

引用格式: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. [Yang J X, Gong J, Gao J, et al. Stationary and systematic characteristics of land use and land cover change in the national central cities of China using intensity analysis: A case study of Wuhan City[J]. Resources Science, 2019, 41(4): 701-716.] DOI: 10.18402/resci.2019.04.08

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

杨建新¹, 龚健^{1,2}, 高静¹, 冶琴^{1,3}

(1. 中国地质大学(武汉)公共管理学院, 武汉 430074;

2. 国土资源部法律评价重点实验室, 武汉 430074;

3. 青海省国土规划研究院, 西宁 810001)

摘要:运用改进的土地利用变化强度分析框架探析国家中心城市土地利用变化模式的稳定性和系统性特征。以土地利用变化转移矩阵为基础, 从自上而下的三个层次(间隔、类别、转换)分析区域土地利用变化强度动态特征。鉴于多种地类相互转换过程分析的非直观性, 提出一种转换模式交叉列联表表示各种转换类型的稳定性和系统性特征, 并有助于研究者将土地利用变化的模式与过程相联系。以国家中心城市武汉为研究案例, 分析其1996—2015年土地利用变化模式的稳定性和系统性特征, 并对比其他国家中心城市近年来土地利用变化模式特征。结果表明:武汉市近年来土地利用变化强度呈上升趋势, 农村居民点用地、城镇建设用地和耕地的转入以及耕地、未利用地和水体的转出表现出时间尺度稳定性。耕地向城镇建设用地和农村居民点用地等转换过程则表现为稳定的系统性变化模式。其他国家中心城市主要土地利用变化模式与过程及武汉市表现出较大的相似性。改进后的强度分析框架能更直观地反映土地利用变化模式的稳定性和系统性特征, 研究结果对深入挖掘国家中心城市土地利用变化模式信息, 理解其土地利用变化过程与机制具有重要作用。

关键词:强度分析; 土地利用变化; 土地转移矩阵; 模式与过程; 驱动机制; 国家中心城市; 武汉市

DOI: 10.18402/resci.2019.04.08

1 引言

城市土地利用/覆被变化(LUCC)是人—地系统研究的重要内容^[1], 其对全球碳汇、物种多样性、粮食安全等自然和社会经济过程均有显著影响^[2]。科学分析城市土地利用变化模式与过程是应对环境变化和实现区域可持续发展的重要方面^[3]。人类利用土地的策略、模式及意向往往在土地利用变化过程中有所体现。不同区域、不同文化、不同等级的城市其社会经济发展形态各异, 往往经历着不同的土地利用变化过程, 科学地认识过程背后的模式、机制和效应有助于构建可持续的城市发展策略和

管理政策。

数量结构变化特征是土地利用变化研究的重要方面, 较为常用的分析方法是基于两个时间点的土地利用/覆被(LULC)图计算土地变化转移矩阵^[4]。转移矩阵所反映的土地数量、结构和方向变化信息是研究土地利用变化过程、模式、机制及其效应的重要基础, 也是构建土地利用变化模拟模型和社会经济与生态环境效应模拟模型的重要环节^[5]。一些学者基于转移矩阵构建模型指数以揭示土地利用变化某方面的特征, 如土地利用强度^[6]、土地利用动态度^[7]、土地利用程度^[8]等。然而转移矩阵本身及这

收稿日期: 2018-06-24 修订日期: 2018-12-17

基金项目: 国家社科基金项目(14BJY057); 国家自然科学基金项目(41871172); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(CUGL170408)。

作者简介: 杨建新, 男, 湖北鄂州人, 博士研究生, 主要研究方向为土地利用变化及其资源环境效应分析与模拟。E-mail: yangjianxinjian@163.com

通讯作者: 龚健, E-mail: gongjian@cug.edu.cn

些传统的基于转移矩阵的指数分析方法,难以充分地挖掘矩阵中所包含的变化信息^[9]。比如无法显示哪些土地利用变化过程是稳定的,哪些过程是受到强烈的人类土地利用活动或自然因素驱动而表现出稳定、系统的变化模式,哪些是非稳定、非系统变化模式,也无助于揭示土地利用变化过程与人类社会经济活动之间的内在联系。而这些信息往往是研究者和管理者更为需要的,可帮助决策者制定更加具有针对性和高效的管理策略;有助于模型构建人员将重点放在稳定性和系统性的变化过程研究,从而提高模型结果的可靠性。为充分利用转移矩阵信息,Aldwaik等^[10]提出了一种基于转移矩阵的土地利用变化强度分析框架,该分析框架从时间间隔、类型和转移三个层级上综合分析土地利用变化强度特征,以识别连续时期内研究区土地利用变化的稳定性和系统性模式。该框架已应用于诸多土地利用变化研究^[11-13]。Huang等^[14]第一次将该方法应用于中国,研究了中国东南部九龙河流域1986—2007年的土地利用变化过程与模式;随后孙云华^[15]应用该框架分析了中国昆明市的土地利用变化强度和模式。Shoyama等^[12]则使用该框架分析了日本知床半岛1947—2004年近60年土地利用变化及其景观变化模式特征。该框架的不足之处为当研究涉及到的土地利用类型较多和时间间隔较长时,强度分析结果不能很好地直观反映多种转换过程中稳定性和系统性的变化模式。为此,本文对已有框架进行改进,基于转移层次强度分析结果构建土地转换模式交叉列联表,以快速直观地反映出稳定性和系统性的土地转换模式。

国家中心城市是中国各大城市群的核心城市,也是参与全球竞争与合作的载体和平台^[16]。同时国家中心城市也是土地利用变化最为剧烈的地区,为土地利用转型和土地制度改革的重要先行区和示范区。国家中心城市土地利用模式虽各具特色但也表现出一些共性特征。科学分析国家中心城市土地利用变化的稳定性和系统性模式及其机制对促进国家中心城市持续健康发展,转变和创新土地资源利用方式具有重要启示作用。本文将改进后的强度分析框架应用于国家中心城市的土地利用变化模式分析,以期识别国家中心城市土地利用变

化模式中稳定性和系统性的共性特征。研究问题主要聚焦于:①如何应用改进后分析框架研究区域土地利用变化模式及其稳定性和系统性特征;②强度分析框架如何帮助研究者将土地利用变化模式与过程相联系;③国家中心城市土地利用变化有哪些稳定性和系统性的共性特征。

武汉市是中国中部地区的国家中心城市,承担着带动中国中部崛起和西部发展并参与国际竞争与合作的重要角色。近年来,武汉市以全面建成国家中心城市为目标积极打造国家创新中心和制造业中心,得益于国家资源和政策的强力支撑,武汉市社会经济发展较快,与其他国家中心城市表现出相似性^[17]。同时,其土地利用变化也日趋剧烈,在支撑社会经济快速发展的同时也带来了诸多城市发展问题^[18,19],表现出国家中心城市土地利用变化所具有的一些共性特征^[16,20-24]。因此,科学揭示其土地利用变化过程、模式和机制,对其他国家中心城市发展具有重要启示作用。因而本文以武汉市作为强度分析框架的应用案例。

本文首先阐述了研究区概况和数据来源与处理过程,对强度分析框架进行了系统介绍,特别是详细描述了土地转换模式交叉列联表的原理和使用;接着以武汉市作为研究区,运用改进的强度分析框架,研究了该市1996—2005以及2005—2015年两个时期的土地利用变化强度及其稳定性和系统性特征;然后结合研究实例展示了如何根据土地利用变化强度分析结果解释土地利用变化模式与过程,将土地利用变化模式与过程和社会经济驱动因素和机制相联系;此外,文章通过文献分析梳理了其他国家中心城市主要土地利用变化过程,总结了国家中心城市土地利用变化模式的一些主要共性特征;最后总结出主要研究结论,并指出下一步的研究方向。

2 研究区概况、数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

武汉市地处长江中游,江汉平原东部,位于113°41'E—115°05'E、29°58'N—31°22'N之间,为长江中游城市群核心,也是中部地区的国家中心城市。市域国土总面积8569.15 km²,境内有大小湖泊

2019年4月

166个。武汉地势东高西低,南高北低,最高海拔872.50 m,最低海拔18.00 m。2015年末全市下辖7个中心城区和6个远城区,2017年常住人口1089.29万人,地区生产总值13410.34亿元,三次产业结构为3.0%:43.7%:53.3%。2015年武汉市农用地、建设用地和未利用地占比分别为62.5%,22.2%和15.3%。20世纪90年代以来,武汉市国土开发活动趋于活跃,特别是近年来武汉市以建设国家中心城市为战略目标,积极提升自身功能和定位,社会经济迅速发展,LULC数量结构和布局变化显著,一方面有力支撑了武汉市社会经济的持续快速增长,另一方面也带来了一些不容忽视的问题,如土地资源约束趋紧^[19,25-26],环境条件恶化^[18,27-31],土地利用综合效益偏低^[31,32]等。土地利用结构和布局调整优化已成为武汉市转变土地利用方式,全面建成国家中心城市的重要任务^[17]。

