

“三生”用地格局演变的强度分析及其驱动力 ——以衡阳市为例

邓志位¹, 全斌^{1,2,3*}, 祁剑青², 彭科¹, 樊雪姣¹

(1. 衡阳师范学院 地理与旅游学院, 湖南 衡阳 421002; 2. 古村古镇文化遗产数字化传承湖南省协同创新中心, 湖南 衡阳 421002;
3. 联合国教科文组织国际自然与文化遗产空间技术中心衡阳分中心, 湖南 衡阳 421002)

摘要:【目的】分析衡阳市生态—生产—生活(“三生”)用地演变特征及其驱动因素,为该地区土地利用配置优化与可持续发展提供依据。【方法】通过结合变化成分和强度分析方法识别 1995~2020 年间衡阳市“三生”用地变化强度特征,并采用斑块生成土地利用模拟(PLUS)模型揭示该区“三生”用地变化驱动机制。【结果】生态用地和生产生态用地为研究区主要用地类型,其呈缩减趋势;“三生”用地变化成分呈现出数量为主转变成交换为主,且各类别变化成分差异明显;1995~2015 年“三生”用地变化强度低于 2015~2020 年,后期呈现更快速的变化;生活生产用地和生态生产用地变化活跃;1995~2020 年生活生产用地增加的主要来源于生态用地和生产生态用地,其转换强度表明生产生态用地稳定趋向转换为生活生产用地,相反,生态用地稳定避免转换为生活生产用地。【结论】衡阳市生活生产用地扩张强度持续上升,主要受交通基础设施建设因素驱动,致使大量生产、生态功能用地被侵占,该区未来应通过规划统筹与政策导向优化“三生”用地结构。

关键词:生态—生产—生活(“三生”)用地;土地利用变化;强度分析;PLUS 模型;驱动力;衡阳市

中图分类号: TP79,F301.24 **文献标识码:** A **文章编号:** 0564-3945(2023)04-0768-13

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2022061405

邓志位, 全斌, 祁剑青, 彭科, 樊雪姣. “三生”用地格局演变的强度分析及其驱动力——以衡阳市为例[J]. 土壤通报, 2023, 54(4): 768-780

DENG Zhi-wei, QUAN Bin, QI Jian-qing, PENG Ke, FAN Xue-jiao. Intensity Analysis and Driving Forces of Pattern Evolution in Productive-Living-Ecological Land: A Case Study of Hengyang City[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(4): 768-780

【研究意义】随着人口增加、经济蓬勃发展及城镇扩张,人类赖以生存的农用地与生态资源受到前所未有的挤压,土地多功能平衡日益受到学者和政府部门关注^[1]。土地作为人类活动的重要载体,其生产、生活和生态用地(简称“三生”用地)在城镇发展中如何调整优化值得深入研究^[2]。目前,优化“三生”用地配置已成为国土空间规划与土地可持续利用实施的重要基础^[3]。

【前人研究进展】自 2012 年国家提出“生产空间集约高效、生活空间宜居适度、生态空间山清水秀”的国土空间规划目标以来,许多学者从理论构建^[4-5]、识别提取方法^[6-8]、格局与过程^[9-10]以及生态

环境效应^[11-12]等方面对“三生”空间用地展开研究。分析“三生”用地演化特征能为清晰区域生态保护、粮食安全、经济发展之间关联提供科学依据。强度分析是由 Pontius Jr 等提出的一种层次分析方法,由间隔层、类别层和转换层组成,能够系统地剖析土地变化过程^[13-14]。该方法已在不同区域和尺度下开展土地变化研究,譬如流域^[15-16]、国家中心城市^[17]、省会城市^[18]以及区域比较^[19-20]等。Pontius Jr 将土地利用变化成分划分为三个部分:数量(净变化)、交换和移位(分配变化)^[21],随后提出变化成分强度将类别变化与总体变化相联系^[22]。数量变化是指地类的增加(转入)与减少(转出)的差值绝对量,此外,

收稿日期: 2022-06-14; 修订日期: 2022-08-22

基金项目: 衡阳市社会科学基金重点项目(2021B(I)004)、联合国教科文组织国际自然与文化遗产空间技术中心衡阳分中心开放基金项目(2021HSKFJJ029)、湖南省社会科学基金青年项目(19YBQ011)、湖南省教育厅青年项目(21B0636)和湖南省研究生科研创新项目(CX20221268)资助

作者简介: 邓志位(1999-),男,湖南衡阳人,在读硕士研究生,主要研究方向为遥感与地理信息系统应用。E-mail: dzw17673290352@aliyun.com

*通讯作者: E-mail: quanbin308@aliyun.com

交换和移位变化分别指两种地类和三种地类及以上在空间上发生的位置变化。相较于仅考虑监测期间地类数量变化,变化成分方法能够揭示类别变化差异更多的信息^[23-24]。

【本研究切入点】但是,目前从变化成分和多层次视角下研究“三生”用地的报道还尚不多见。衡阳市位于湘南地区,矿产资源丰富,属于南方红壤丘陵,是典型生态环境脆弱区。由于迅速的城镇化建设和长期不合理的山丘坡地资源开发,致使优质农用地和生态资源削减,粮食安全面临威胁,水土流失及生态环境遭受破坏^[25-27]。李涛等^[28]通过 InVEST 模型研究了衡阳市城区景观生态安全格局。胡最等^[29]基于元胞自动机构建了衡阳市城区扩张图谱,并分析了城区扩张特征,也有学者从社会经济数据出发,利用主成分分析对该区域土地开展生态安全评价^[30]。然而,在生态文明建设背景下,从“三生”功能视角对该区域开展土地变化研究仍然不足。随着省域副中心城市建设推进与中部地区崛起核心增长极的逐步形成,衡阳市担负着东南沿海地区制造业转移承接的功能,生产、生活和生态用地冲突日渐加剧。因此,迫切需要厘清衡阳市“三生”用地演变特征及其驱动因素。

【拟解决的问题】鉴于上述背景,本研究以衡阳市为研究对象,结合变化成分和强度分析方法研究 1995~2020 年“三生”用地时空演变过程及其特征,采用斑块生成土地利用模拟(PLUS)模型揭示空间要素对“三生”用地变化过程的影响,为后续当地“三生”用地配置优化和土地资源可持续发展提供参考依据。此外,该研究对我国南方红壤丘陵地区土地利用管理具有一定借鉴意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

衡阳市位于湖南省中南部,湘江中游,110°32'16"~113°16'32" E, 26°07'05"~27°28'24" N^[29]。研究区属于亚热带季风气候,年均气温约 18℃,年均降水量约 1352 mm,土地总面积约 15310 km²。其地势四周高、中间低,形成了“衡阳盆地”(图 1)。近几年,衡阳市国民经济保持较快增长,2020 年实现地区生产总值 3508 亿元,三次产业结构为 12.6:33.0:54.4,同时是湖南省人口第二大城市,2020 年末常住人口 664 万,城镇化率为 54.27%^[31]。

