
基于 SOM 神经网络模型的耕地非农化压力区域差异研究——以湖北省为例¹

马才学 温槟荧 柯新利

(华中农业大学公共管理学院, 湖北武汉 430070)

【摘要】:基于 2006–2014 年湖北省 16 市的面板数据, 从经济因素、社会因素和资源禀赋三方面构建湖北省耕地非农化压力评价指标体系, 运用 SOM 神经网络模型对湖北省的耕地非农化压力区域差异进行实证分析。结果表明: (1) 湖北省 16 个主要城市的耕地非农化压力存在一定的区域差异。2006 年以西南、东北地区往省内中部地区递减; 2008 年其区域差异变化不大; 2010 年则从西南-东北走向往边缘化发展; 2012 年呈现以武汉市、宜昌市为耕地非农化高压中心并辐射周边城市, 形成了两条共同发展的平行线; 直至 2014 年, 武汉市耕地非农化压力趋于平缓, 武汉市周边小城市的耕地非农化压力有小幅上升。(2) SOM 神经网络模型具有较强的聚类 and 容错能力, 适用于开展耕地非农化压力的区域差异研究。研究结果反映了湖北省耕地非农化压力的空间异质性, 为土地资源区际优化配置提供了基础。

【关键词】: SOM 神经网络; 耕地非农化; 压力; 区域差异

【中图分类号】: F 301.2 **【文献标识码】**: A **【文章编号】**: 1008-3456(2017)04-0109-09

DOI 编码: 10.13300/j.cnki.hnwkxb.2017.04.015

改革开放 30 多年来, 经济快速发展、工业化和城镇化快速推进以及人口快速增长引起建设用地与耕地利用之间的竞争, 导致耕地非农化压力的提高。同时, 由于社会经济发展和资源禀赋的区域差异, 耕地非农化压力也表现出明显的空间异质性, 理清耕地非农化的区域差异是实现土地资源优化配置的基础。

国内外针对耕地非农化的研究主要集中于耕地非农化的驱动力、耕地非农化与粮食安全、耕地非农化时空变化等方面^[1-2]。在耕地非农化的驱动力方面: Zhai 等认为导致耕地非农化的本质是经济和技术, 他们认为导致上海市土地利用变化的主导因素是固定资产投资和土地利用政策^[3]; Lee 认为建设用地需求量的增加是耕地非农化的诱因, 利用者的主观性、地区政策及自然禀赋的优越性引起了郊区的土地利用方式改变^[4]; Deng 等在快速城镇化进程中, 非农人口、外商直接投资、GDP、产业结构和总人口等因素皆会对耕地非农化产生影响^[5]; 张基凯等利用山东省 17 个地级市的面板数据研究山东省耕地非农化与经济增长的关系, 结果显示耕地非农化与经济发展水平、二、三产业结构、城市化水平等因素相关^[6]; 苑韶峰等以采用“STIRPAT”模型和地理加

¹ 收稿日期: 2016-10-18

基金项目: 国家自然科学基金项目“城市群城镇用地扩张多尺度耦合机理研究”(41101098); 国家自然科学基金项目“城镇用地扩张与耕地功能演变的时空耦合机理研究——以武汉市为例”(41371113); 国家社会科学基金青年项目“基于生产力总量平衡的耕地区域布局优化及补偿机制研究”(13CGL092)。