2.2 数据来源及处理

本文使用的数据主要包括1996、2005以及2015年三期LULC栅格数据集和社会经济数据。LULC数据根据武汉市农村土地调查成果制作,数据空间分辨率为30 m×30 m。其中,1996年LULC数据主要基于航摄照片、正射影像图人机交互解译和野外调查获取,分类结果采用野外抽查方式进行精度评价,抽查图斑须保证85%以上准确率^[32];2005年数据在1996年数据基础上进行更新调查获取;2015年LULC数据采用QuickBird、SPOT等高精度影像基于人机交互解译获取,并进行实地核查,核查结果需确保93%~95%以上准确率^[33,34]。在生产1996、2005以及2015年三期LULC数据时,调查人员采用了纵向不同等级和横向不同标准的分类体系,其中1996年LULC数据按照《土地利用现状调查技术规程》^[32]规定的二级分类体系(一级8个类别,二级46个类别)进行分类;2005年LULC数据采用《全国土地分类》(过渡期适用)^[35]三级分类标准(一级3个类别,二级10个类别);2015年LULC数据采用《土地利用现状分类》(GB/T 2001—2007)^[33]标准(一级12个类别,二级57个类别)。因此,在进行研究区土地利用变化模式分析前需将采用不同分类标准的LULC数据逐级聚合成统一的分类体系。结合武汉市土地利用变化阶段性主要特征^[36]和研究区现行土

地利用分类标准,对照分析不同分类标准的地类含义与名称,在ArcGIS平台将1996、2005和2015年LULC数据重分类为6个类别:城镇建设用地、农村居民点用地、耕地、水体、林草地和未利用地。此外,三期LULC数据均统一转换投影系统为西安80高斯克吕格投影。本文所用社会经济数据主要来源于武汉市统计年鉴^[37]和湖北省统计年鉴^[38]。

2.3 研究方法

2.3.1 土地利用转移矩阵

土地利用变化转移矩阵通过将某一时期期初和期末的LULC图进行叠加分析获取,以矩阵的行和列分别标识期初、期末土地利用类型,矩阵非对角线元素标识各期初类型转变为期末类型的数量或比例。矩阵对角线元素则标识期初到期末未发生变化的土地利用类型数量或比例。每一行的元素相加表示期初该地类的总面积,该行非对角线元素相加表示该时期地类减少的总面积;每一列的数据相加表示期末地类总面积,该列非对角线元素之和表示期末该地类总增长面积。某一时期地类减少总面积和增加总面积之和表示该时期地类变化总面积,而减少总面积与增加总面积之差表示该时期地类净变化面积,总变化面积减去净变化面积则表示该地类发生了地类置换变化的面积。

2.3.2 土地利用变化强度分析

转移矩阵可以直观地反映出土地利用变化过程信息,但是无法提供更多的信息以帮助研究者确定土地利用变化过程所表现出的稳定性和系统性模式。强度分析以转移矩阵作为研究基础数据,是一种自上而下描述土地利用变化模式的解释性框架,通过层层深入地分析在时间间隔、类别和转换三个不同层次上土地利用变化强度特征,并将每一个层次观测到的变化强度与假设的相应层级上的一致性变化强度进行比较,据此定义不同层次土地利用变化的稳定性和系统性模式的内涵,进而识别和分析不同的土地利用变化模式特征。该分析过程和结果有助于将土地利用变化过程与模式相联系,并提供土地利用变化机制分析所需信息。下文分别对时间间隔、类别和转换三个层次的变化强度计算方法加以说明。

(1)间隔层次。时间间隔层次强度分析反映了

土地利用变化强度在不同时间间隔内的变化情况。公式(1)和(2)分别计算了各个时期土地利用变化强度 S_t 和整个研究期内的平均土地利用变化强度 U 。如果各个时期内土地利用变化是均匀的,那么每一时期的变化强度应等于整个研究时期内的变化强度,即 $S_t=U$,亦即说明研究期内土地利用变化在时序上是具有稳定性的,否则认为研究期内土地利用变化在时序上是非平稳的。如果 $S_t>U$,表明该时期土地利用变化是快速的;如果 $S_t<U$,则表明变化是慢速的。

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

$$U = \frac{\sum_{t=1}^{T-1} \sum_{j=1}^J \left[\left(\sum_{i=1}^J C_{tij} \right) - C_{tjj} \right] / \left[\sum_{j=1}^J \left(\sum_{i=1}^J C_{tij} \right) \right]}{Y_T - Y_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中: S_t 表示时间间隔 $[Y_t, Y_{t+1}]$ 内土地利用变化强度, U 表示整个研究期内土地利用变化的平均强度, C_{tij} 表示时间间隔 $[Y_t, Y_{t+1}]$ 内从期初地类 i 转为期末地类 j 的土地数量, i 表示某一研究期期初LULC类型编码, j 表示某一研究期期末LULC类型编码, J 表示LULC类型数量, t 表示时间间隔 $[Y_t, Y_{t+1}]$ 的期初时间节点编码($1 \leq t \leq (T-1)$), T 表示研究期时间节点总数, Y_t 表示时间节点 t 对应年份。

(2)类别层次。类别层次强度分析反映不同地类变化强度在不同时间间隔内的变化情况,并根据各地类的总增长和总减少面积分别进行强度分析。公式(3)和(4)分别计算了某一时间间隔内不同地类增长强度 G_{ij} 和减少强度 L_{ii} 。如果各个地类均按其在间隔期初的面积以相同比例进行转出,也按照其在间隔期末面积以相同的比例进行转入,那么各个地类的增长或减少强度应该是一致的,并且与该时间间隔内总的土地利用变化强度 S_t 相等,即 $G_{ij}=S_t=L_{ii}$ 。如果某一地类的总转入强度大于该时期土地利用变化强度 S_t ,则说明该地类的增长是活跃的,否则是惰性的;如果某一地类的总转出强度大于该时期土地利用变化强度 S_t ,则说明该地类的减少是活跃的,否则是惰性的。如果某一地类在连续时间间隔内的增长或减少均表现为活跃,或均表现

出惰性,则表明该地类的增长或者减少在整个研究期内表现为稳定性模式。

$$G_{ij} = \frac{\left[\left(\sum_{i=1}^J C_{tij} \right) - C_{tjj} \right] / (Y_{t+1} - Y_t)}{\sum_{i=1}^J C_{tij}} \times 100\% \quad (3)$$

$$L_{ii} = \frac{\left[\left(\sum_{j=1}^J C_{tij} \right) - C_{tii} \right] / (Y_{t+1} - Y_t)}{\sum_{j=1}^J C_{tij}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: G_{ij} 表示时间间隔 $[Y_t, Y_{t+1}]$ 内地类 j 的转入强度, L_{ii} 表示时间间隔 $[Y_t, Y_{t+1}]$ 内地类 i 的转出强度,其他符号含义同前。

(3)转换层次。转换层次强度分析反映了不同地类相互之间的转换强度在不同时间间隔的变化情况,可从转出地类和转入地类两方面分别进行分析。公式(5)计算了某一时间间隔内期初地类 i 转出为期末某一地类 n 的强度 R_{in} ,公式(6)计算了该时间间隔内期末地类 n 转入的平均强度 W_{in} 。从地类 n 转入的角度来看,如果地类 n 根据期初各地类 i ($i \neq n$)的面积以相同比例从 i 获取转入面积,则期末地类 n 从期初地类 i 转入的强度 R_{in} 应与地类 n 转入的平均强度 W_{in} 一致,即 $R_{in}=W_{in}$,表明地类 n 从期初不同地类 i 获取转入过程是随机和均匀的,此时地类 n 从 i 获取转入的面积主要与地类 i 的期初面积有关,而相对较少受到其他自然因素和社会经济因素驱动。如果 $R_{in}>W_{in}$,则说明地类 n 倾向于从地类 i 转入,否则说明地类 n 避免从地类 i 转入。如果地类 n 在连续时间间隔内均表现为倾向于或者避免于从地类 i 获取转入,则说明地类 n 从地类 i 获取转入的过程具有时间尺度上的稳定性,是一种稳定性的土地转换模式。

$$R_{in} = \frac{C_{tin} / (Y_{t+1} - Y_t)}{\sum_{j=1}^J C_{tij}} \times 100\% \quad (5)$$

$$W_{in} = \frac{\left[\left(\sum_{i=1}^J C_{tin} \right) - C_{tnn} \right] / (Y_{t+1} - Y_t)}{\sum_{j=1}^J \left[\left(\sum_{i=1}^J C_{tij} \right) - C_{tjj} \right]} \times 100\% \quad (6)$$

式中: R_{in} 表示时间间隔 $[Y_t, Y_{t+1}]$ 内期初地类 i 到期末地类 n 的转入强度($i \neq n$), W_{in} 表示时间间隔 $[Y_t, Y_{t+1}]$

