellite Progra Operational Linescan System)数据,研究区域主要集中在 珠三角[10]、京津冀[11-12]和长三角[13]一带,对中部城市 群的研究很少关注。在面对城市群尺度的大区域 长时间序列海量数据时,传统单机的软件处理方式 对大区域长时间序列海量数据处理时,计算能力、 存储性能和存储容量很难达到要求。而遥感大数 据云平台具有快速处理大区域长时间序列海量数 据、并分析其变化的能力,可以快速灵活地为地理 空间应用提供计算能力、存储性能和存储容量。遥感 云计算平台(如Google Earth Engine)的出现可以填补 传统单机数据存储、计算能力和资源配置的不足。

此外,国内针对土地利用变化格局的研究主要集中在京津冀和东部沿海地区,对中部城市群的研究很少关注。长江中游城市群,作为长江经济带开发的关键区域,土地利用类型变化较为明显,是中国中部崛起和快速城市化地区的典型代表。因此,本文以长江中游城市群为研究对象,以1990、2000、2010和2020年的4期Landsat遥感影像为基础数据源,基于GEE平台和随机森林(Random Forest,RF)算法,按照城乡建设用地、水域、植被、耕地和未利用地的分类系统,绘制高精度长江中游城市群土地利用/覆被图,进而分析长江中游城市群的近30年间的土地利用格局演变过程,研究土地利用数量结构和土地利用/覆被转移流的时空差异,识别和分析土地

利用空间集聚特征,为加强长江中游城市群的土地资源保护和可持续利用提供科学决策依据。

## 2 研究区概况

长江中游城市群(图1),也称"中三角",位于26°03′~32°38′N,110°15′~118°28′E,地处亚热带季风性湿润气候区,河流纵横,众多大小湖泊镶嵌在长江两侧。长江中游城市群是以武汉为中心城市,长沙、南昌为副中心城市的国家级城市群,研究范围涵盖武汉城市圈、长株潭城市群、环鄱阳湖城市群等中国中部经济发展地区,研究范围涵盖武汉市、长沙市、南昌市、黄石市、株洲市、九江市、鄂州市、湘潭市、景德镇市、黄冈市、岳阳市等31个城市。西起湖北宜昌,东至江西上饶,沟通鄂湘赣3省,2020年土地面积约32.61万km²,长江中游城市群以全国3.4%的土地面积和9.0%的人口数量创造了9.6%的经济总量。

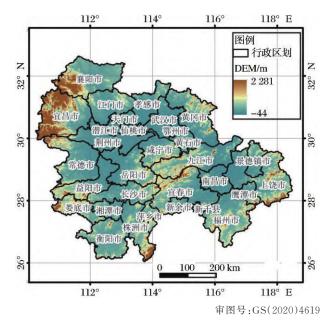


图1 研究区概况

Fig.1 The location of the study area

## 3 数据与方法

#### 3.1 数据来源

研究数据主要包括 1990、2000、2010 及 2020 年长江中游城市群 Landsat 遥感影像数据集(表 1)、长江中游城市群矢量边界数据。研究区 1990~2020 年人口数量数据主要来自于中国统计年鉴、中国城市统计年鉴等资料。研究中所使用的 Landsat 遥感影像数据集(6月和9月)均来自 GEE平台上数据资源目录中的 Landsat 大气表观反射率数据(Top Of

Atmosphere, TOA)数据,该数据是在Landsat原始 影像数据源基础上经过大气校正处理后制作而成 的,可直接在GEE中进行调用和处理,对有云或者 有云阴影的遥感影像通过CFMASK算法生成的质 量评估波段 QA 进行去云处理。其中,1990年 (1987~1992)使用 Landsat-5 TM 影像数据,2000 年(1999~2001)和 2010年(2010~2011)使用 Landsat-5 TM 和 Landsat-7 ETM+影像数据,2020年 (2017~2021)使用Landsat 8 OLI影像数据。

#### 3.2 土地利用/覆盖分类体系

根据对研究区影像的观察和了解,结合长江中 游城市群土地利用/覆盖现状和地形分布特点,并 参考相关LUCC研究成果[14-15],利用GEE平台提供 的 4 期 Landsat 30m 分辨率遥感影像上不同地物呈 现的不同波谱特征,选取具有明显辨识特征的地物 类型,确定进行遥感解译的土地利用分类体系,包 括耕地、植被、水域、建设用地和未利用地(也叫其 他用地)五大类别(表2)。

数据来源 表 1 Table 1 Data sources

年份	月份	GEE影像集 ID	波段	分辨率/m
1990年(1987~1992)	6月、9月	Landsat/LT05/C01/T1_TOA	B1, B2, B3, B4, B5, B7	30
2000年(1999~2001)	6月、9月	Landsat/LE07/C01/T1_TOA	D1 D9 D9 D4 DE D7	30
2000年(1999~2001)		Landsat/LT05/C01/T1_TOA	B1, B2, B3, B4, B5, B7	
0010 F (0010 0011)	6 H 0 H	Landsat/LE07/C01/T1_TOA	D1 D0 D2 D4 D5 D7	30
2010年(2010~2011)	6月、9月	Landsat/LT05/C01/T1_TOA	B1, B2, B3, B4, B5, B7	
2020年(2017~2021)	6月、9月	Landsat/LC08/C01/T1_TOA	B2, B3, B4, B5, B6, B7	30