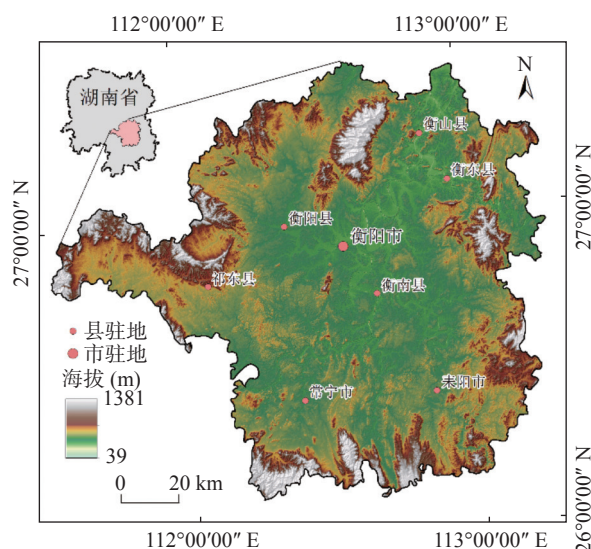


图 1 衡阳地理区位图

Fig.1 Location map of Hengyang

1.2 数据来源

土地利用、土壤类型、1 公里格网人口和 GDP、年均降水(2000~2015 年)与年均温度(2000~2015 年)数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)。土地利用数据时间为 1995、2005、2015、2020 年,空间分辨率 30 m,解译精度均在 85% 以上^[32-33]。区域行政边界、铁路与公路等交通基础设施、政府驻地数据来自国家基础地理信息中心的全国地理信息资源目录服务系统(<http://www.webmap.cn/>)。30 m 分辨率 DEM 数据来自地理空间数据云中 ASTER GDEM 数据产品(<http://www.gscloud.cn/>)。“三生”用地数据是基于土地利用数据进行“三生”功能归并制成。“三生”用地变化驱动空间要素集包含自然要素、空间区位及社会经济三个部分:高程、坡度、坡向、土壤类型、年均温度、年均降水;离铁路、高速公路、1 级道路、2 级道路、火车站、政府和水域距离的可达性区位因素;GDP、人口数据。

1.3 “三生”用地分类

随着土地自然、社会经济属性与人类生产生活的需要的相互影响,土地系统表现出多种功能,主要可划分为生产、生活和生态功能。不同的地理环境、利用方式以及利用对象促使土地多种功能表征出不同地位。张红旗等^[8]提出中国“三生”用地分类体系,其包涵生态用地、生态生产用地、生产生态用地和生活生产用地。本研究以该体系为基础,参考最新修订的《土地利用现状分类》,并根据研究

表 1 衡阳市“三生”用地分类体系
Table 1 Classification system for Productive-Living-Ecological (PLE) land in Hengyang City

“三生”用地 PLE land	含义 Description	现状类型 (编码) Status type (code)
生态用地	具有生态服务功能, 对生态系统调节和生物保护具有重要作用	有林地 (21)、灌木林 (22)、疏林地 (23)、其他林地 (24)、高覆盖度草地 (31)、中覆盖度草地 (32)、低覆盖度草地 (33)、盐碱地 (63)、裸土地 (65)
生态生产用地	具有生态系统调节与经济水产品生产的两重功能, 但相较于生产功能, 生态功能更为紧要	河渠 (41)、水库坑塘 (43)、滩地 (46)
生产生态用地	主要以提供粮食和经济作物产品生产为主要功能, 同时也具备生态功能	水田 (11)、旱地 (12)
生活生产用地	全部或部分被建筑物所覆盖, 为人类提供居住等生活功能和除农业生产以外的其他的生产用途	城镇用地 (51)、农村居民点 (52)、其他建设用 地 (53)

区实地调查和前人研究成果^[34-36], 构建衡阳市“三生”用地分类体系, 见表 1。

1.4 研究方法

1.4.1 转移矩阵 利用转移矩阵能分析区域内各土地利用类别在空间上的相互转换, 从而凸显不同类别间变化的规模数量^[37]。该方法可类似看成表格, 对

角线上的元素代表不同地类的不变区域。而非对角线上的元素, 从行的视角看能表示某种地类的减少 (转出), 也可从列的视角看能代表某种地类的增加 (转入), 详见表 2。基于 ArcGIS 10.8 的叠加分析工具, 可计算分析得到两个时间点间的类别转移矩阵。

表 2 初始时间到结束时间的土地转移矩阵
Table 2 Land transition matrix from the initial time to the end time

初始时间 Initial time	结束时间 End time				总面积 Gross size	减少 Loss
	地类1 Category 1	地类2 Category 2	地类3 Category 3	地类4 Category 4		
地类1	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}	$\sum_{j=1}^{J=4} C_{1j}$	$(\sum_{j=1}^{J=4} C_{1j}) - C_{11}$
地类2	C_{21}	C_{22}	C_{23}	C_{24}	$\sum_{j=1}^{J=4} C_{2j}$	$(\sum_{j=1}^{J=4} C_{2j}) - C_{22}$
地类3	C_{31}	C_{32}	C_{33}	C_{34}	$\sum_{j=1}^{J=4} C_{3j}$	$(\sum_{j=1}^{J=4} C_{3j}) - C_{33}$
地类4	C_{41}	C_{42}	C_{43}	C_{44}	$\sum_{j=1}^{J=4} C_{4j}$	$(\sum_{j=1}^{J=4} C_{4j}) - C_{44}$
总面积	$\sum_{i=1}^{J=4} C_{i1}$	$\sum_{i=1}^{J=4} C_{i2}$	$\sum_{i=1}^{J=4} C_{i3}$	$\sum_{i=1}^{J=4} C_{i4}$	$\sum_{i=1}^{J=4} (\sum_{j=1}^{J=4} C_{ij})$	
增加	$(\sum_{i=1}^{J=4} C_{i1}) - C_{11}$	$(\sum_{i=1}^{J=4} C_{i2}) - C_{22}$	$(\sum_{i=1}^{J=4} C_{i3}) - C_{33}$	$(\sum_{i=1}^{J=4} C_{i4}) - C_{44}$		

注: 地类1—生态用地, 地类2—生态生产用地, 地类3—生产生态用地, 地类4—生活生产用地。

1.4.2 变化成分分析 通过深度挖掘转移矩阵信息, 变化成分能明晰类别变化的不同成分: 数量 (Quantity)、交换 (Exchange)、移位 (Shift)^[21]。该方法从比重的角度计算变化成分强度, 进而将总体与地类变化相联系^[22]。类别的总体变化、数量变化、交换变化和移位变化计算分别见公式 (1) ~ 公式 (4)^[22]。

$$q_{ij} = \left| \sum_{i=1}^J (C_{iij} - C_{iji}) \right| \quad (1)$$

$$e_{ij} = 2 \left\{ \left[\sum_{i=1}^J \text{Minimum}(C_{iij}, C_{iji}) \right] - C_{ijj} \right\} \quad (2)$$

$$s_{ij} = d_{ij} - q_{ij} - e_{ij} \quad (3)$$

$$d_{ij} = \left[\sum_{i=1}^J (C_{iij} + C_{iji}) \right] - 2C_{ijj} \quad (4)$$

式中, t 为 $[Y_t, Y_{t+1}]$ 时期最初时间点的索引, 范围是 1 到 $T-1$; T 为时间点个数; Y_t 是 t 时间点的年份; J 为地类数量; i 为某一时期最初时间的一个地类, j 为某一时期最终时间点的一个地类; C_{ij} 表示在 $[Y_t, Y_{t+1}]$ 时期中从 i 类别转移到 j 类别的面积; C_{ji} 表示

在 $[Y_t, Y_{t+1}]$ 时期中从 j 类别转移到 i 类别的面积。上述符号含义下同。

公式 (5) ~ 公式 (8) 分别计算了在 $[Y_t, Y_{t+1}]$ 时期下, 总体变化、数量变化、交换变化和移位变化^[22]。

$$D_t = \sum_{j=1}^J \frac{d_{tj}}{2} \quad (5)$$

$$Q_t = \sum_{j=1}^J \frac{q_{tj}}{2} \quad (6)$$

$$E_t = \sum_{j=1}^J \frac{e_{tj}}{2} \quad (7)$$

$$S_t = \sum_{j=1}^J \frac{s_{tj}}{2} = D_t - Q_t - E_t \quad (8)$$

上述公式分别定义了用地类型与某一时期的总体变化及其各变化成分。该方法将类别的数量变化成分占该类别总体变化的比重作为类别的数量变化强度 (q'_{tj}), 其中交换变化强度 (e'_{tj}) 与移位变化强度 (s'_{tj}) 计算与该步骤类似; 同理在时间间隔 $[Y_t, Y_{t+1}]$ 下, 可分别计算得到总体的数量变化强度 (Q'_t)、交换变化强度 (E'_t)、移位变化强度 (S'_t), 计算见公式 (9) ~ 公式 (14)^[22]。

$$q'_{tj} = 100\% q_{tj} / d_{tj} \quad (9)$$

$$e'_{tj} = 100\% e_{tj} / d_{tj} \quad (10)$$

$$s'_{tj} = 100\% \frac{s_{tj}}{d_{tj}} = 1 - q'_{tj} - e'_{tj} \quad (11)$$

$$Q'_t = 100\% Q_t / D_t \quad (12)$$

$$E'_t = 100\% E_t / D_t \quad (13)$$

$$S'_t = 100\% \frac{S_t}{D_t} = 1 - Q'_t - E'_t \quad (14)$$

1.4.3 强度分析 强度分析方法以转移矩阵为基础, 由自上而下的间隔层、类别层和转换层构成^[20,38]。其间隔层也被称为“时间间隔层”, 用于分析哪一时间间隔 (时期) 土地利用变化是相对快速或缓慢的。用地类别层次是进一步解析某一时间间隔下哪些类别的增加 (转入) 和减少 (转出) 是相对活跃或沉寂的, 而用地转换层次则更深入地剖析其他地类转换为某一特定地类是趋向或避免的。本研究采用该方法分析“三生”用地变化强度特征。