2019年4月

内期初各地类转入为地类 n 的平均强度, n 表示某一土地类型转换过程中转入地类编码,其他符号含义同前。

公式(7)计算了某一时间间隔内期初某一地类 m 转出为期末地类 j 的强度 Q_{mj} ,公式(8)计算了该时间间隔内期初地类 m 转出的平均强度 V_m 。从地类 m 转出的角度来看,如果地类 m 根据期末地类 j 的面积以相同比例转出为地类 $j(j \neq m)$,则期初地类 m 转出为期末地类 j 的强度 Q_{mj} 应与地类 m 转出的平均强度 V_m 一致,即 $Q_{mj}=V_m$,表明地类 m 转出为 j 的过程是随机和均匀的,而相对较少地受到其他自然因素和社会经济因素驱动。如果 $Q_{mj}>V_m$,则说明地类 m 倾向于转出为地类 j ,否则说明地类 m 避免转出为地类 j 。如果地类 m 在连续时间间隔内均表现为倾向于或者避免于转出为地类 j ,则说明地类 m 转出为 j 的过程具有时间尺度上的稳定性,是一种稳定性的土地利用变化模式。

$$Q_{mj} = \frac{C_{mj}/(Y_{t+1} - Y_t)}{\sum_{j=1}^J C_{tij}} \times 100\% \quad (7)$$

$$V_m = \frac{\left[\left(\sum_{i=1}^J C_{imj} \right) - C_{imm} \right] / (Y_{t+1} - Y_t)}{\sum_{j=1}^J \left[\left(\sum_{i=1}^J C_{tij} \right) - C_{tim} \right]} \times 100\% \quad (8)$$

式中: Q_{mj} 表示时间间隔 $[Y_t, Y_{t+1}]$ 内期初地类 m 到期末地类 j 的转出强度($j \neq m$), V_m 表示时间间隔 $[Y_t, Y_{t+1}]$ 内期初地类 m 转出为期末各地类的平均强度, m 表示某一土地类型转换过程中转出地类编码,其他符号含义同前。

特别是,如果期初地类 i 倾向于转出为期末地类 j ,并且期末地类 j 也倾向于从期初地类 i 获取转入;又或者如果期初地类 i 避免于转出为期末地类 j ,并且期末地类 j 也避免于从期初地类 i 转入,那么可认为地类 i 到 j 的转变是一种倾向性或者避免性的系统性变化过程,如果 i 到 j 的转变在连续的时间间隔内具有相同的系统性转换过程,则表明这种系统性过程具有时间尺度上的稳定性,为土地利用变化表现出的稳定的系统性变化模式,这些模式往往受着明显的自然因素或者人类活动影响因素驱动,是研究者和决策者最需关注的土地利用变化模式特征。

在进行转换层次的强度分析时,如果涉及到的地类和时间节点较多,从多种转换过程中识别出系统性和稳定性的变化模式是较为繁琐的。例如,一个涉及到 J 种类别和 T 个时间节点的 land 转换强度分析需要进行 $(T-1) \times J^2$ 次比较才能判定每一种转变类型是否具有稳定性或系统性。为帮助研究人员快速直观地识别土地利用变化的稳定性和系统性模式,本文设计了一种土地转换模式交叉列联表,可快速可视化识别土地转换过程的系统性和稳定性特征。该表以一个 $(T-1) \times 2 \times J^2$ 网格标识各期初地类 i 和各期末地类 j 之间的转化模式特征。如图1所示(假设 $T=3$),单元格①标识时间间隔1内地类 j 是否倾向于从地类 i 获取转入面积,是则填充黑色,否则填充灰色(也可以使用任意其他颜色)。单元格②标识该时间间隔内,地类 i 是否倾向于转出为地类 j ,是则填充黑色,否则填充灰色。单元格③和④标识时间间隔2内地类 i 和 j 的转换模式,依照①和②的方法进行颜色填充。那么,横向上如果①和②(或者③和④)填充相同颜色则表示该时间间隔地类 i 向地类 j 的转化具有系统性特征(倾向性或者避免性);纵向上如果①和③(或者②和④)填充相同颜色则表示地类 i 向地类 j 的转化具有稳定性,如果所有单元格具有相同颜色则表示地类 i 向地类 j 的转化是稳定性的系统变化模式。

3 结果与分析

3.1 武汉市1996—2015年土地利用变化转移矩阵

图2展示了武汉市1996、2005和2015年LULC情况,可以看出武汉市主要LULC类型为耕地和水体,其次为城镇建设用地和林草地。1996—2015年期间,武汉市耕地面积显著性地持续减少,占比从

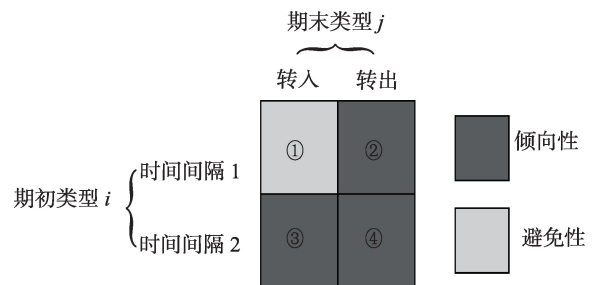


图1 土地转换模式交叉列联表

Figure 1 Confusion table of land transition patterns

1996年的51.14%减少为2015年的37.48%;城镇建设用地面积比例持续增长,从1996年的6.49%增长为2015年的14.55%;农村居民点用地、林草地和水体有小幅增长。LULC分布显示城镇建设用地主要分布在中部地区,与耕地和水体在空间分布上呈现紧密的镶嵌式分布,并呈现不完整的圈层式扩张。

从转移矩阵(表2和表3)可以看出,武汉市土地利用变化在1996—2005年以及2005—2015年期间均表现出耕地转出面积最大,其次为水体和林草地,其中耕地主要转出为城镇建设用地、水体、林草地和农村居民点用地;水体和林草地主要转出为城镇建设用地和耕地。城镇建设用地、水体和林草地有较大的转入面积,其中城镇建设用地主要从耕地和水体转入,水体和林草地主要从耕地转入。此外,相比较于1996—2005年,武汉市2005—2015年

期间耕地向城镇建设用地,水体向耕地,林草地向耕地,农村居民点用地向城镇建设用地转入面积均有明显增长。

3.2 武汉市土地利用变化强度

图3给出了间隔层次的强度分析结果,柱状图表示1996—2005年和2005—2015年两个时期的土地利用变化强度 S_t ,黑色虚线表示研究期1996—2015年土地利用变化平均强度 U 。可以看出1996—2015年期间,研究区土地利用与覆被变化强度出现了明显增长,1996—2005年表现为慢速变化,2005—2015表现为快速变化。

图4给出了类别层次的强度分析结果。柱状图分别表示两个时期各地类增长强度 G_{ij} 和减少强度 L_{ij} ,黑色虚线表示各时期土地利用变化强度 S_t 。从图4可以看出,1996—2005年期间,农村居民点、城

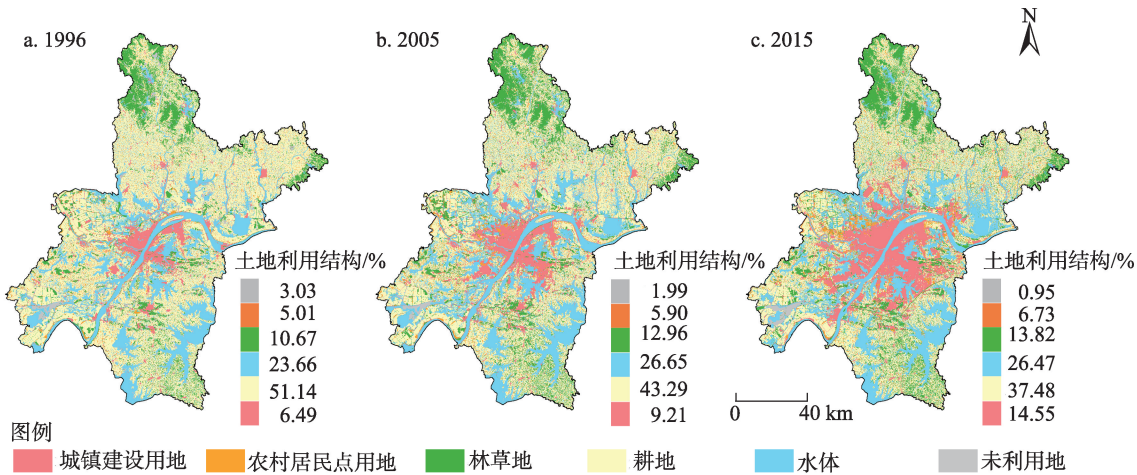


图2 1996,2005和2015年武汉市土地利用与覆被图

Figure 2 Land use and land cover maps of Wuhan, 1996, 2005, and 2015

表2 1996—2005年武汉市土地利用变化转移矩阵

Table 2 Land transition matrix in percent of land area of Wuhan, 1996-2005 (%)