表 2 土地利用/覆盖分类系统

Table 2 Land use/cover classification system

编号	地类名称	主要内容
1	耕地	水田、旱地、塑料大棚
2	植被	林地、草地、园地
3	水域	河流、湖泊、水库、坑塘、沟渠、滩地
4	城乡建设用地	城镇用地、农村居民点、厂房、其他建设用地
5	未利用地	荒草地、盐碱地、沼泽地、沙地、裸土地、裸岩等

#### 3.3 研究方法

#### 3.3.1 分类方法

随机森林算法具有学习速度快、人工干预少和 精确度高等优点,因此,本文选用该方法实现5种土 地利用类型的分类。具体方法如下:①构建训练样 本,具体包括3类:一是已有被验证、可靠的土地利 用分类数据(如二调数据);二是通过野外GPS数据 采集获取样本,野外采样时间为2020年7月10日至 7月25目;三是通过目视解译的方式,参考Google Earth Pro和高分二号中的历史高清影像,并根据影 像上具有明显可辨识的形状、大小、色调、阴影、纹 理等直接或间接解译标志,选取土地利用分类系统 中各类地物的感兴趣区域(Area of Interesting, AOI),建立初始样本数据。②创建一个值为0的全 局网格,设定土地利用变化/覆盖解译的优先次序 如下:城乡建设用地、水域、植被、耕地、未利用地。 假设城乡建设用地已经占用该网格,为保证不同地 类的拓扑关系,不允许水域、植被、耕地和未利用地

占用该网格,其他类型按照优先次序依次类推。通 过 GEE 平台的 random Columns 将初始样本数据按 照3:7的比例,随机切分生成训练样本集和验证样 本集。③利用影像的 sampleRegion 方法对训练数 据和验证数据进行标准化处理,生成监督分类训练 样本数据和验证样本数据。④利用归一化植被指 数 (Normalized Difference Vegetation Index, ND-VI)、归一化建筑指数(Normalized Difference Building Index, NDBI)、归一化水域指数(Normalized Difference Water Index, NDWI) 3 项遥感指数的辅助, 实现随机森林分类,得到1990、2000、2010及2020 年长江中游城市群土地利用/覆盖结果。

## 3.3.2 精度评价方法

针对4期土地利用分类结果,利用混淆矩阵表 示精度评价结果,具体评价指标包括总体精度(公 式(1))、Kappa 系数(公式(2))等,从不同的方面评 价影像分类的结果,公式如下:

$$OA = \sum_{k=1}^{n} \frac{x_{kk}}{N} \tag{1}$$

$$OA = \sum_{k=1}^{n} \frac{x_{kk}}{N}$$

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^{n} x_{ii} - \sum_{i=1}^{n} (x_{i1} x_{+i})}{N^{2} - \sum_{i=1}^{n} (x_{i+1} x_{+i})}$$
(2)

其中:OA为总体分类精度;K是Kappa系数;n代表 混淆矩阵中总列数;N为评价样本总数;x;i和xk分别 是混淆矩阵中第 i 行、第 i 列上正确分类的样本数目 和第k行、第k列上正确分类的样本数目; $x_{i+}$ 和 $x_{i}$ 分

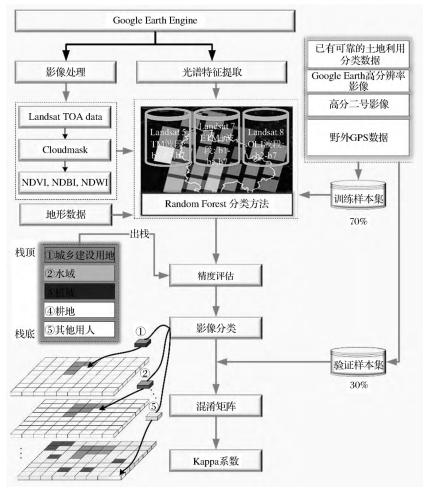


图 2 基于 GEE 平台的土地利用分类技术流程图

Fig.2 Flow chart of land use classification technology based on GEE platform

别是第i行和第i列的总样本数量。一般地,当K>0.8时, 认为所得分类结果与实际地面类别一致性较高。 3.3.3 土地利用空间集聚特征

本文中土地利用程度的计算借鉴了谢正峰等[16] 的土地利用程度综合指数计算方法(公式(3)),未 利用地的分级指数为1、植被的分级指数取值为2、 耕地的分级指数取值为3、城乡建设用地的分级指 数取值为5,由于长江中游城市群湖泊、鱼塘较多, 水域的分级指数取值为4。

$$La = 100 \times \sum_{i=1}^{N} A_i \times C_i \tag{3}$$

La(100 < La < 400) 是单元的土地利用程度综合指数,其取值范围;  $A_i$  为该单元第 i 级土地利用程度分级指数;  $C_i$  为该单元第 i 级土地利用程度的面积百分比; N 为土地利用程度分级数。

其次,将土地利用程度与地级市的矢量图空间连接,采用Getis-Ord Gi\*,识别具有统计显著性的热点和冷点,具体通过HotSpots\_stats方法计算获得[17]。