时间间隔层次是研究不同时期下的总体变化差异, 计算不同时期的总体变化强度 X_t 以及整个研究期间的均衡变化强度 U , 计算分别见公式 (15) 和公式 (16)^[13]。通过比较 X_t 与 U 的大小判断不同时期

期间总体变化快慢。若 $X_t > U$, 判断在 $[Y_t, Y_{t+1}]$ 时期的变化是快速的; 若 $X_t < U$, 判断在 $[Y_t, Y_{t+1}]$ 时期的变化是缓慢的。

$$X_t = \frac{\sum_{j=1}^J \left[\left(\sum_{i=1}^J C_{tij} \right) - C_{tjj} \right] 100\%}{(Y_{t+1} - Y_t) \sum_{i=1}^J \sum_{j=1}^J C_{tij}} \quad (15)$$

$$U = \frac{\sum_{t=1}^{T-1} \left\{ \sum_{j=1}^J \left[\left(\sum_{i=1}^J C_{tij} \right) - C_{tjj} \right] \right\} 100\%}{(Y_{t+1} - Y_t) \left[\sum_{i=1}^J \sum_{j=1}^J C_{tij} \right]} \quad (16)$$

用地类别层次研究各地类变化的差异, 计算地类的年均减少强度 L_{ti} 和年均增加强度 G_{tj} 。通过比较 L_{ti} 、 G_{tj} 和 X_t 的大小判断地类的增加、减少是活跃或沉寂的, 计算见公式 (17) 和公式 (18)^[13]。若 $G_{tj} > X_t$, 判断 j 类别的增加是活跃的; 若 $G_{tj} < X_t$, 判断 j 类别的增加是沉寂的; 对地类减少的判断亦同。

$$G_{tj} = \frac{\left[\left(\sum_{i=1}^J C_{tij} \right) - C_{tjj} \right] 100\%}{(Y_{t+1} - Y_t) \sum_{i=1}^J C_{tij}} \quad (17)$$

$$L_{ti} = \frac{\left[\left(\sum_{j=1}^J C_{tij} \right) - C_{tii} \right] 100\%}{(Y_{t+1} - Y_t) \sum_{j=1}^J C_{tij}} \quad (18)$$

用地转换层次研究其他地类转换为某一地类时的转换差异, 计算其他地类转换为某一地类的强度 R_{tin} 以及其他地类转换为该地类的均衡转换强度 W_m , 计算见公式 (19) 和公式 (20)^[13]。若 $R_{tin} > W_m$, 判断地类 i 趋向转换为地类 n , 换言之, 地类 n 是趋向从一种地类 i 处获得增加; 同理, 若 $R_{tin} < W_m$, 判断地类 i 避免转换为地类 n 。在该层次中, 本研究的地类 n 选取了生产生态用地、生活生产用地。

$$R_{tin} = \frac{C_{tin} / (Y_{t+1} - Y_t)}{\sum_{j=1}^J C_{tij}} 100\% \quad (19)$$

$$W_m = \frac{\left[\left(\sum_{i=1}^J C_{tin} \right) - C_{mn} \right] / (Y_{t+1} - Y_t)}{\sum_{j=1}^J \left[\left(\sum_{i=1}^J C_{tij} \right) - C_{mj} \right]} 100\% \quad (20)$$

1.4.4 基于 PLUS 模型的驱动分析 本研究选取 PLUS 模型用于分析 1995 ~ 2020 年衡阳市“三生”用地变化驱动力。在 PLUS 模型中, 用地扩张分析策略 (LEAS) 模块以随机森林分类 (RFC) 算法为核心, 挖掘每一用地类型扩张与多驱动因子之间的非线性关系, 且计算出不同驱动因子对地类变化的贡献度^[39]。

RFC 算法作为一种机器学习方法, 通过从原始训练数据集中抽取随机样本的每个子数据, 从而集中构建的基于决策树的集成分类器, 能够处理数据变量间的多重共线性问题, 并最终得出用地类型 k 在像元 i 上的适宜性概率 $P_{i,k}^d(x)$, 见公式 (21) [40]。

$$P_{i,k}^d(x) = \frac{\sum_{n=1}^M I = \{h_n(x) = d\}}{M} \quad (21)$$

式中, d 为二值变量, 取 0 或 1; 当 d 为 1 时, 表明存在其他用地转换为用地类型 k ; 当 d 为 0 时, 表明存在其余转换; x 为多驱动因子组成的向量; i 是决策树的指示函数; $h_n(x)$ 为第 n 决策树向量 x 的预测用地类型; M 是决策树总个数。

2 结果与分析

2.1 “三生”用地结构分析

图 2 显示衡阳市“三生”用地结构及其空间格局。从图 2 可见, 衡阳盆地内部多以生产生态用地分布, 外围分布以生态用地为主, “三生”用地主要类型为

生态用地与生产生态用地, 两者共占比超 90%。这表明衡阳市生态资源分布广泛。生活生产用地面积持续上升最为明显, 占比从 1995 年的 1.6% 增加到 2020 年 3.6%; 生态用地面积不断减少, 占比从 1995 年的 57.9% 减少为 2020 年 56.9%。从图 2 中区域 1 可见, 该区域主要涵盖衡阳主城区, 其生活生产用地向四周迅速扩张。这表明尽管生产生态用地比重小, 但其数量增长是该区内最明显的特征。

2.2 “三生”用地变化强度分析

2.2.1 时间间隔层次 图 3 显示时间间隔层次的强度分析结果。图 3 纵轴表示不同时期的年均变化强度 X_t , 黑色虚线表示研究区 1995~2020 年两个时期的变化均衡强度 U 。若 X_t 高于均衡线表示快速的, 反之即缓慢的。从图 3 可见, 过去 25 年间, 衡阳市“三生”用地变化强度呈现明显增长, 1995~2015 年变化是相对缓慢的, 2015~2020 年是相对快速的。相较于 1995~2015 年间变化成分, 2015~2020 年数量、交换变化增大, 其交换变化涨幅最为显著, 移位变化差异并不明显。