		2005年						转出总量
		城镇建设用地	耕地	水体	林草地	农村居民点用地	未利用地	
1996年	城镇建设用地	5.43	0.27	0.39	0.11	0.26	0.02	1.06
	耕地	2.01	41.41	3.75	2.80	1.07	0.10	9.73
	水体	0.81	0.62	21.76	0.26	0.14	0.06	1.89
	林草地	0.40	0.44	0.36	9.25	0.12	0.09	1.42
	农村居民点用地	0.38	0.20	0.08	0.11	4.24	0.01	0.78
	未利用地	0.17	0.33	0.31	0.43	0.07	1.71	1.32
	小计	9.21	43.29	26.66	12.96	5.90	1.99	16.19
转入总量		3.77	1.87	4.89	3.71	1.66	0.28	16.19

2019年4月

表3 2005—2015年武汉市土地利用变化转移矩阵

Table 3 Land transition matrix in percent of land area of Wuhan, 2005-2015

(%)

		2015年							
		城镇建设用地	耕地	水体	林草地	农村居民点用地	未利用地	小计	转出总量
2005年	城镇建设用地	7.27	0.39	0.47	0.44	0.58	0.05	9.21	1.94
	耕地	3.78	31.75	3.35	2.86	1.48	0.06	43.29	11.53
	水体	1.58	1.84	21.76	0.73	0.46	0.28	26.66	4.90
	林草地	0.79	2.44	0.48	8.78	0.35	0.13	12.96	4.18
	农村居民点用地	0.97	0.60	0.20	0.32	3.78	0.02	5.90	2.11
	未利用地	0.16	0.45	0.22	0.68	0.08	0.40	1.99	1.59
	小计	14.55	37.48	26.46	13.82	6.73	0.95	100.00	26.25
	转入总量	7.28	5.73	4.71	5.03	2.95	0.55	26.25	

镇建设用地、林草地、水体的增长是活跃的,而未利用地、耕地的减少是活跃的;2005—2015年期间,农村居民点用地、城镇建设用地、未利用地、林草地的增长是活跃的,农村居民点用地、未利用地、林草地、耕地的减少是活跃的。1995—2015年期间,农村居民点用地、未利用地、林草地、水体的减少强度有明显上升,农村居民点用地、未利用地以及耕地则增长强度上升较为明显。其中农村居民点用地、城镇建设用地及耕地的增长表现出时间稳定性;耕

地、未利用地以及水体的减少表现出时间稳定性。

图5给出了转换层次交叉列联表分析结果。从图5可以看出,研究区土地利用变化表现出多样的转换模式,其中城镇建设用地—农村居民点用地、耕地—林草地、耕地—农村居民点用地、农村居民点用地—城镇建设用地、未利用地—林草地等转换过程是一种稳定地倾向性系统转换模式;耕地—未利用地、水体—耕地、水体—林草地、水体—农村居民点用地、林草地—水体、农村居民点用地—水体、农村居民点用地—林草地、农村居民点用地—未利用地等转换过程是一种稳定地避免性系统转换模式。对比转移矩阵可以看出,转移面积较大的地类之间并非一定表现出稳定性或系统性的变化模式,如耕地向城镇建设用地和林草地的转化面积在两个时期均较大,也均表现出稳定性的系统变化模式;而耕地向水体的转化、水体向城镇建设用地的转化面积均较大,但这两者之间均没有表现出稳定性的系统变化模式。相反,农村居民点用地向城镇

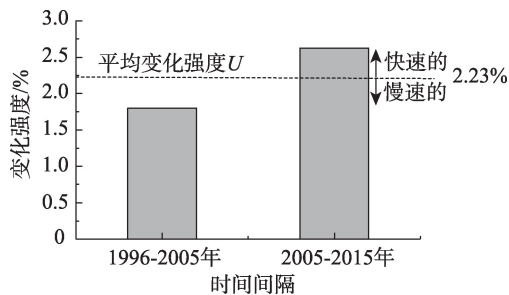


图3 1996—2015年武汉市间隔层次土地利用变化强度

Figure 3 Interval level intensity analysis of Wuhan, 1996-2015

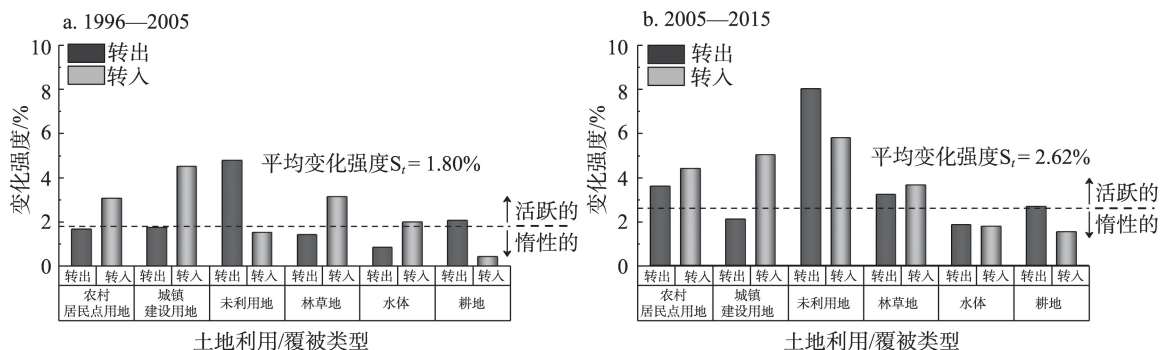


图4 1996-2015年武汉市类别层次土地利用变化强度

Figure 4 Category level intensity analysis of Wuhan, 1996-2015

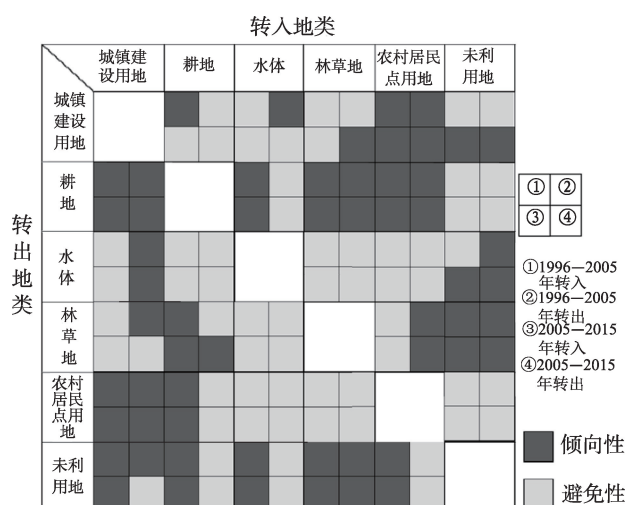


图5 1996—2015年武汉市转换层次土地利用变化模式
交叉列联表

Figure 5 Confusion table of land use transition patterns of Wuhan, 1996-2015

建设用地、林草地向未利用地以及未利用地向林草地的转化面积均较小,却表现出稳定性的系统变化模式。可见转移矩阵虽能直观反映研究区土地利用变化的数量、结果和方向,但地类转入和转出数量与地类面积关系密切,因此转移矩阵难以揭示土地利用变化的稳定性和系统性模式。

4 讨论

4.1 土地利用变化模式与过程

4.1.1 土地利用变化的规模差异性

强度分析是对区域土地利用变化模式的层次性剖析,通过间隔、类别、转换三个层次的递进分析将土地利用变化模式与过程相联系,帮助研究人员系统深入地认识区域土地利用变化模式与过程,更多关注那些表现出稳定性和系统性的关键变化模式。从转移矩阵可以看出研究区面积较大的地类,如耕地、水体,其转出面积也较大。类别层次和转换层次的强度分析结果可以提供解释该现象的必要信息。首先,耕地转出过程是一种稳定的活跃性变化过程;其次,耕地向城镇建设用地、林草地和农村居民点用地等多个地类的转化都表现出稳定的倾向性系统变化模式,说明耕地转出面积大,一方面是由于耕地在研究区分布面积广泛,被其他地类占用的可能性较高;另一方面也是因为受自然因素

或人类有目的性的土地利用行为影响,加速了耕地的转出过程。同样地,水体因为空间分布广泛,在土地利用变化过程中被占用的概率高,其转出面积应该也会相对较大,但水体的转出过程并没有因自然或者人为因素影响加强,相反它的转出过程是受到抑制的,因为水体的转出是一种稳定的非活跃性变化过程,其与耕地、林草地及农村居民点用地等多个地类均表现出稳定的避免性系统变化模式。可见,耕地和水面大面积转出过程虽然都表现出时间稳定性,但两者是不同的土地利用变化模式,其动力机制也存在明显差异。

此外,城镇建设用地、林草地及农村居民点用地等面积占比相对较小的地类,其转入的面积较大。该过程同样可以从类别和转移两个层次的强度分析结果中进行解释。城镇建设用地、林草地及农村居民点用地在两个时期的增长均表现为稳定的活跃性增长,其次城镇建设用地从耕地、农村居民点用地获取转入的过程,林草地从耕地和未利用地获取转入的过程以及农村居民点用地从城镇建设用地和耕地获取转入的过程均表现为稳定的倾向性的系统变化模式。强度分析结果表明这三个地类的转入因受到自然或人类土地利用活动影响而明显强化。