最后,出图并统计出各指标冷热点面积占比。

#### 3.3.4 Kernel 密度估计。

核密度分析工具用于计算要素在其周围邻域中的密度,可用于测量某一土地利用类型变化的空间集聚特征,并可将其可视化<sup>[18]</sup>。核密度值越高表示长江中游城市群某一土地利用类型变化扩展或者紧缩态势越聚集,反则越分散。以城乡建设用地斑块为例,提取不同时期新增城乡建设用地斑块的质心作为点要素,并以斑块面积作为权重指标进行密度分析。核密度值越高表示长江中游城市群某一土地利用类型变化扩展或者紧缩态势越聚集,反则越分散。详细计算参考ArcGIS中的KernelDensity函数的使用方法。

### 4 结果与分析

#### 4.1 土地利用/覆被数据集精度评估

通过混淆矩阵评价遥感影像分类精度是目前普遍推荐的方法。本研究中,2020年土地利用/覆

被分类结果的混淆矩阵如表3所示。

4期遥感影像分类结果(表4)的总体精度分别达到了92.94%、93.19%、91.27%、91.42%, Kappa系数分别为0.85、0.87、0.83、0.84, 说明4期遥感数据的分类精度均较高。

表3 土地利用分类精度评价结果

Table3 Accuracy assessment of land use classification

类型	耕地	植被	水域	城乡建	未利	制图精度
<b>关型</b>				设用地	用地	/ 1/0
耕地	1005	33	1	0	17	95.17
植被	41	184	1	0	8	78.63
水域	5	9	113	0	1	88.28
城乡建设用地	3	0	0	210	4	96.77
未利	12	8	0	0	12	37.50
用地						
用户精度/%	94.28	78.63	98.26	100.00	28.57	

表 4 分类精度汇总

Table 4 Summary of classification accuracy

年份	分类样本数量	总体精度	Kappa系数
1990年	1543	92.94%	0.85
2000年	1571	93.19%	0.87
2010年	1924	91.27%	0.83
2020年	1667	91.42%	0.84

#### 4.2 土地利用/覆被数据时空格局变化特征

由图 3 和表 5 可以看出,长江中游城市群的耕地和植被面积较大,研究期间,耕地面积有增有减,呈明显波动增加的态势;植被呈现不断向内萎缩的态势;水域和城乡建设用地呈现逐年增加的态势,未利用地呈现波动减小的态势。

表 5 1990~2020 年长江中游城市群土地利用类型增长率 Table 5 The growth rate of land types in Triangle of Central China from 1990 to 2020

年份	耕地	植被	水域	城乡建	未利
			小坻	设用地	用地
1990~2000	2.40%	3.80%	-0.10%	0.50%	-6.70%
2000~2010	-2.20%	-3.40%	2.00%	0.60%	2.90%
2010~2020	6.30%	6.50%	0.20%	0.87%	-0.81%

由图 3(a)可以看出,1990年,长江中游城市群耕地、植被、水域、城乡建设用地和未利用地占比分别为 38.60%、47.48%、5.21%、0.72%和7.73%。

由图 3(b)可以看出,2000 年与1990年相比,长江中游城市群耕地增加~2.4%,植被增加~3.8%,水域基本保持不变、城乡建设用地增加~0.5%,未利用地减少~6.7%。说明1990~2000年之间,耕

地、植被和城乡建设用地的增加是以消耗未利用地 资源为代价的。

由图 3(c)可以看出,2010年与1990年、2000年相比,长江中游城市群耕地分别增加~0.3%和减少~2.2%;植被分别增加~0.4%和减小~3.4%;水域分别增加1.9%和增加~2.0%;城乡建设用地分别增加1.1%和增加~0.6%;未利用地分别减小~3.8%和增加~2.9%,说明1990~2010年之间,城乡建设用地和水域的增加是以消耗耕地和植被资源为代价的。

由图 3(d)可以看出,2020年长江中游城市群耕地、植被、水域、城乡建设用地和未利用地占比分别为45.44%、41.37%、7.35%、2.68%和3.16%。说明2010~2020年之间,城乡建设用地和耕地的增加是以消耗未利用地和植被资源为代价的。由于同物异谱和异物同谱等问题的存在,在分类时导致未利用地精度低,原因如下:一是植被和山体阴影的混分,山体阴影会被误判为未利用地;二是未利用地和城镇用地之间的分类界线不清晰;三是植被会被误判为未利用地。

#### 4.3 土地利用/覆被转移流空间分布

桑基图可以可视化从左到右流向最后的节点,每条边代表一条数据流,宽度代表数据流的大小,土地利用/覆盖类型转移桑基图(图4)可以更加明确、直观地看出土地利用/覆盖类型是如何转移的。从各地类最终面积增减量角度分析,1990~2000年耕地和植被面积变化最大,主要是植被向耕地、未利用地向耕地、未利用地向植被转换;2000~2010年植被面积变化最大,是耕地转植被、植被转耕地、植被转水域、水域转植被;2010~2020年植被面积变化量最大,植被转耕地、未利用地转植被、以及水域转植被。从主要地类流入转出角度分析,植被面积先增后减,总体略减,1990~2020年有植被转化为其他地类,主要是流向植被(65.97%)和耕地(27.79%)。

#### 4.4 土地利用/覆被空间集聚特征

## 4.4.1 土地利用程度空间热点分析

依据图 5可以看出,1990年(图 5(a))和 2000年(图 5(b))长江中游城市群土地利用程度极热点区有荆门市、孝感市、天门市、武汉市、潜江市、仙桃市、荆州市,相对于 1990年和 2000年,2010年(图 5(c))土地利用程度极热点区减少了荆门市和武汉市,相对于 2010年,2020年(图 5(d))土地利用