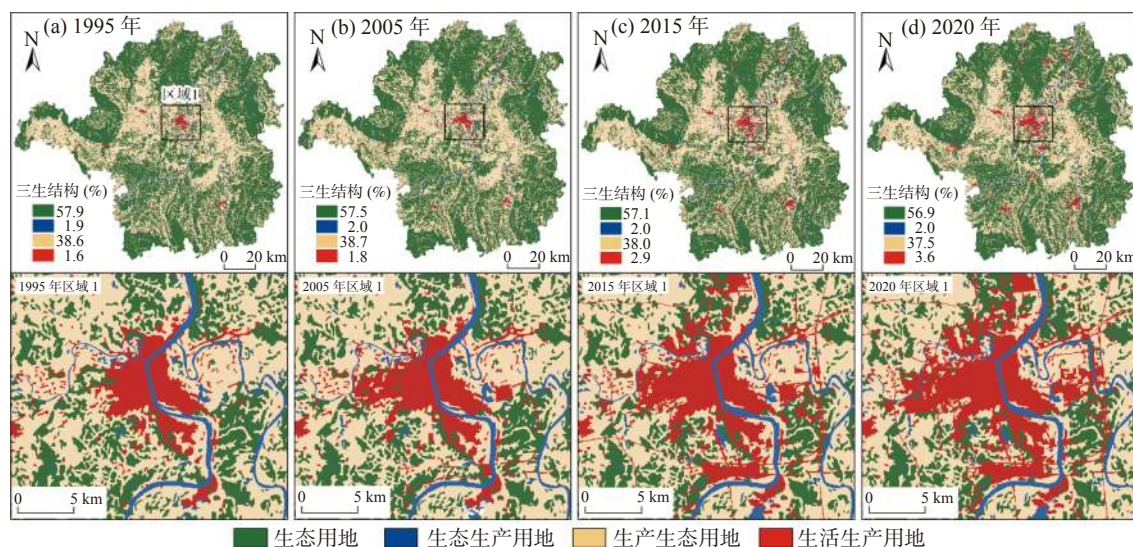


图 2 衡阳市“三生”用地格局及其变化
Fig.2 Pattern and change of PLE land in Hengyang City

2.2.2 用地类别层次 图 4 显示用地类别层次的强度分析结果。黑色虚线表示各时期年均变化强度 X_t , 若右侧某一地类变化强度大于均衡线, 则表示该类变化是活跃的, 反之即沉寂的。从图 4 左侧年均变化面积看, 除生态生产用地面积变化外, 其他用地变化面积在 1995~2020 年间均有明显上涨。从图 4 右侧年均变化强度看, 在 1995~2020 年间, 生活生

产用地与生态生产用地的增加和减少都表现为活跃的。与之相反, 生态用地的增加与减少表现为沉寂的。从时间尺度看, 生活生产用地和生态生产变化表现活跃具有稳定性特征, 生态用地变化表现沉寂也具有稳定性特征。

由于类别自身规模致使难以比较各类别变化成分。因此, 通过变化成分占总变化比重构建变化成

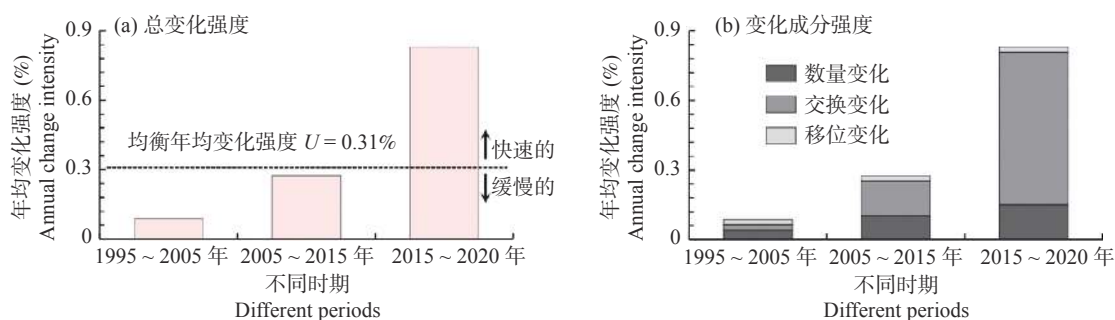


图3 1995~2020年衡阳市时间间隔层次“三生”用地年均变化强度

Fig.3 Annual change intensity of PLE land at time interval level in Hengyang City from 1995 to 2020