转移矩阵分析结果显示,耕地转化为城镇建设用地、水体、林草地和农村居民点用地的面积均较大。转换层次的强度分析结果可以帮助理解这些土地类型转化过程背后的驱动机制。耕地向城镇建设用地、林草地和农村居民点用地的转化均为稳定的倾向性系统变化模式,一方面这些转换过程因受到自然或人类活动因素影响而强化,往往是人类土地利用行为在土地利用变化模式中的体现,另一方面也是因为耕地面积较大,其转出概率相对较高。但耕地向水体的转换并不是一种系统性的变化模式,水体从耕地获取转入的过程在时间上具有稳定的倾向性,但耕地转出为水体在时间上则表现出稳定的惰性过程,这表明耕地向水体的转变面积大的原因主要是耕地分布面积广,当水体增长时其从耕地获取转入的概率较大。这与耕地和水面紧密镶嵌的空间分布格局关系密切。

2019年4月

4.1.2 土地利用变化的速度差异性

耕地转化为城镇建设用地和农村居民点用地的面积以及水体、林草地转为耕地的面积均有明显增长。运用强度分析方法可以从三个层次来解释地类转换面积的增长或减少^[39]。首先从时间间隔层次强度分析来看,研究区整体土地利用变化强度的增长在一定程度上解释了这些地类转换面积的增长。其次从类别层次强度分析来看,耕地、水体和林草地的转出强度均有不同程度的增长,同时城镇建设用地、农村居民点用地以及耕地的转入强度也

有不同程度的增长。再次,从图6转换层次强度分析结果来看,耕地向城镇建设用地和农村居民点用地的转出强度出现了增长,城镇建设用地和农村居民点用地从耕地获取转入的强度也有不同程度增加。水体转出为耕地,特别是林草地向耕地转出的强度出现了明显上升,而耕地从水体获取转入强度也有小幅增长,特别是耕地从林草地获取转入的强度上升明显。三个层次变化强度增长的共同作用使得这些转换过程出现了明显增强。其中最需引起注意的是耕地向城镇建设用地、耕地向农村居民

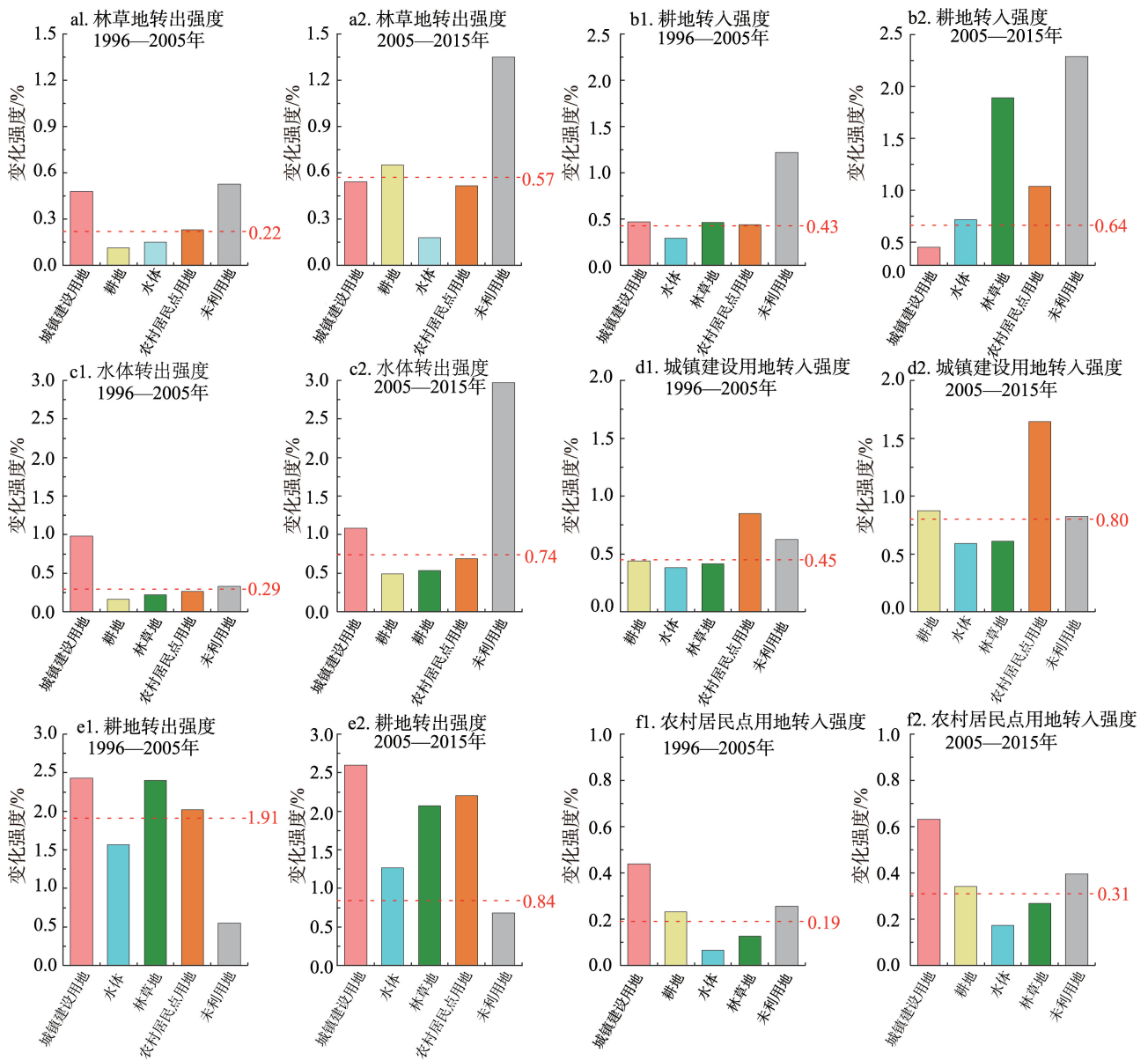


图6 1996—2015年武汉市土地转换强度变化

Figure 6 Transition level intensity analysis of Wuhan, 1996-2015

点用地的转换过程,因为这两个过程不仅出现了明显增长而且还是一种稳定的倾向性的系统变化模式。这两种系统性转化过程揭示了武汉市耕地保护措施管控能力的局限性,其未来的持续发展会明显加剧武汉市耕地损失并对耕地质量造成不利影响,进一步增加武汉市耕地保护压力。

4.2 关键土地利用变化模式驱动机制

4.2.1 土地利用变化规模差异性的影响机制

通过强度分析可识别出研究区土地利用变化模式的稳定性和系统性特征,并帮助将这些变化模式与过程相联系,这也有利于研究人员更好地认识这些关键模式和过程背后的动力机制,将土地利用变化模式与社会经济变化过程相联系。武汉市耕地和水体分布广泛,特别是城镇建设用地和农村居民点用地邻近范围内有大面积耕地分布。这些分布在城镇和农村居民点周边的耕地一般有良好的自然条件,交通便利,建设占用成本低。当城镇建设用地、农村居民点用地扩张时,往往更倾向于占用这些地理位置邻近且建设成本较低的耕地^[40]。虽然研究区有严格的耕地保护制度,但为满足城市发展和农民合理建房需求,政府每年以土地利用计划的形式规定了城市建设每年可占用的耕地数量,以保证耕地数量在上级政府规定的范围内。但实际建设过程中往往出现建设占用耕地的数量超过年度指标而补充耕地数量小于规定面积,这种情况在中国快速发展的大城市中是常有发生的^[41],这是造成武汉市耕地转化面积较大且持续减少的重要原因之一,也是耕地转化为城镇建设用地表现为稳定的倾向性系统变化模式的重要原因。武汉市大面积的水体对维持其良好的生态环境有重要作用,但该市水体已经历过大面积的损失过程,对城市生态环境造成了较大危害^[42]。例如1990—2013年期间,武汉市东湖、汤逊湖等20个大型湖泊面积从130.25 km²缩减到102.30 km²,其中南湖、赛湖等面积缩减过半。而全市湖泊面积则从1987年的370.97 km²缩小为2013年的264.73 km²,缩减了106.24 km²之多^[43]。因此,武汉市制定了十分严格的水体保护政策^[44],大部分具有重要生态功能的水体均得到了严格的保护,这也是水体的转出过程多表现为稳定的避免性变化模式的重要原因。