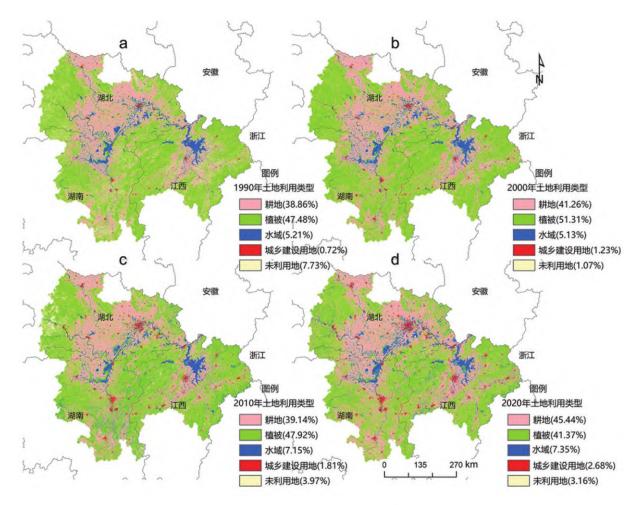


图 3 1990~2020年长江中游城市群土地利用类型空间变化特征

Fig.3 Spatial distribution pattern of land types in Triangle of Central China in 1990 to 2020

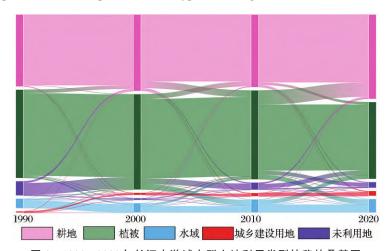


图 4 1990~2020 年长江中游城市群土地利用类型转移的桑基图

Fig. 4 Sankey map of land use types transfer in Triangle of Central China during  $1990{\sim}2020$ 

程度极热点区仅有孝感市、天门市、武汉市、潜江市、仙桃市,减少了荆州市、增加了武汉市。1990年长江中游城市群土地利用程度极冷点区有湘潭市、萍乡市和株洲市,相对于1990年,2000年土地利用程度极冷点区减少了株洲市。相对于2000年,2010

年土地利用程度没有极冷点区。相对于1990年、2000年和2010年,2020年土地利用程度增加了南昌市。由图6可知,土地利用程度在荆州市、岳阳市、仙桃市、武汉市、南昌市、景德镇市较高,强度约在200~300之间。

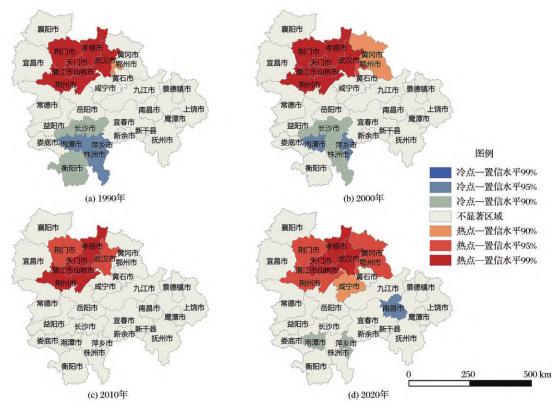


图 5 1990~2020年长江中游城市群土地利用程度冷热点

Fig.5 Spatial distribution pattern of cold and hot spots of land use degree in Triangle in 1990 to 2020

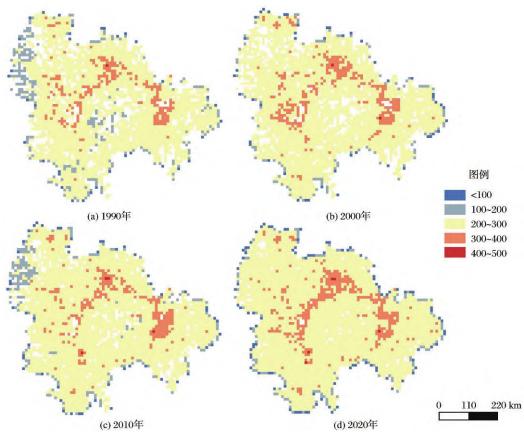


图 6 1990~2020年长江中游城市群土地利用程度综合指数

Fig.6 Spatial distribution pattern of land use degree in Triangle of Central China in 1990 to 2020

综上,经统计分析土地利用程度冷热点数量,整体来说土地利用程度的较热点、热点都在增加,极热点区总体逐渐减少,而较热点则相反,热点呈增加的趋势,且全部位于武汉城市圈及其周围;土地利用程度较冷点总体上呈先减少后增加的趋势,且较冷点区由环长株潭城市群(湘潭市、萍乡市和株洲市)转向环鄱阳湖城市群(南昌市)。

#### 4.4.2 城乡建设用地变化空间集聚特征

本研究为深入分析长江中游城市群建设用地扩展的空间聚散态势,对1990~2000年(图7(a))、2000~2010年(图7(b))、2010~2020(图7(c))和1990~2020(图7(d))四个阶段新增建设用地斑块进行核密度分析,将其结果划分为由低到高依次为低密度区、较低密度区、中等密度区、较高密度区、高密度区。