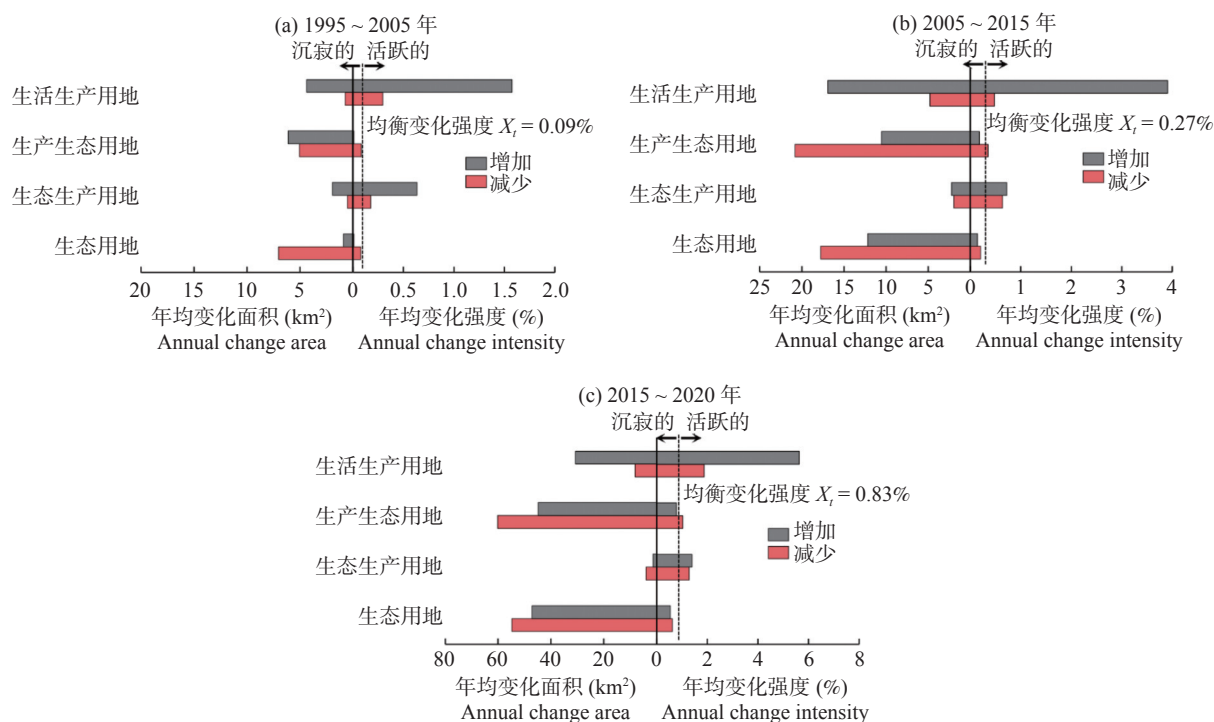


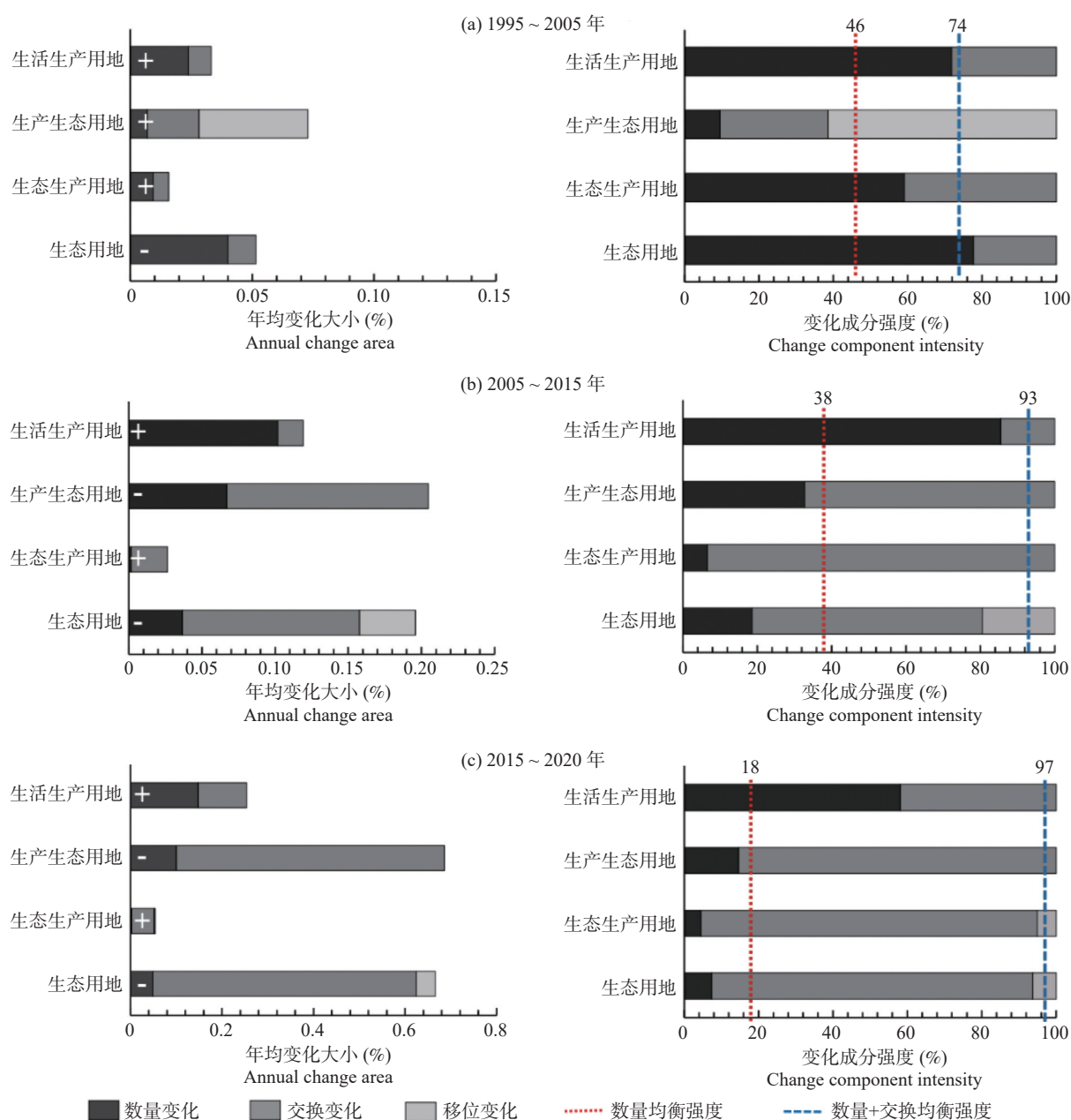
图4 1995~2020年衡阳市用地类别层次三生用地年均变化强度

Fig.4 Annual change intensity of PLE land at category level in Hengyang City from 1995 to 2020

分强度能解决此问题。衡阳市不同时期各地类变化成分大小与强度结果见图5。图5红色虚线代表总体数量变化强度，蓝色虚线代表总体数量与交换的强度总和。若减去总体数量与总体交换变化的强度之和，即总体移位变化强度。从图5可见，1995~2005年、2005~2015年、2015~2020年的总体数量变化强度分别为46%、38%、18%，其总体交换变化强度分别为28%、55%、79%。在1995~2005年间（图5a），生产生态用地的数量成分远小于数量均衡强度，故该地类数量成分相较于总体数量成分的强烈程度较低。在2005~2015年间（图5b），除生活生产用地依然以数量变化为主外，其余三种地类以交换为主，并且该特征在2015~2020年间（图5c）得到延续，进一步说明在该时期其余地类之间发生

交换更为强烈。耕地“占补平衡”政策实施就是要控制耕地数量变化，但水田等生产生态用地面临着区域经济发展与城镇化的压力。这意味生产生态用地在城镇郊区的损失就必定在更加远离城镇的空间得到补偿。

2.2.3 用地转换层次 图6显示用地转换层次下其他地类转入生产生态用地的转换强度分析结果，其中黑色虚线表示其他用地转换为生产生态用地的均衡强度 R_{in} ，若右侧某一地类转化为生产生态用地的转换强度大于均衡线，则表示该地类趋向转化为生产生态用地，反之即避免。从图6左侧年均转换面积可见，在1995~2020年间，生产生态用地的增加最大来源均为生态用地，且生态用地的贡献远大于其他两种地类的贡献，其他用地对生产生态用地的



注:图中“+”表示净增加;“-”表示净减少;年均变化大小指该变化占研究区面积的比重,年均变化强度指各变化成分占总变化的比重。

图 5 衡阳市不同时期各地类变化成分分析

Fig.5 Change component analysis of category at different periods in Hengyang City

增加贡献均有上升,又以生态用地上升最为显著。从图 6 右侧年均转换强度可见,其他用地转换为生产生态用地的强度均有上升。在 1995~2005、2015~2020 年间,生活生产用地转换为生产生态用地的强度最大,但在 2005~2015 年间生态生产用地转换强度成为最大。在时间上,生态生产用地和生活生产用地趋向转换为生产生态用地表现为稳定的,生态用地避免转换为生产生态用地是稳定的。这进一步说明,尽管一种地类转化为另一种地类的规模大,但其转换强度可能是小的,且表现为避免的特征。

图 7 显示用地转换层次下其他地类转入生活生产用地的转换强度分析结果,其中黑色虚线表示其他用地转换为生活生产用地的均衡强度 R_{lin} 。从图 7 左侧转换面积可见,在 1995~2020 年间,生产生态用地的增加面积主要来源为生态用地和生产生态用地,除生态生产用地外,其余地类转入生活生产用地面积均有所上升。究其原因,在于衡阳市这一时期社会经济保持迅速发展,人口逐渐集聚,需要大量生活和生产用地来承载和维持人类活动。从图 7 右侧转换强度可见,在三个时期中,仅有生产生态

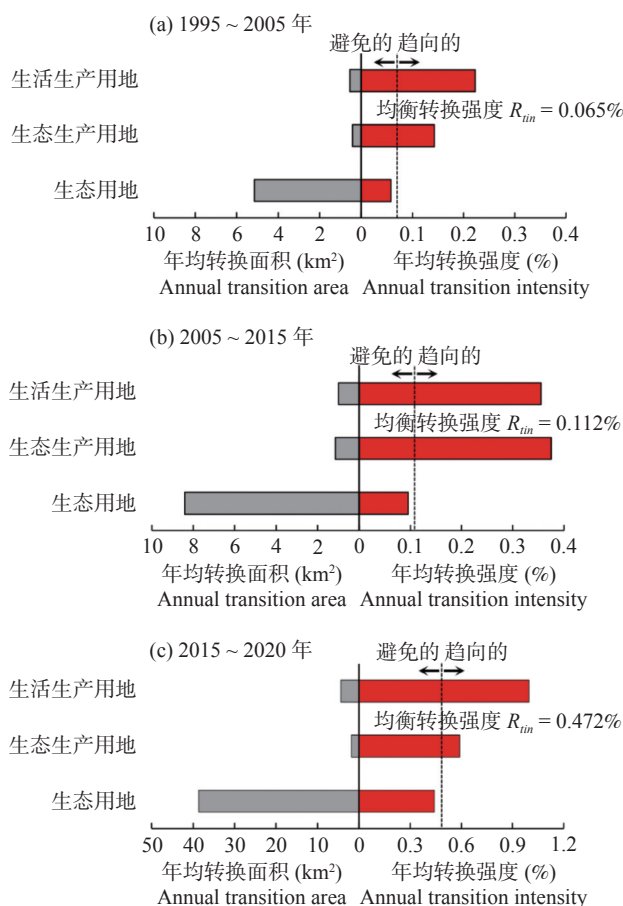


图6 1995~2020年衡阳市用地转换层次下其他用地转换为生产生态用地的面积和强度

Fig.6 Annual transition's size and intensity from other categories to productive-ecological land in Hengyang City from 1995 to 2020

用地稳定地趋向转换为生活生产用地。尽管生产生态用地、生态用地转换为生活生产用地的面积均为较大,但其转换强度存在差异,前者是避免的,后者却是趋向的。这可能与生活生产用地对农用地和生态用地的扩张机制差异有关。因为相较于农业生产用地而言,具备生态功能的林地和草地等的开发难度大,成本更高。图7右侧转换强度的差异较好地解释了生态用地转换为生活生产用地面积大的原因在于其初始面积大。