作者简介: 马才学(1961-), 男, 教授, 博士; 研究方向: 土地信息技术。

通讯作者: 柯新利(1977-), 男, 教授, 博士; 研究方向: 土地利用与管理。

权回归模型(GWR)对耕地非农化的社会经济驱动因素异质性做了实证分析,结果表明富裕度、第三产业比重、人口数量和城市化水平等社会经济因素影响着耕地非农化,并对其有空间异质性^[7];张光宏等利用固定效应面板模型说明了城镇人口和固定资产投资对耕地非农化有正向作用,资源禀赋也存在空间异质性^[8];朱新华等利用 Granger 因果分析方法表明了收入差距一定程度影响了耕地非农化,收入差距作用于经济发展,经济发展作用于耕地非农化^[9]等。在分析耕地非农化的方法方面:基于 SOM 神经网络模型的算法已经广泛应用于各领域,包括地理信息科学^[10]、耕地利用^[11-12]等。van 等利用 SOM 神经网络模型对农业景观进行分类分析^[13];Shanmuganathan 等利用 SOM 神经网络模型,利用数据集对生态经济系统的等级权衡分析^[14];李春华等从经济、社会和生态三方面考虑耕地利用压力,并采用 SOM 神经网络模型对中国 31 省的耕地利用压力进行分类分析,结果显示了耕地压力区域差异与经济地域差异高度相关^[12];胡永进等从投入强度、利用强度和利用效率等 3 个方面构建湖北省耕地利用集约度的指标体系,并采用 SOM 神经网络进行分区,结果表明江汉平原腹地的集约程度较高^[11];张孝宇等利用 Arcgis 软件的空间分析功能,拟合出武汉市耕地非农化扩散路径、GDP 重点变化路径和人口重心变化路径,南北向的路径移动方向大致为北-南-北,东西向路径则是西-东;武汉市耕地非农化与经济、人口之间的相关性表明了武汉市的耕地非农化在空间上是有序发展的^[15]。

湖北省是我国重要的粮食生产基地,耕地数量占全国耕地面积的 5.81%^[11]。从 2006-2014 年内耕地减少的数量中,因为国家基础设施建设占用的数量年均比例达到 39.54%。湖北省总人口由 2006 年的 6 038.3 万人增加到 2014 年的 6 162.3 万人;湖北省建成区面积 2006 年为 1040 平方千米,直到 2013 年的 1416 平方千米,其建成区面积逐年扩大。根据遥感影像数据,1990 年湖北省耕地面积为 70301.966 4 平方千米,1995 年耕地面积为 69371.595 9 平方千米,2000 年其耕地面积变为 69670.2024 平方千米,2005 年湖北耕地面积变为 68867.4411 平方千米,2010 年的耕地面积为 62342.8722 平方千米。经济高速发展、工业化和城镇化大力推进以及人口数量的快速增长导致建设用地占用耕地的数量逐年递增,对耕地资源造成了严重威胁,耕地非农化的压力形势依然严峻。此外,由于各区域的社会经济发展水平不同和自然资源禀赋的空间异质性,湖北省耕地非农化压力存在着区域差异。因此,本文以湖北省为研究区域,开展了耕地非农化压力的区域差异研究,以期对湖北省的土地资源的合理配置提供科学依据。

一、研究区域与数据来源

1. 研究区域

湖北省位于 29° 05' N 至 33° 20' N, 108° 21' E 至 116° 07' E, 东部与安徽接壤,东南和湖南、江西相邻,西临重庆,西北和陕西相邻,北边和河南相靠^[11](图 1)。

二、研究方法

1. 耕地非农化压力指标体系构建

(1) 指标体系的构建思路和指标选取。经济因素诸如富裕度^[5-7, 9]、固定资产投资^[8, 16-17]、产业结构^[5-7, 17]等, 社会因素诸如人口^[5, 7-8, 16-17]、城市化水平^[6-7]等, 资源禀赋^[4, 8, 16]皆存在空间异质性, 亦对耕地非农化产生影响, 因此耕地非农化也存在一定的区域差异。由于湖北省的地势地貌种类多样, 各区域原有的建成区面积也会对耕地非农化压力产生影响, 湖北省 16 市的经济、社会、资源环境等皆存在空间异质性, 随之亦会导致湖北省 16 市的耕地非农化压力也存在空间异质性。

本文根据前人的研究^[4-9, 12, 16-17], 综合考虑数据的可获得性, 从经济、社会和资源禀赋三个方面构建指标体系开展湖北省耕地非农化压力的区域差异研究。

经济因素中选取了非农产业生产总值比、全社会固定资产投资、地区生产总值、财政收入、社会消费品零售总额五个指标。其中地区生产总值、财政收入、社会消费品零售总额能反应一地的富裕度, 全社会固定资产投资指标反应的是占用的土地数量, 非农产业生产总值比反应各地区二三产业的发展程度。