依据图7可以看出,长江中游城市群建设用地在数量上,呈逐年扩展态势,近30年间增加面积累计达6500.45 km²;2000~2010年间,研究区建设用地整体扩张强度相对较低,可能是受到2007年提出的"资源节约型、环境友好型社会"举措的影响;2010~2020年间,建设用地扩张规模和扩张强度较大,为城市群快速发育时期[19]。其中,城乡建设用地扩张的较高与高密度区主要集中在以武汉市为中心的武汉城市圈、以长沙为中心的环长株潭城市群、以南昌市为中心的环鄱阳湖城市群及其周围。在不同时段城乡建设用地扩展特征各异,以武汉市为中心的武汉城市圈、以长沙为中心的环长株潭城市群、以南昌市为中心的环鄱阳湖城市群呈现出"中三角"集聚高密度区之外,其余地区扩展密度整体偏低。

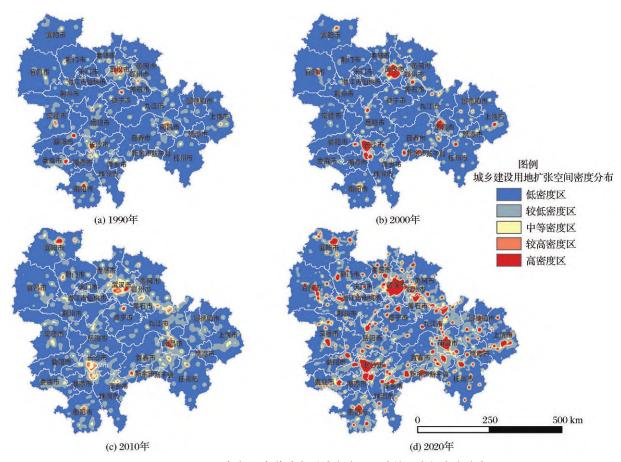


图 7 1990~2020年长江中游城市群城乡建设用地扩展空间密度分布

Fig. 7 Spatial agglomeration of construction land expansion in Triangle of Central China in 1990 to 2020

综上,长江中游城市群建设用地空间集聚范围 呈持续扩大态势,且集聚程度随集聚范围的扩张亦 同步在加强,中等密度和较低密度区扩展区随着城 市群的快速发展逐渐演变为热点区域。

#### 4.4.3 耕地变化空间集聚特征

为深入分析长江中游城市群耕地扩展的空间 聚散态势,对1990~2000年(图8(a))、2000~2010 (图8(b))、2010~2020(图8(c))和1990~2020 (图 8(d))4个阶段新增耕地斑块进行核密度分析,将其结果也划分为由低到高依次为低密度区、较低密度区、中等密度区、较高密度区、高密度区。依据图 8 可以看出,长江中游城市群耕地在数量上,也呈逐年扩展态势,近30年间增加面积累计达32914.7 km²;其中,耕地扩张的较高与高密度区主要集中在襄阳市、宜昌市、常德市、益阳市、娄底市、湘潭市、衡阳

市、株洲市、萍乡市、新余市、福州市、上饶市、岳阳市、 咸宁市、黄石市、黄冈市及其周围。在不同时段耕 地扩展特征各异,长江中游城市群四周呈现高密度 区和较高密度区,其余地区扩展密度整体偏低。综合 而言,长江中游城市群耕地空间集聚范围呈持续扩 大态势,且集聚程度随集聚范围的扩张亦同步在加强, 长江中游城市群四周逐步发展演变为热点区域。

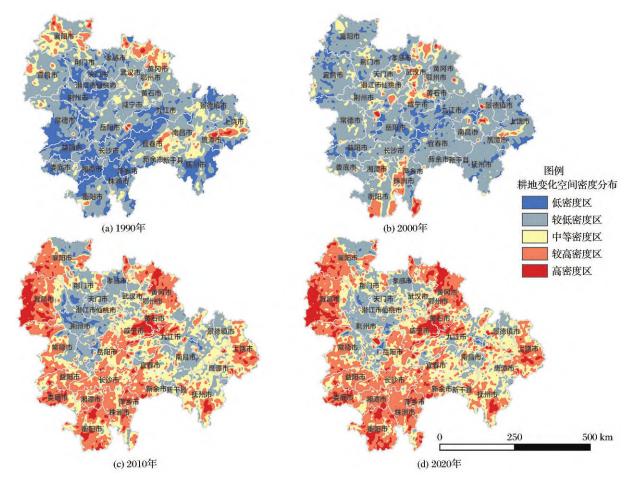


图 8 1990~2020年长江中游城市群耕地扩展空间密度分布

Fig.8 Spatial agglomeration of cultivated land expansion in Triangle of Central China in 1990 to 2020

## 5 讨论

本研究基于 GEE 平台和随机森林算法,利用 Landsat 1990、2000、2010 和 2020 年 4 期遥感影像,实现了对长江中游城市群 1990、2000、2010、2020 年 土地利用/土地覆盖图的快速半自动解译方法,分析了 1990~2020 年长江中游城市群土地利用/覆被变化及其时空差异。结果表明,该方法和平台对于大区域范围的土地利用/土地覆盖分类具有明显优势,总体分类精度均值 90% 以上,这种半自动解译方法不仅节省大量人力、物力,且对时间和空间要求更低,为长时间和大区域的地图绘制提供了新思路。