2.3 驱动力分析

本研究从自然环境、空间区位和人口经济方面选取15个空间要素作为驱动因子。基于PLUS模型LEAS模块,将1995、2020年衡阳市“三生”用地数据和空间驱动要素作为输入,设置按类别比例随机采样、采样率为0.01、决策树数目为20、随机森林训练特征个数为15等参数,进而分析得到各驱动因子对衡阳市“三生”用地类型变化的贡献程度(图8)。

从图8a可见,生态用地变化的影响因素主要是离1~2级道路、水域、铁路距离。从生态用地转入

生活生产用地(图7b)来看,生态用地年均贡献规模较大。这表明生活生产用地侵占生态用地面积最大。据统计^[41],2010~2020年全市公路里程新增约1047 km。因此,生态用地减少可能主要受交通基础设施建设的影响。从图8b可见,离水域距离和海拔对生态生产用地影响最大。该用地类型主要由河流、坑塘等水域构成,其变化受地形自然因素更大。从图8c可见,离铁路距离和年均降水因子对生产生态用地影响较大,但除年均降水以外的自然条件贡献程度排序相对靠后,表明相较与自然因素,空间区位可达性对生产生态用地影响更大。随着中部崛起战略的推动,在符合耕地“占补平衡”及生态保护要求下,城镇基础设施的不断推进依然是衡阳市发展的内在需求。因此,分析生产生态用地与生态用地缩减的驱动因素实质上也可相似反映出生活生产用地增加的原因。从图8d可见,对生活生产用地影响较大主要以交通可达性为主,是因为城镇用地、农村居民点等生活生产用地通常更倾向沿道路两侧扩张,这与研究区实际状况大致相符。

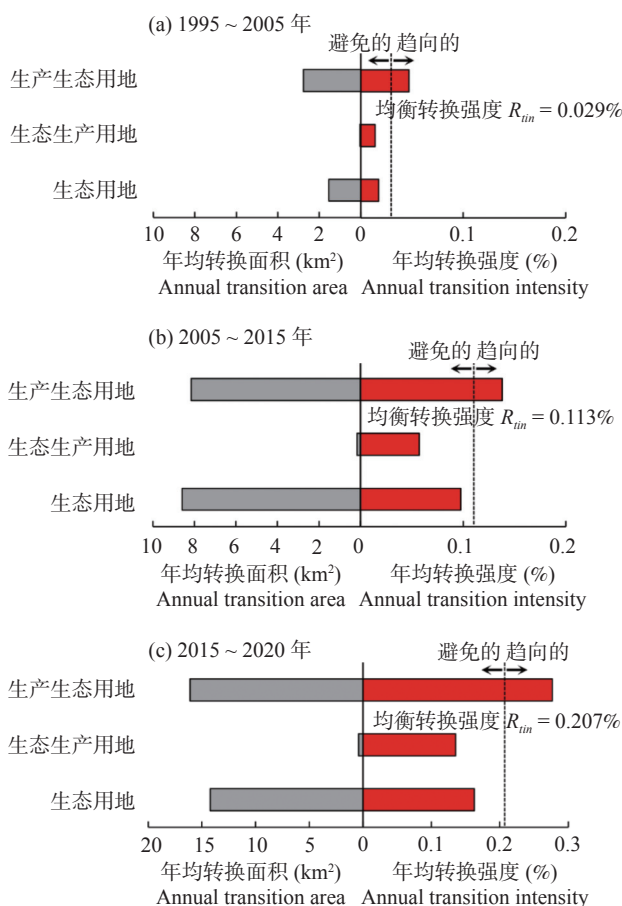


图 7 1995 ~ 2020 年衡阳市用地转换层次下其他用地转换为生活生产用地的面积和强度

Fig.7 Annual transition's size and intensity from other categories to living-productive land in Hengyang City from 1995 to 2020

3 讨论

3.1 衡阳市“三生”用地变化分析

本研究结合变化成分与强度分析方法剖析了衡阳市近 25 a“三生”用地变化强度特征,并利用 PLUS 模型分析“三生”用地变化的驱动机制。通过挖掘矩阵中蕴含的地类变化成分信息,2005 ~ 2020 年间生态用地和生产生态用地主要以交换变化为主,而生活生产用地主要以数量变化(净增加)为主。若只观察数量变化值则难以发现生态用地和生产生态用地潜在的空间不稳定性。相较于只考虑数量变化的方法,变化成分中的交换、移位成分能刻画更多的地类空间转移信息^[23,42]。Zhang 等^[26]基于结构统计与转移矩阵分析了衡阳市 2010 ~ 2018 年土地利用变化特征,结果表明其他用地转向为建设用地大于林地、草地等生态用地。从转换规模看,本研究取得了同样相似的转换规律。尽管从林地与耕地数量结构变化差异并不显著,但该研究忽视了矩阵中林地与草地、林地与耕地庞大的交换成分信息。交换

与移位变化信息表明某一景观类型在某一区域的减少但在另一区域获得增加,对监测耕地的转入与转出具有参考价值。当前,生活生产空间的适当蔓延依然是欠发达区域经济发展的内在需求,然其增长又需符合生态文明建设与粮食安全保障的要求。对于生产生态用地,本研究反映了衡阳市严格执行耕地异地“占补平衡”政策以来,生产生态用地与其他地类在空间上重分配以实现增加。

3.2 变化成分与强度分析的潜在应用

从数据本身考虑,交换与移位变化能表征潜藏在土地利用遥感制图过程中的数据误差^[21]。通常解译影像后,可计算得到混淆矩阵以表达数据监督解译中的分类误差^[43]。故基于变化成分分析框架,可计算混淆矩阵中误差成分:数量、交换与移位。若林地与草地的交换成分非常大,在定量监测地类变化时,可将其合并为“林草地”类别,从而能消除林地与草地之间在分类时带来的误差,为区分遥感制图误差提供新的视角。