随着近20年来武汉市城镇化和工业化加速发展,大量农村人口进入城镇,作为中部地区特大城市和经济中心,武汉市吸引了大量外来人口,使得武汉市非农业人口快速增长,从1996年的430.75万增长到2015年的717.08万(图7a)。非农业人口的增长极大地刺激了城镇建设用地的扩张需求。1996—2015年期间,武汉市城镇建设用地增加了696.23 km²,增长了61.36%(图7b)。此外,武汉作为国家中心城市,是带动中部崛起和西部发展的核心城市,为支持武汉市经济发展,国家在土地资源配置上给与其充分的优先权,如推进基础设施建设,建立工业园区和配套住宅区及商业区,使得武汉市城镇建设用地面积快速增长^[45]。理论上,随着农村人口的下降(武汉市农村人口从1996年的323.90万下降为2015年的268.03万,图7c),农村向城镇转变,农村居民点用地面积应该减少,但武汉市农村居民点用地是不减反增,全市农村建设用地在1996—2015年期间增长了147.07 km²。这主要是由于随着入城农民收入的增长(武汉市农村居民平均收入从1996年的0.28万元增长为2015年的2.06万元,图7d),其改善生活质量的愿望和能力相应提升,致使部分有经济能力的农民选择在城市购房定居却仍保留农村住宅用地,且还有很大部分农民选择返乡新建住房,往往在新建住房的同时仍保留以前的住宅用地,新建住房面积也常大于旧房地面积^[46],由此导致武汉市农村居民点用地增长。此外,农民自主建房选址时往往选择在建设成本较低的耕地上,1996—2015年期间耕地转出为农村建设用地面积达到194.90 km²,这是耕地向农村居民点用地转化过程表现为稳定的倾向性系统变化模式的重要原因。林草地大面积转入主要是由于随着城镇快速扩张,城市环境问题日益严重,为改善城市生态环境,武汉市采取了多项城市绿化措施,为构建结构完整的城市绿地系统,同时也是响应国家“退耕还林”政策,将一些耕作条件差的耕地以及未利用地转变为林地。1996—2015年期间,武汉市耕地转化为林草地总面积达到482.67 km²,其中1996—2005年期间转化239.14 km²,2006—2015年期间转化244.18 km²。因可开发的未利用地资源有限,林草地的转入仍以耕地为主要来源,占1996—

2019年4月

2015年期间林草地转入总面积的62.29%,这是耕地向林草地转化表现为稳定的倾向性变化模式的原因。

4.2.2 土地利用变化速度差异性的影响机制

城市土地利用变化强度往往与其社会经济发展过程密切相关,GDP和固定资产投资(图7e,f)以及非农业人口增长速度的提升(图7a),促进了土地利用变化强度的增长。武汉市非农业人口增速从1996—2005年期间的2.50%提升到2006—2015年期间的3.50%,而GDP和固定资产投资增速则从23.35%和17.24%分别增长到43.50%和75.17%;相应地,土地利用变化强度也从1.80%增长为2.62%。此外,农村居民人均收入的增长提高了农民自主建房的经济能力(图7d),加之农村人口的快速减少(图7c),并且粮食生产的比较经济效益下降,农民耕地种植和保护的积极性降低,一些农民转向水产养殖。1996—2015年期间,武汉市粮食产量下降了45.88万t(图7g),而水产品产量则增长了28.81万t(图7h)。这些因素的共同作用造成了耕地向城镇建设用地和农村居民点用地转出强度的增长。随着耕地面积的不断下降,武汉市耕地面积已接近规划的底线。而未来在武汉市非农业人口和经济快

速增长的推动作用下,必然会促使城镇建设用地面积的持续扩张,并且仍会以耕地作为主要来源。在严格的耕地保护政策和占补平衡制度下,政府部门必须从其他地类补充相应的耕地面积以保证耕地总量不低于规定的最低面积,而补充耕地来源主要为水体中的坑塘水面和林草地中的荒草地、疏林地、迹地等以及未利用地。这虽然可降低耕地的净减少面积,保障耕地数量的大体平衡,但却大大增加了耕地的置换变化面积。例如2005—2015年期间武汉市耕地置换变化面积占耕地总变化面积比例高达66.37%。耕地和林草地以及水体之间的置换变化对耕地质量和生态环境均造成负面影响。由于新增耕地往往质量较差,耕作条件不便,因而往往无人耕种而造成土地资源的浪费;同时这一置换过程也破坏了原始地类景观的连续性和土壤的理化性质,造成了对生态环境的不利影响,导致城市扩张间接地破坏了原始自然生态景观^[9]。

4.3 国家中心城市土地利用变化特征

国家中心城市的土地利用变化过程和模式既具有共性又各具特色,其土地利用变化过程、模式及存在的问题等对城市群内其他中小城市具有借鉴作用。国内众多学者对这些国家中心城市土地

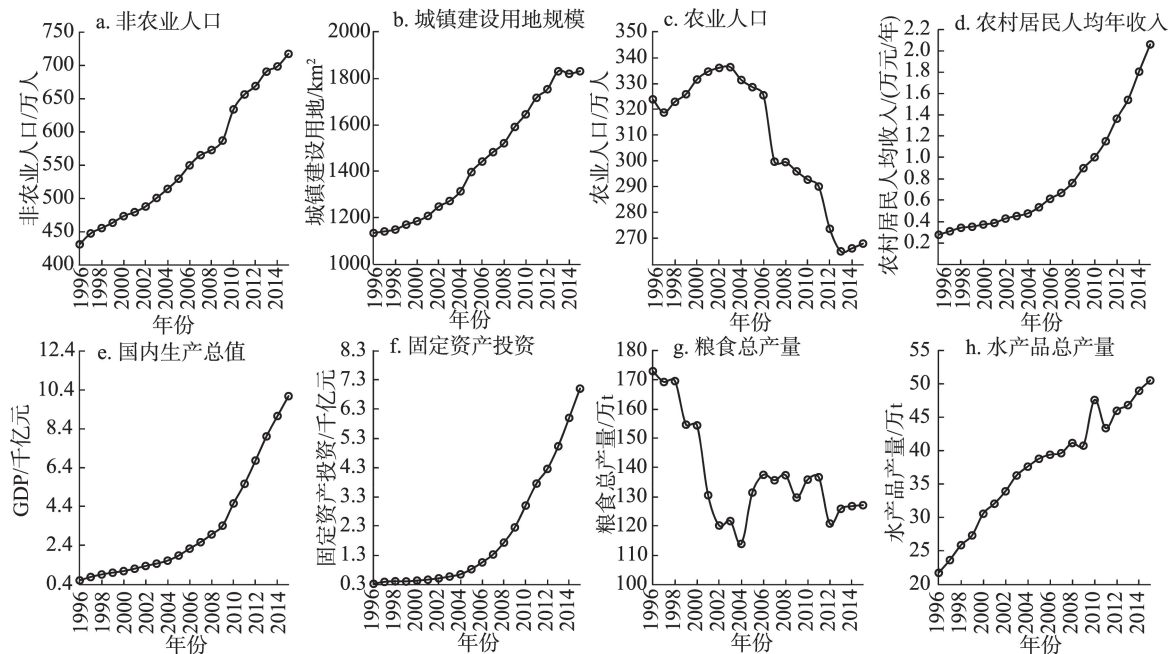


图7 1996—2015年武汉市社会经济指标变化

Figure 7 Changes of socioeconomic indices of Wuhan, 1996-2015

利用/覆被变化进行了研究,并提出了转移矩阵,因此可基于强度分析框架研究其土地利用变化模式。例如北京市1978—1992年土地利用变化强度小于1992—2000年以及2000—2010年土地利用变化强度,三个时期内北京市建设用地稳定增长而耕地持续减少,草地、荒地三个时期内的转入和转出均较为明显;城市周边耕地稳定地大面积转化为建设用地,山区荒地主要向林地转变,草地持续向耕地转变;此外,耕地向林地和草地转化也较为明显。进一步的分析表明,北京市1978—2010年耕地、林地、荒地的置换变化面积明显大于其净变化面积^[22]。上海市1990—2015年土地利用变化过程表明,该市土地利用变化强度持续增强,其中城市建设用地和农村居民点用地保持双增长,独立工矿用地及草地等均有不同程度增长;而耕地则明显减少且主要转化为城乡建设用地、独立工矿用地及林地;水体湿地与草地及耕地之间的相互转化也较为明显^[21]。重庆市2000—2006年土地利用变化强度大于1995—2000年土地利用变化强度,城镇建设用地与农村居民点均持续增长,而耕地则持续减少且主要转化为城乡建设用地及林地;新增耕地则主要来源于草地和林地,耕地、草地、林地置换变化面积大于其净变化面积^[47]。广州市2000—2012年土地利用变化表明,城市建设用地持续增长,城市周边耕地持续减少且主要转化为建设用地;新增耕地主要来源于林地和园地,耕地和林草地之间的相互转换面积较大^[48]。天津市2010—2015年及2005—2010年土地利用变化强度大于2000—2005年,城市建设用地持续增长,耕地稳定减少,城市周边耕地大面积转化为建设用地,耕地向水体转化以及林地、水体向耕地转化较为明显,土地置换变化过程显著^[49]。