精确的区域分类产品是陆地表层过程研究的重要基础。对数据质量的了解与数据本身同等重要,定量的数据精度评估不仅是对数据本身包含信息的丰富,而且对有助于发现问题,从而促进土地覆盖制图方法的发展。将本研究结果与其他数据集在本研究区的结果[5.14-15.20]进行比较(表6),1990年,刘纪远等的耕地分类结果与本研究结果接近,ESA CCI-LC 产品中城乡建设用地与本研究接近。而刘纪远等的产品和ESA CCI-LC 产品中的植被和城乡建设用地都存在高估现象。刘纪远等的产品中的水域存在高估现象,ESA CCI-LC 产品中水

域存在低估现象。三者数据产品中的未利用地的 面积差异很大,难以判别哪个产品精度更高,这个 也是未来要重点研究的方向。

表 6 3种土地利用/覆被产品分类结果对比
Table 6 Comparison of classification accuracy between three land cover classification results

F 11		耕地	植被	水域	城乡建	未利
年份	土地利用/覆被产品				设用地	用地
	ESA CCI-LC <sup>[20]</sup>	28.26	64.14	2.84	1.33	3.43
1990	刘纪远等(%)[5,14-15]	38.98	51.21	6.63	2.54	0.64
	本研究(%)	38.86	47.48	5.21	0.72	7.73
	ESA CCI-LC <sup>[20]</sup>	28.02	64.26	2.88	1.56	3.28
2000	刘纪远等( $\%$ ) $^{[5,14-15]}$	38.69	51.19	6.74	2.74	0.64
	本研究(%)	41.26	51.31	5.13	1.23	1.07
	ESA CCI-LC <sup>[20]</sup>	27.53	64.27	2.98	1.95	3.27
2010	刘纪远等(%)[5,14-15]	37.63	51.09	7.22	3.5	0.56
	本研究(%)	39.14	47.92	7.15	1.81	3.98
	ESA CCI-LC <sup>[20]</sup>	26.71	64.18	3.13	2.99	2.99
2020	刘纪远等(%)[5,14-15]	36.75	50.55	7.24	4.87	0.59
	本研究(%)	45.44	41.37	7.35	2.68	3.16

长江中游城市群从1990年到2020年,城乡建 设用地面积占比由 0.73% 增加到 2.68%, 年均增幅 达 9.38%; 耕地面积占比由 38.83% 增加到 47.48%, 年均增幅达 0.58%。与长三角[18]、珠三 角[10]、京津冀[11-12]、环渤海[13]相比,长江中游城市群 的土地利用变化较大,这与文献[17]的研究结果一 致。例如,长三角地区1980~2020年期间,建设用 地面积年均增幅为4.35%,耕地面积年均减幅为 0.37%;珠三角地区1980~2006年建设用地年均增 幅为4.27%,耕地面积年均减幅为0.01%;京津冀地 区 1990~2020 年期间,建设用地面积年均增幅为 3.04%,耕地面积年均减幅为0.41%;环渤海地区 2000~2019年建设用地面积增幅达 4.63%;耕地面 积降低率达1.24%。研究区的建设用地变化最大且 变化速度最快,耕地次之,二者的相互转化也较为 明显。长三角地区、珠三角地区和环渤海地区建设 用地面积年均增幅基本一致,长三角地区和京津冀 地区耕地面积年均减幅基本一致,环渤海地区的耕 地面积降低率最大。长三角地区、珠三角地区发展 好于长江中游城市群,但是城乡建设用地的扩展速 度大于两者,说明长江中游城市群城市土地利用效 率相对较低,必须加大对国土空间开发格局的有效 管控,以集约利用城市存量土地为核心,提高城市 土地利用效率[21-22]。

最后,研究显示城市生态遥感在地理信息、自

然地理学、测绘学等学科占有越来越大的比重,城市生态遥感研究越来越强调遥感影像的分辨率,高空间和高光谱分辨率遥感影像将成为该领域的热门数据源,多源遥感数据协同反演城市生态也将成为该领域的发展趋势<sup>[23-24]</sup>。而在维度方面,城市生态遥感的研究逐渐由二维平面扩张转向三维增长空间分析<sup>[25]</sup>。

## 6 结 论

本研究以卫星遥感影像数据为基础,采用随机森林算法和野外调查方法按照城乡建设用地、水域、林地、耕地和其他用地的分类方法解译了1990~2020年长江中游城市群的土地利用变化数据,并量化了长江中游城市群的近30年间的土地利用格局演变过程,借助桑基图、核密度分析、空间聚集程度的方法,从土地利用类型的数量结构、重点地类空间集聚的角度揭示各时段土地转型分异特征,可以得到以下结论:

(1)2020年长江中游城市群主要由耕地、植被构成,面积占比在86%以上,呈现出四周耕地和植被、建设用地呈散团式镶嵌其中的空间格局。在时空演变过程中,长江中游城市群辐射带动了城市群区域发展,但也存在扩张速度仍未减缓,土地利用时空差异仍不断加剧,大量占用耕地、植被和未利用地等的行为仍未得到遏制,仍需要严格控制无序扩张占用耕地、植被和未利用地等用地的行为。

(2)近30年来,研究区土地利用数量结构和土地利用转移各异,其中,在数量结构上整体呈现城乡建设用地和耕地持续增加、植被和未利用地呈波动式减少、水域波动式微弱增加的发展趋势;在土地利用转移上,主要呈现出建设用地斑块遍地开花并伴随局部爆炸式扩张,植被流向耕地,未利用地流向植被和耕地的演变态势。