不同土地类别间的转换信息的比较是开展土地

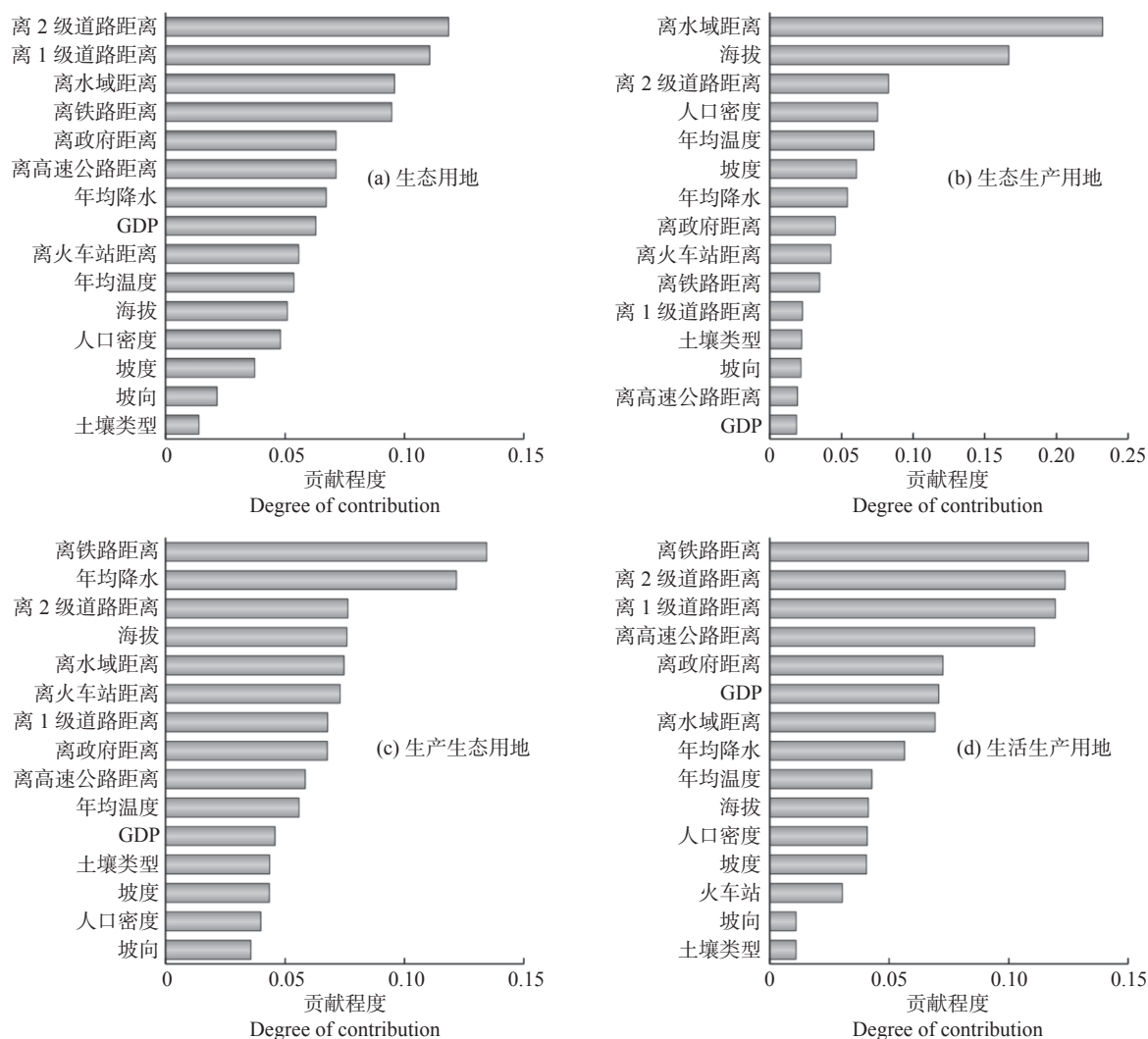


图8 1995~2020年间衡阳市“三生”用地变化的驱动因子贡献程度

Fig.8 The importance of the contribution of each driving factor to the change of PLE land's category in Hengyang from 1995 to 2020

利用/覆被变化研究的基础^[17]。地类之间转换的规模大小通常被作为反映区域土地变化剧烈的信号或主要特征。徐睿择等^[44]利用转换矩阵分析了郑州市土地利用流向特征,发现流向建设用地的规模耕地>草地>未利用地。若根据强度分析,研究则会得到流向建设用地的强度未利用地>耕地>草地。若仅依托转换规模判断地类变化剧烈程度是不当的,因为与变化规模相比,比重(强度)发生变化会更易引起生态系统功能发生质性且不可逆的改变。从发生概率看,规模更大的地类扩张或被占用的概率更大,致使无法以转换规模作为直接依据推断地类变化剧烈与否。基于变化比率计算强度,强度分析能够量化和阐明为什么地类*i*转化为地类*j*的规模大于其他地类转化为地类*j*的规模,并辨析两大原因:其一,如果在初始时间点地类*i*的面积大于其他地类,

那么自然拥有更多面积用于转换成*j*。倘若地类*j*只以均衡转换强度从其他地类获得转换土地时,地类*j*也会从地类*i*获得更多的面积转换;其二,地类*j*从地类*i*处获得转换面积,相比从其他地类处拥有更大的强度来获得转换土地。有时这两种情况是同时存在的。相较于直接利用转移矩阵分析不同地类转换的面积信息,强度分析方法会关注以下信息:转换过程中来源地类的初始面积;各层次中均衡强度,如 U_i 、 X_i 、 R_{im} ;某一类别的转换强度和均衡转换强度之间的偏离(差值)。综上,该方法从比重(比率)出发,系统地计算各层次下变化强度,为土地利用变化监测及其定量化表达带来新的思路和途径。

3.3 对策及建议

根据《湖南省衡阳市土地利用总体规划(2006~2020年)》,衡阳市规划期间应严格保护耕地、加

强基本农田建设、强化生态公益林保护以及开展工矿废弃地复垦工程等。但从研究结果看,相较于1995~2005年间,2005~2020年间生产生态用地表现出更大的缩减,这与研究期间(2005~2020年)的交通基础设施大力发展与建设有关。因此,衡阳市未来应以新一轮国土空间规划为契机采取综合措施,切实促进合理开发、降低用地冲突风险、优化空间配置。首先应通过规划统筹与政策引导,严格控制生活生产用地规模,优化空间布局,提高用地存量的节约集约利用水平;其次要依据“占补平衡”政策,强化对非农地占用水田等生产生态用地的控制,以数量和质量双重考核水田、旱地等农用地“占补平衡”,加强基本保护农田的质量建设;最后须重视城镇扩张对城乡景观格局变化的影响,协调土地开发利用与生态建设,注重湘江干支流的水域湿地保护,划定湿地保护蓝线,确保水资源安全。本研究充分挖掘了衡阳市“三生”用地变化数值信息及其驱动因素,可为该区后续“三生”用地调控和土地资源规划与管理提供借鉴。

4 结论

(1)从用地结构看,衡阳市生态用地和生产生态用地呈缩减趋势,并为主要用地类型。衡阳市1995~2005年“三生”用地主要以数量变化为主,2015~2020年“三生”用地主要以交换变化为主,并且各类别变化成分差异明显。

(2)在时间间隔层次上,衡阳市1995~2020年三个时期的“三生”用地变化强度呈现持续上升,表明后期(2015~2020年)受到社会经济的影响更大,土地发生更快速的变化。在用地类别层次上,生态用地减少和生活生产用地增加的数量是庞大的,但其变化强度存在差异,前者是稳定沉寂的,后者是稳定活跃的。

(3)在用地转换层次上,生产生态用地的增加主要来源于生态用地。生活生产用地的增加主要来源于生态用地和生产生活用地,该转换过程主要受交通基础设施建设因素驱动。在用地转换强度上,生态生产用地和生活生产用地趋向转换为生产生态用地;生产生态用地趋向转换为生活生产用地。未来该区应通过规划统筹与政策引导,优化生活生产用地配置,严格落实耕地“占补平衡”的质与量,降低生态安全格局风险。

致谢 衷心感谢匿名专家在论文评审中付出的时间和精力,评审专家对本文逻辑结构完善、讨论优化等方面给予的宝贵意见与建议,使本文获益匪浅;以及感谢美国克拉克大学 Robert Gilmore Pontius Jr 教授给予有关指导与技术支持。

参考文献:

- [1] 刘超,许月卿,孙丕苓,等.土地利用多功能性研究进展与展望[J].地理科学进展,2016,35(9):1087-1099.
- [2] 汪阳红,卢伟.优化城市群生产生态空间结构的总体思路[J].中国发展观察,2014,10(1):29-30.
- [3] 黄金川,林浩曦,漆潇潇.面向国土空间优化的三生空间研究进展[J].地理科学进展,2017,36(3):378-391.
- [4] 邹利林,王建英,胡学东.中国县级“三生用地”分类体系的理论构建与实证分析[J].中国土地科学,2018,32(4):59-66.
- [5] 刘燕.论“三生空间”的逻辑结构、制衡机制和发展原则[J].湖北社会科学,2016,30(3):5-9.
- [6] 刘继来,刘彦随,李裕瑞.中国“三生空间”分类评价与时空格局分析[J].地理学报,2017,72(7):1290-1304.
- [7] 李广东,方创琳.城市生态—生产—生活空间功能定量识别与分析[J].地理学报,2016,71(1):49-65.
- [8] 张红旗,许尔琪,朱会议.中国“三生用地”分类及其空间格局[J].资源科学,2015,37(7):1332-1338.
- [9] 崔家兴,顾江,孙建伟,等.湖北省三生空间格局演化特征分析[J].中国土地科学,2018,32(8):67-73.
- [10] 王考,姚云峰,包金兰.县级尺度“三生”用地动态变化及其空间集聚特征[J].水土保持通报,2018,38(1):306-312,329.
- [11] 龚亚男,韩书成,时晓标,等.广东省“三生空间”用地转型的时空演变及其生态环境效应[J].水土保持研究,2020,27(3):203-209.
- [12] 翟玉鑫,张飞云,马丽娜.近40年新疆三生用地转型及其生态环境效应演变[J].土壤通报,2022,53(3):514-523.
- [13] Aldwaik S Z, Pontius Jr R G. Intensity analysis to unify measurements of size and stationarity of land changes by interval, category, and transition[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2012, 106(1): 103-114.
- [14] Pontius Jr R G. Metrics That Make a Difference[M]. Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2022.
- [15] Huang J, Pontius Jr R G, Li Q, et al. Use of intensity analysis to link patterns with processes of land change from 1986 to 2007 in a coastal watershed of southeast China[J]. *Applied Geography*, 2012, 34: 371-384.
- [16] 王颖慧,丁建丽,李晓航,等.伊犁河流域LUCC对生态系统服务价值的影响——基于强度分析模型[J].生态学报,2022,42(8):1-13.
- [17] 杨建新,龚健,高静,等.国家中心城市土地利用变化稳定性和系统性特征——以武汉市为例[J].资源科学,2019,41(4):701-716.
- [18] 孙云华,郭涛,崔希民.昆明市土地利用变化的强度分析与稳