通过对比可以发现,上述国家中心城市土地利用变化与武汉市土地利用变化模式特征表现出许多相似之处。随着城市人口和经济的快速增长,特别是在21世纪期初,国家中心城市土地利用变化强度明显增强,主要表现为城市建设用地快速增长并伴随着农村建设用地不合理的扩张,且扩张空间都主要来自占用其周边耕地,这给区域耕地资源的保护和粮食安全带来了巨大压力。占补平衡制度的

实施使得林地、草地、水体等自然生境向耕地转变,而“退耕还林”政策以及城市生态环境建设的需要,又使部分质量较差的耕地向生态用地类型转变,其结果使得耕地、草地、林地等地类置换变化面积大于地类净变化面积。城镇周边耕地被占用使得城市周边原来质量较高和立地条件较好的耕地向远离城市的条件较差不便耕作的地方迁移,致使耕地质量降低,耕地抛荒闲置加剧,导致农民耕作积极性和粮食产量下降。因此,城市扩张直接或间接地造成了自然生境的损失。

根据以上分析结果,本文对优化国家中心城市土地利用与保护格局提出以下参考建议:首先,应提高土地利用的经济效益,推进节约集约用地,盘活存量建设用地,适当提高用地强度,减少经济发展和人口增长对城市建设用地的刚性需求;其次,应构建科学合理的农村宅基地退出机制,积极引导农村宅基地有序有偿退出,实现农村建设用地减量化发展,缓解耕地保护压力;第三,应建立生态空间分类分级管控制度,减少城市发展对优质生态空间直接或间接的占用;第四,整合城市圈土地资源,特别是要推行和完善耕地异地“占补平衡”制度,转移国家中心城市耕地保护压力,为城市松绑;第五,需大力推进实施“田水路林村”综合整治,强化发挥土地主导功能的同时也应突出土地资源的多功能性特征,提升土地利用的综合效益。

5 结论

土地利用变化强度分析通过层层递进的系统性分析框架剖析区域土地利用变化特征,有助于将土地利用变化过程和模式与其社会经济发展阶段相联系。本文改进后的研究框架可以更加系统地展示区域土地利用转换过程与模式,直观展示模式中稳定性和系统性特征。研究结果表明:

(1)武汉市1996—2015年期间城镇建设用地主要从耕地和水体获取转入,耕地向城镇建设用地以及林草地向耕地转出等过程明显增强。

(2)武汉市近20年来土地利用变化强度呈增长趋势,其中农村居民点用地、城镇建设用地和耕地的增长以及耕地、未利用地和水体的减少均表现出时间稳定性。

(3)转移层次强度分析显示武汉市耕地向城镇

2019年4月

建设用地、耕地向农村居民点用地等转换过程是具有稳定性的系统转换过程。

(4)土地利用强度分析框架有助于理解和认识关键土地利用变化模式,规模和速度的差异性特征及其影响机制,例如耕地和水体转出过程虽然都具有时间稳定性,但两者的影响机制不同,耕地转出更多地受自然因素或人类有目的性的土地利用行为驱动。

(5)层次化的土地利用变化强度分析可更好地将土地利用变化模式与社会经济发展过程相联系,有助于研究者和管理者深入认识人地系统耦合关系。

(6)其他国家中心城市表现出与武汉市相似的主要土地利用变化过程和模式,例如城市建设用地持续快速扩张,且农村建设用地不合理增长,这些变化过程造成了耕地的大面积损失,也使得土地置换变化面积较大,间接地造成了城市自然生境的损失。

不同城市土地利用变化模式既有相似性也有差异性。度量城市土地利用变化模式的相似性有助于制定指导城市土地管理的政策。本文构建了反映转换层次的土地利用变化强度的交叉列联表,该表直观全面地反映了研究区土地转换的稳定性和系统性模式信息,因此通过对比分析不同城市的土地转换模式交叉列联表,可以识别两个城市土地利用变化模式的相似性程度,从而可以判断两者在城市土地管理政策上能否相互提供借鉴。未来可基于不同地区转换层次的交叉列联表构建土地利用变化模式相似度指数,度量不同地区土地转换模式在不同层次的相似性特征。

参考文献(References):

- [1] Manandhar R, Odeh I O, Pontius Jr R G. Analysis of twenty years of categorical land transitions in the Lower Hunter of New South Wales, Australia[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 135(4): 336-346.
- [2] Versace V, Ierodionou D, Stagnitti F, et al. Appraisal of random and systematic land cover transitions for regional water balance and revegetation strategies[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2008, 123(4): 328-336.
- [3] Huang J, Li Q, Pontius R G, et al. Detecting the dynamic linkage between landscape characteristics and water quality in a subtropical coastal watershed, southeast China[J]. *Environmental Management*, 2013, 51(1): 32-44.
- [4] Romero-Ruiz M, Flantua S, Tansey K, et al. Landscape transformations in savannas of northern south America: Land use/cover changes since 1987 in the Llanos Orientales of Colombia[J]. *Applied Geography*, 2012, 32(2): 766-776.
- [5] Runfola D, Pontius J R G. Measuring the temporal instability of land change using the flow matrix[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2013, 27(9): 1696-1716.
- [6] 闫永涛, 冯长春. 北京市城市土地利用强度空间结构研究[J]. *中国土地科学*, 2009, 23(3): 37-43. [Yan Y T, Feng C C. Research on spatial structure of urban land use intensity of Beijing [J]. *China Land Sciences*, 2009, 23(3): 37-43.]
- [7] 王秀兰, 包玉海. 土地利用动态变化研究方法探讨[J]. *地理科学进展*, 1999, 18(1): 81-87. [Wang X L, Bao Y H. Study on the methods of land use dynamic change research[J]. *Progress in Geography*, 1999, 18(1): 81-87.]
- [8] 庄大方, 刘纪远. 中国土地利用程度的区域分异模型研究[J]. *自然资源学报*, 1997, 12(2): 105-111. [Zhuang D F, Liu J Y. Study on the model of regional differentiation of land use degree in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 1997, 12(2): 105-111.]
- [9] Pontius R G, Boersma W, Castella J C, et al. Comparing the input, output, and validation maps for several models of land change[J]. *The Annals of Regional Science*, 2008, 42(1): 11-37.
- [10] Aldwaik S Z, Pontius 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.
- [11] Braimah A K. Random and systematic land-cover transitions in northern Ghana[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2006, 113(1-4): 254-263.
- [12] Shoyama K, Braimah A K. Analyzing about sixty years of land-cover change and associated landscape fragmentation in Shiretoko Peninsula, northern Japan[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 101(1): 22-29.
- [13] Mallinis G, Koutsias N, Arianoutsou M. Monitoring land use/land cover transformations from 1945 to 2007 in two peri-urban mountainous areas of Athens metropolitan area, Greece[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 490: 262-278.
- [14] 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.
- [15] 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. [Sun Y H, Guo T, Cui X M. Intensity analysis and stationarity of land use change in Kunming City[J]. *Progress in Geography*, 2016, 35(2): 245-254.]
- [16] 周阳. 国家中心城市: 概念、特征、功能及其评价[J]. *城市观察*,