(3)重点针对建设用地和耕地开展土地利用空间集聚演变分析结果显示,土地利用程度的较热点、热点都在增加,极热点区总体逐渐减少,而较热点和热点呈增加的趋势,且全部位于武汉城市圈及其周围;土地利用程度较冷点总体上呈先减少后增加的趋势,且较冷点区由环长株潭城市群(湘潭市、萍乡市和株洲市)转向环鄱阳湖城市群(南昌市)。长江中游城市群建设用地和耕地空间集聚范围呈持续扩大态势,且集聚程度随集聚范围的扩张亦同步在加强,中等密度和较低密度区扩展区随着城市群的快速发展逐渐演变为热点区域。

#### 参考文献(References):

- [1] FANG Chuanglin, MAO Qizhi, NI Pengfei. Discussion on the scientific selection and development of China's urban agglomerations[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(4): 515-527.[方创琳,毛其智,倪鹏飞.中国城市群科学选择与分级发展的争鸣及探索[J]. 地理学报, 2015, 70(4): 515-527.]
- [2] LAWLER J J, LEWIS D J, NELSON E, et al. Projected land-use change impacts on ecosystem services in the United States [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111;7492 - 7497.
- [3] MOONEY H A, DURAIAPPAH A, LARIGAUDERIEE A. Evolution of natural and social science interactions in global change research programs [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110:3665-3672.
- [4] WULDER M A, WHITE J C, GOWARD S N, et al. Landsat continuity: Issues and opportunities for land cover monitoring[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112:955 - 969.
- [5] LIU Jiyuan, NING Jia, KUANG Wenhui, et al. Spatio-temporal patterns and characteristics of land-use change in China during 2010-2015[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(5): 789-802.[刘纪远,宁佳,匡文慧,等. 2010-2015年中国土地利用变化的时空格局与新特征[J]. 地理学报, 2018, 73(5): 789-802.]
- [6] LI Shanshan, LI Yangbing, WANG Mengmeng, et al. The evolution of land use structure in karst valley area based on microspace unit[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(4):908-924.[李珊珊,李阳兵,王萌萌,等.基于微空间单元的岩溶峡谷区土地利用结构演变[J]. 自然资源学报, 2020, 35(4):908-924.]
- [7] MA Caihong, REN Zhiyuan, LI Xiaoyan. Land use change flow and its spatial agglomeration in the loess platform region [J]. Acta Geographica Sinica, 2013,68(2):257 267.[马彩虹,任志远,李小燕.黄土台塬区土地利用转移流及空间集聚特征分析[J]. 地理学报, 2013,68(2):257 267.]
- [8] HU Xili, YI Yang, KANG Hongzhang, et al. Temporal and spatial variations of land use and the driving factors in the middle reaches of the Yangtze River in the past 25 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(6):1877-1886.[胡昕利,易扬,康宏樟,等.近25年长江中游地区土地利用时空变化格局与驱动因素[J].生态学报,2019,39(6):1877-1886.]
- [9] FU Tianmeng, ZHANG Li, CHEN Bowei, et al. Monitoring of land cover change based on Google Earth Engine Platform: A case study of Sulawesi Island [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(1):55-64.[付甜梦,张丽,陈博伟,等.基于GEE平台的海岛地表覆盖提取及变化监测——以苏拉威西岛为例[J].遥感技术与应用, 2021, 36(1):55-64.]
- [10] YE Changsheng, WANG Feng. Variations of land use and landscape pattern in Zhujiang River Delta[J]. Bulletin of Soil and Water Consevation, 2012, 32(1):238 243.[叶长盛, 王

- 枫.珠江三角洲地区土地利用和景观格局变化研究[J].水土保持通报,2012,32(1):238-243.]
- [11] JU Xinhui, GAU Xiao, LI Weifeng, *et al.* Effects of land use change on surface runoff in Beijing-Tianjin-Hubei urban agglomeration[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(4):1413-1423.[巨鑫慧,高肖,李伟峰,等.京津冀城市群土地利用变化对地表径流的影响[J]. 生态学报,2020,40(4):1413-1423.]
- [12] LI Xiaoyong, KUANG Wenhui. Spatio-temporal trajectories of urban land use change during 1980-2015 and future scenario simulation in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. Economic Geography, 2019, 39(3):187 194, 200.[李孝永, 匡文慧.京津冀 1980-2015 年城市土地利用变化时空轨迹及未来情景模拟[J]. 经济地理, 2019, 39(3):187 194, 200.]
- [13] YU Lili, SUN Lishuang, ZHANG Danhua, et al. Extraction of land-cover and wetland area in Bohai Rim region based on Google Earth Engine[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020,31(12):4091 4098.[于莉莉, 孙立双,张丹华,等.基于 Google Earth Engine 的环渤海地区土地覆盖分类[J].应用生态学报,2020,31(12):4091 4098.]
- [14] LIU J, KUANG W, ZHANG Z, et al. Spatiotemporal characteristics, patterns, and causes of land-use changes in China since the late 1980s [J]. Journal of Geographical Sciences, 2014,24:195-210.
- [15] LIU J, ZHANG Z, XU X, et al. Spatial patterns and driving forces of land use change in China during the early 21st century [J]. Journal of Geographical Sciences, 2010, 20:483–494.
- [16] XIE Zhengfeng, WANG Qian. Spatial autocorrelation analysis of land use intensity in Guangzhou City[J]. Tropical Geography, 2009, 29(2):129-133. [谢正峰,王倩.广州市土地利用程度的空间自相关分析[J]. 热带地理, 2009, 29(2):129-133.]
- [17] WANG Manman, ZHANF Hongyan, ZHANG Youguang, et al. Evolution analysis of land use pattern in the Changjiang River Delta coastal zone in recent 39 years [J]. Haiyang Xuebao, 2020, 42(11):142-154.[王曼曼,张宏艳,张有广,等.近39年长三角海岸带土地开发利用格局演变分析[J].海洋学报,2020,42(11):142-154.]
- [18] LIU D, CHEN N, ZHANG X, et al. Annual large-scale urban land mapping based on Landsat time series in Google Earth Engine and OpenStreetMap data: A case study in the middle Yangtze River basin[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2020, 159: 337–351.
- [19] WANG Kun, HE Qingyun, MEI Yujian, et al. Spatio-temporal evolution and driving mechanism of urban agglomeration construction land in the Middle Reaches of the Yangtze River [J]. Journal of Hunan University of Technology, 2022, 36(6): 79-89.[王坤,贺清云,梅子健,等.长江中游城市群建设用地的时空演变及驱动机制[J].湖南工业大学学报, 2022, 36(6): 79-89.]
- [20] ESA, 2019. ESA/CCI Viewer. http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/download.php.
- [21] LI Muchun, LI Boyan, WANG Yunchen. Research progress