- 定性研究[J]. 地理科学进展, 2016, 35(2): 245 – 254.
- [19] Quan B, Ren H, Pontius Jr R G, et al. Quantifying spatiotemporal patterns concerning land change in Changsha, China[J]. *Landscape and Ecological Engineering*, 2018, 14(2): 257 – 267.
- [20] Quan B, Pontius Jr R G, Song H. Intensity Analysis to communicate land change during three time intervals in two regions of Quanzhou City, China[J]. *GIScience & Remote Sensing*, 2020, 57(1): 21 – 36.
- [21] Pontius Jr R G, Santacruz A. Quantity, exchange, and shift components of difference in a square contingency table[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, 35(21): 7543 – 7554.
- [22] Pontius Jr R G. Component intensities to relate difference by category with difference overall[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019, 77: 94 – 99.
- [23] Asenso Barnieh B, Jia L, Menenti M, et al. Quantifying spatial reallocation of land use/land cover categories in West Africa[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 135: 108556.
- [24] Shafizadeh-Moghadam H, Minaei M, Feng Y, et al. GlobeLand30 maps show four times larger gross than net land change from 2000 to 2010 in Asia[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019, 78: 240 – 248.
- [25] 郑文武, 田亚平, 邹 君, 等. 基于GIS的南方丘陵生态脆弱区土地利用适宜性研究——以衡阳盆地为例[J]. 地理与地理信息科学, 2010, 26(6): 79 – 83.
- [26] Zhang C, Wang P, Xiong P, et al. Spatial Pattern Simulation of Land Use Based on FLUS Model under Ecological Protection: A Case Study of Hengyang City[J]. *Sustainability*, 2021, 13(18): 10458.
- [27] Deng Z, Quan B. Intensity Characteristics and Multi-Scenario Projection of Land Use and Land Cover Change in Hengyang, China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(14): 8491.
- [28] 李 涛, 巩雅博, 戈健宅, 等. 基于电路理论的城市景观生态安全格局构建——以湖南省衡阳市为例[J]. 应用生态学报, 2021, 32(7): 2555 – 2564.
- [29] 胡 最, 王 慧. 多因素约束的城市空间扩张元胞自动机构建及其应用研究[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(3): 616 – 627.
- [30] 王 鹏, 况福民, 邓育武, 等. 基于主成分分析的衡阳市土地生态安全评价[J]. *经济地理*, 2015, 35(1): 168 – 172.
- [31] 衡阳市统计局. 衡阳市统计年鉴2021[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [32] 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.
- [33] 徐新良, 刘纪远, 张树文, 等. 中国多时期土地利用土地覆被遥感监测数据集(CNLUCC) [DS]. 北京: 中国科学院资源环境数据中心注册与出版系统(<http://www.resdc.cn/DOI>).
- [34] 于 莉, 宋安安, 郑 宇, 等. “三生用地”分类及其空间格局分析——以昌黎县为例[J]. 中国农业资源与区划, 2017, 38(2): 89 – 96.
- [35] 王娟娟, 毋兆鹏. 乌鲁木齐市2000-2018年“三生”空间格局演变及其风险评价[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(6): 318 – 326, 335.
- [36] 黄天能, 张云兰. 基于“三生空间”的土地利用功能演变及生态环境响应——以桂西资源富集区为例[J]. 生态学报, 2021, 41(1): 348 – 359.
- [37] 乔伟峰, 盛业华, 方 斌, 等. 基于转移矩阵的高度城市化区域土地利用演变信息挖掘——以江苏省苏州市为例[J]. 地理研究, 2013, 32(8): 1497 – 1507.
- [38] 全 斌, 樊雪姣, 刘沛林, 等. ArcGIS 10.8地理信息系统软件与应用[M]. 北京: 中国环境出版集团, 2021.
- [39] Liang X, Guan Q, Clarke K C, et al. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2021, 85: 101569.
- [40] Lv J, Wang Y, Liang X, et al. Simulating urban expansion by incorporating an integrated gravitational field model into a demand-driven random forest-cellular automata model[J]. *Cities*, 2021, 109: 103044.
- [41] 湖南省统计局. 湖南统计年鉴2021[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [42] 周增荣, 黄金良, 周 培. 土地利用系统转移分析方法及其应用[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2012, 7(4): 28 – 38.
- [43] 侯西勇, 邸向红, 侯 婉, 等. 中国海岸带土地利用遥感制图及精度评价[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(10): 1478 – 1488.
- [44] 徐睿泽, 孙建国, 韩 惠, 等. 基于MCE-Markov-CA的郑州市土地利用时空变化模拟研究[J]. 地理与地理信息科学, 2020, 36(1): 93 – 99.

Intensity Analysis and Driving Forces of Pattern Evolution in Productive-Living-Ecological Land: A Case Study of Hengyang City

DENG Zhi-wei¹, QUAN Bin^{1, 2, 3*}, QI Jian-qing², PENG Ke¹, FAN Xue-jiao¹

(1. College of Geography and Tourism, Hengyang Normal University, Hengyang 421002, China; 2. Cooperative Innovation Center for Digitalization of Cultural Heritage in Ancient Villages and Towns, Hengyang 421002, China; 3. HIST Hengyang Base of UNESCO, Hengyang Normal University, Hengyang, 421002, China)

Abstract: [Objective] The analysis of the Productive-Living-Ecological (PLE) land evolution characteristics and its driving factors in Hengyang City could provide a reference basis for the optimization of land use allocation and sustainable land development in the city. [Method] The intensity characteristics of PLE land changes in Hengyang City from 1995 to 2020 were identified through a combination of change components and Intensity Analysis methods, and a patch-generating land use simulation (PLUS) model was adopted to reveal the driving mechanism of PLE land change in the area. [Result] Ecological land and productive-ecological land were the main category in the study area, showing a decreasing trend. The overall change components of PLE land changed from quantity to exchange, and the change components of various categories were obviously different. The change intensities of PLE land from 1995 to 2015 were lower than those from 2015 to 2020, which showed a faster change. Productive-living land and ecological-productive land changed actively. The gain of living-productive land mainly derived from ecological land and productive-living land from 1995 to 2020. The transition intensities indicated that the stable targeting for the transition was from productive-ecological land to productive-living land, and a stable avoiding for the transition was from ecological land to productive-living land. [Conclusion] The expansion intensity of the living-production land is continuing to rise, which mainly is driven by the construction of transport infrastructure, resulting in the encroachment of a large amount of land for production and ecological functions. In the future, the region should optimize structure of the PLE land through overall planning and policy guidance.

Key words: Productive-Living-Ecological land; Land use change; Intensity Analysis; PLUS model; Driving force; Hengyang City

[责任编辑: 韩春兰]