- 2012, (1): 132–142. [Zhou Y. National central city: Definition, characteristics, functions and evaluation[J]. Urban Insight, 2012, (1): 132–142.]
- [17] 路洪卫. 推动武汉建设国家中心城市的战略突破口研究[J]. 湖北社会科学, 2012, (4): 54–57. [Lu H W. Study on the strategic of wuhan's construction as a national central city[J]. Hubei Social Sciences, 2012, (4): 54–57.]
- [18] 许力飞. 我国城市生态文明建设评价指标体系研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2014. [Xu L F. Study on the Ecological Civilization Evaluation Index System of Cities in China[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2014.]
- [19] Ke X, Van V J, Zhou T, et al. Direct and indirect loss of natural habitat due to built-up area expansion: A model-based analysis for the city of Wuhan, China[J]. Land Use Policy, 2018, DOI: 10.1016/j.landusepol.2017.12.048.
- [20] Huang H, Chen Y, Clinton N, et al. Mapping major land cover dynamics in Beijing using all Landsat images in Google Earth Engine [J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 202: 166–176.
- [21] Tian L, Li Y, Shao L, et al. Measuring spatio-temporal characteristics of city expansion and its driving forces in Shanghai from 1990 to 2015[J]. Chinese Geographical Science, 2017, 27(6): 875–890.
- [22] Zhao J, Guo W, Huang W, et al. Characterizing spatiotemporal dynamics of land cover with multi-temporal remotely sensed imagery in Beijing during 1978–2010[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2014, 7(10): 3945–3959.
- [23] 陈颖彪, 周倩仪, 陈健飞. 近30年广州市土地覆被变化时空特征分析[J]. 地理科学, 2009, 29(3): 368–374. [Chen Y B, Zhou Q Y, Chen J F. Spatio-temporal characteristics of land use and cover change in Guangzhou city in the past 30 years[J]. Scientia Geographica Sinica, 2009, 29(3): 368–374.]
- [24] 田美玲, 方世明. 国家中心城市研究综述[J]. 国际城市规划, 2015, 30(2): 71–74. [Tian M L, Fang S M. A review on the research of national central cities[J]. Urban Planning International, 2015, 30(2): 71–74.]
- [25] 戴德艺, 饶映雪, 刘殿锋, 等. 1989–2015年武汉市城市格局时空演变分析[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(10): 1545–1554. [Dai D Y, Rao Y X, Liu D F, et al. Study on spatiotemporal evolution of urban expansion: A case study of Wuhan during 1989–2015[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(10): 1545–1554.]
- [26] 罗妮, 刘耀林, 孔雪松. 武汉市城乡建设用地时空演变及驱动机制研究: 基于城乡统筹视角[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(4): 461–467. [Luo T, Liu Y L, Kong X S. Spatiotemporal characteristics and the driving mechanism of urban-rural construction land changes in Wuhan: Based on the perspective of urban-rural integration[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(4): 461–467.]
- [27] Shen H, Huang L, Zhang L, et al. Long-term and fine-scale satellite monitoring of the urban heat island effect by the fusion of multi-temporal and multi-sensor remote sensed data: A 26-year case study of the city of Wuhan in China[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 172: 109–125.
- [28] Yang B, Ke X. Analysis on urban lake change during rapid urbanization using a synergistic approach: A case study of Wuhan, China [J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2015, 89–90: 127–135.
- [29] 李全, 李腾, 杨明正, 等. 基于梯度分析的武汉市生态系统服务价值时空分异特征[J]. 生态学报, 2017, 37(6): 2118–2125. [Li Q, Li T, Yang M Z, et al. Spatiotemporal variation of ecosystem services value based on gradient analysis in Wuhan: 2000–2010 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(6): 2118–2125.]
- [30] Xie H, Chen Q, Lu F, et al. Spatial-temporal disparities, saving potential and influential factors of industrial land use efficiency: A case study in urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River[J]. Land Use Policy, 2018, 75: 518–529.
- [31] 佟香宁, 杨钢桥, 李美艳. 城市土地利用效益综合评价指标体系与评价方法: 以武汉市为例[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2006, (4): 53–57. [Tong X N, Yang G Q, Li M Y. The evaluation index and method of urban land use efficiency: A case study in Wuhan city[J]. Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition), 2006, (4): 53–57.]
- [32] 全国农业区划委员会. 土地利用现状调查技术规程[M]. 北京: 中国农业出版社, 1984. [National Committee for Agricultural Regionalization. Technical Regulations for Land Use Survey[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1984.]
- [33] 中华人民共和国国土资源部. 第二次全国土地调查技术规程 (TD/T 1014–2007) [M]. 北京: 中国标准出版社, 2007. [Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. Technical Regulations of the Second China Land Census (TD/T 1014–2007) [M]. Beijing: Standards Press of China, 2007]
- [34] Gong J, Yang J, Tang W. Spatially explicit landscape-level ecological risks induced by land use and land cover change in a national ecologically representative region in China[J]. International journal of environmental research and public health, 2015, 12(11): 14192–14215.
- [35] 中华人民共和国国土资源部. 全国土地分类(过渡期适用)[M]. 北京: 中国标准出版社, 2002. [Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. Land Use/Cover Classification System (Trial Version) [M]. Beijing: Standards Press of China, 2002.]
- [36] 张杨, 刘艳芳, 顾渐萍, 等. 武汉市土地利用覆被变化与生态环境效应研究[J]. 地理科学, 2011, 31(10): 1280–1285. [Zhang Y, Liu Y F, Gu J P, et al. Land use/land cover change and its environmental effects in Wuhan city[J]. Scientia Geographica Sinica,

2019年4月

- 2011, 31(10): 1280–1285.]
- [37] 武汉市统计局. 武汉统计年鉴 2016[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016. [Bureau of Statistics of Wuhan. Wuhan Statistical Yearbook-2016[M]. Beijing: China Statistic Press, 2016.]
- [38] 湖北省统计局. 湖北省统计年鉴 2016[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016. [Bureau of Statistics of Hubei. Hubei Statistical Yearbook-2016[M]. Beijing: China Statistic Press, 2016.]
- [39] Pontius R, Gao Y, Giner N, et al. Design and interpretation of intensity analysis illustrated by land change in central kalimantan, Indonesia[J]. *Land*, 2013, 2(3): 351–369.
- [40] 许丽丽, 李宝林, 袁焯城, 等. 2000–2010 年中国耕地变化与耕地占补平衡政策效果分析[J]. *资源科学*, 2015, 37(8): 1543–1551. [Xu L L, Li B L, Yuan Y C, et al. Changes in China's cultivated land and the evaluation of land requisition-compensation balance policy from 2000 to 2010[J]. *Resources Science*, 2015, 37(8): 1543–1551.]
- [41] 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 等. 20 世纪 80 年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局[J]. *地理学报*, 2014, 69(1): 3–14. [Liu J Y, Kuang W H, Zhang Z X, et al. Spatiotemporal characteristics, patterns and causes of land use changes in China since the late 1980s[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(1): 3–14.]
- [42] Kai X, Chunfang K, Gang L, et al. Changes of urban wetlands in Wuhan, China, from 1987 to 2005[J]. *Progress in Physical Geography*, 2010, 34(2): 207–220.
- [43] Duan G, Niu R. Lake area analysis using exponential smoothing model and long time-series Landsat images in Wuhan, China[J]. *Sustainability*, 2018, DOI: 10.3390/su10010149.
- [44] 曾忠平, 卢新海. 城市湖泊时空演变的遥感分析: 以武汉市为例[J]. *湖泊科学*, 2008, 20(5): 648–654. [Zeng Z P, Lu X H. Spatial-temporal evolution of urban lakes in Wuhan City based on remote sensing images[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2008, 20(5): 648–654.]
- [45] 马才学, 孟芬, 赵利利. 1990–2005 年武汉市土地利用时空变化及其政策驱动因素分析[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(2): 117–122. [Ma C X, Meng F, Zhao L L. Analysis on spatiotemporal change of land use and its policy-driven factor in Wuhan City from 1990 to 2005[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22(2): 117–122.]
- [46] 胡贤辉, 杨钢桥, 张霞, 等. 农村居民点用地数量变化及驱动机制研究[J]. *资源科学*, 2007, 29(3): 191–197. [Hu X H, Yang G Q, Zhang X, et al. The change of land use for rural residency and the driving forces: A case study on Xiantao City, Hubei Province[J]. *Resources Science*, 2007, 29(3): 191–197.]
- [47] Long H, Wu X, Wang W, et al. Analysis of urban-rural land-use change during 1995–2006 and its policy dimensional driving forces in Chongqing, China[J]. *Sensors*, 2008, 8(2): 681–699.
- [48] Xu Q, Yang R, Dong Y-X, et al. The influence of rapid urbanization and land use changes on terrestrial carbon sources/sinks in Guangzhou, China[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 70: 304–316.
- [49] Li Y, Liu G. Characterizing spatiotemporal pattern of land use change and its driving force based on GIS and landscape analysis techniques in Tianjin during 2000–2015[J]. *Sustainability*, 2017, DOI: 10.3390/su9060894.

Stationary and systematic characteristics of land use and land cover change in the national central cities of China using intensity analysis: A case study of Wuhan City

YANG Jianxin¹, GONG Jian^{1,2}, GAO Jing¹, YE Qin^{1,3}

(1. School of Public Administration, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China;

2. Key Laboratory of Legal Assessment Project, Ministry of Land and Resources, Wuhan 430074, China;

3. Institute of Qinghai Land Surveying and Planning, Xining 810008, China)

Abstract: We revised the intensity analysis framework proposed by Aldwaik and then applied it to examine the temporal stationary and systematic characteristics of land use and land cover change (LULCC) patterns in the national central cities of China. This hierarchical framework analyzes LULCC at three levels: time interval, category, and transition, based on land use change confusion matrices. Given the inconvenience of transition level intensity analysis in presenting the detailed pattern of LULCC across multiple time intervals, we put forward a new method termed as land transition pattern confusion table to systematically show all the land conversion processes in one figure so as to help link LULCC process to pattern and clarify their driving mechanisms from a bottom-up perspective. Taking Wuhan City as a case study area, this article analyzes the stationary and systematic characteristics of LULCC patterns from 1996 to 2015 with the improved framework. Also, LULCC patterns in other national central cities in recent years were investigated. The results show that the overall LULCC intensity in Wuhan City increased in recent years. The influx of rural residential land, urban construction land, and farmland intensified. The efflux of farmland, water, and unused land grew as well. Notably, the transition from farmland to urban construction land and to rural residential land is characterized by a stable and systematic change pattern. The LULCC patterns and processes in different national central cities show great similarity. This improved intensity analysis framework can be more intuitive in reflecting the stationary and systemic characteristics of LULCC pattern. The research results can play an important role in illustrating LULCC patterns in the national central cities and facilitate linking processes and mechanisms to these observed patterns.

Key words: intensity analysis; land use and land cover change; land transition matrix; pattern and process; driving mechanism; the national central cities of China; Wuhan City