- in urban land use change simulation over the past thirty years [J]. Journal of Ningxia University (Natural Science Edition), 2024, 45(1):87-96.[李沐春,李柏廷,王昀琛.近30a城市土地利用变化模拟研究进展[J].宁夏大学学报(自然科学版), 2024, 45(1):87-96.]
- [22] LI Muchun, LI Boyan, FENG Qi, et al. A new approach to land-use simulation that integrates macro- and microspatial characteristics: A case study of Wuhan, China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2024,34(10):2003-2027.
- [23] YIN Huimin, HU Xiujuan, YANG Lijuan, et al. Visualization analysis of the development and hot spots of urban ecological remote sensing research [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2024, 39(3):642-658.[尹慧敏, 胡秀娟, 杨立娟, 等. 城市生态遥感研究热点与发展趋势的可视化分析[J]. 遥

- 感技术与应用,2024,39(3):642-658.]
- [24] FAN Peiwei, HAO Mengmeng, JIANG Dong, et al. Land use dynamic monitoring in open-pit mining area based on high-resolution remote sensing image: A case study of Pingshuo mining area [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2023, 38(2):274-284[范沛薇,郝蒙蒙,江东,等.基于高分遥感影像的露天矿区土地利用动态监测——以平朔矿区为例[J].遥感技术与应用,2023,38(2):274-284.]
- [25] FANG Chen, XU Xin, XU Daili, et al. Evaluation of ecological protection importance in Wuhan Metropolitan Circle based on remote sensing and GIS technology [J]. Resources Environment and Engineering, 2024, 38(6):736-743[方臣,陈曦,徐玳笠,等.基于遥感与GIS技术的武汉都市圈生态保护重要性评价研究[J].资源环境与工程,2024,38(6):736-743.]

## Spatio-temporal Analysis of Land Use/Land Cover Pattern Changes in Triangle of Central China in the Past 30 Years

WANG Yunchen<sup>1,2,3,4,5</sup>, ZHOU Xiao<sup>1,2</sup>, WANG Penglong<sup>3</sup>, LI Boyan<sup>4</sup>, HAN Weixiao<sup>5</sup>, HOU Jinliang<sup>4</sup>

(1.Collaborative Innovation Center for Urbanization Construction of Anhui Province, Hefei 230009, China; 2.School of Computer Science and Technology, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi' an 710061, China;

3. Real Estate Registration Center of Shangluo City, Shangluo 726000, China; 4. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

5. School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

Abstract: Land use/cover change is an essential part of the frontier of global climate change and sustainable development. In this paper, based on Google Earth Engine (GEE) platform, we used Landsat remote sensing images of 1990, 2000, 2010, and 2020, combined with Random Forest (RF) algorithm and field survey to sequentially decode the four phases of land use/cover data in the order of build-up area, water, vegetation, farmland, and unused land and tracked the spatial and temporal patterns of land use/cover changes in the Triangle of Central China. The results show that ① In 2020, the Triangle of Central China will mainly be composed of farmland and vegetation, accounting for more than 86% of the area, with farmland and vegetation mainly distributed around the urban agglomeration, build-up area in a spatial pattern of scattered clusters mosaic; 20 Over the past 30 years, the quantitative structure of land use and land-use transfer in the study area have varied, with the land use structure showing an increased continuously in build-up area and farmland, a fluctuating increase trend of vegetation and unused land, and a weak increase trend of water; and 3 The results of the analysis of the evolution of spatial clustering of land use focusing on build-up area and farmland show that the hotter and hot spots of land use degree are increasing. In general, the extreme hot spot area is gradually decreasing, while the hotter sites are on the contrary, and the hot spots are growing in trend, and all of them located in and around Wuhan city circle. The study results lay the foundation for the research on the conservation and sustainable use of land resources in ecological urban agglomeration.

**Key words:** Google Earth Engine; Land use/cover change; Temporal and spatial characteristics; Random forest algorithm; Triangle of Central China