社会因素中主要考虑人口问题, 人口的密集程度和城市人口的比重一定程度上影响了土地压力, 城市从业人口比例较高时, 该地区从事第一产业的人口较低。因此, 社会因素选取了常住人口、城市人口比、建成区人口密度三个指标。

资源禀赋因素选取了地均城市基本建设投资、地均从业人数、人口用地反应系数、建成区面积的地均 GDP 四个指标。其中, 地均城市基本建设投资指标反映各地(市)的城镇化水平; 地均从业人数反应各地区的二、三产业的发展水平; 人口用地反应系数反应人口增长的速率与建成区面积增长速率比; 建成区面积的地均 GDP 反映耕地转换为建设用地可以带来的经济收益(表 1)。

表 1 湖北省耕地非农化压力分级指标体系

目标层	准则层	指标层	指标说明
湖北省耕地 非农化压力 区域差异	经济因素	地区生产总值/亿元	二、三产业生产总值/地区生产总值
		全社会固定资产投资/亿元	
		非农产业生产总值比	
		社会消费品零售总额/亿元	
		财政收入/亿元	
	社会因素	常住人口/万人	城镇人口/总人口
		人口城镇化	年末常住人口/建成区面积
		建成区人口密度/(万人/km ²)	
	资源禀赋因素	地均城市基本建设投资/(亿元/km ²)	城市基本建设投资/建成区面积
		地均从业人数/(万人/km ²)	第二、三产业人数/建成区面积
人口与用地弹性系数		人口增长百分比/建设用地增长百分比	
地均 GDP/(亿元/km ²)		国民生产总值/建成区面积	

(2) 指标数据标准化。根据 2007-2015 年《湖北省统计年鉴》得到 2006-2014 年湖北省各地级市(区)地区生产总值, 全社会固定资产投资, 第二、三产业的生产总值, 社会消费品零售总额, 财政收入, 常住人口, 城市基本建设投资, GDP 的数据; 根据同期的《中国城市统计年鉴》、《中国城市建设统计年鉴》得到城市人口、建成区面积的数据; 根据《中国统计年鉴》得到

第二、三产业从业人数的数据。据此计算得到湖北省各地市耕地非农化压力分级的指标分值。指标分数量纲之间的差异会对计算结果产生较大的影响。因此，需要对各指标数据进行标准化处理。本研究选取的指标均为正向指标，可直接采用下式(1)对各指标分值进行标准化处理：

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (1)$$

式(1)中， x'_{ij} 为处理之后的标准值， x_{ij} 为处理之前的标准值， x_{\min} 为处理之前该指标值中的最小值， x_{\max} 为处理之前该指标值中的最大值。本研究中的数据标准化到[0, 1]区间内，经过处理，可以得到2006年、2008年、2010年、2012年、2014年湖北省耕地非农化压力分级指标的标准化值。

2. SOM 神经网络

(1) SOM 神经网络的基本原理。SOM 神经网络模型是无导师聚类模型，本质是根据一定的聚类准则将数据聚类，其主要目的是区分不同数据的类别，将湖北省耕地非农化压力程度分成四个级别，分类结果较好，符合实际情况。根据聚类结果，结合指标体系分析湖北省耕地非农化的压力大小。从经济、社会、自然禀赋三个方面分析湖北省耕地非农化压力区域差异，得出影响湖北省耕地非农化的因子。

运用 SOM 的聚类功能，输入一组湖北省耕地非农化压力指标样本(训练样本)，通过 SOM 的自组织竞争学习，对湖北 16 个市(区)样本(测试样本)进行分类。

设 SOM 网络的输入模式为 $A_k = (a_1^k, a_2^k, a_3^k, \dots, a_n^k), k = 1, 2, \dots, p$ ；输出层神经元向量为 $B_j = (b_{j1}, b_{j2}, b_{j3}, \dots, b_{jm}), j = 1, 2, \dots, m$ ；其中 A_k 表示第 k 个湖北省耕地非农化压力样本信息， n 为湖北省耕地非农化压力评价指标的数量， p 为湖北省 16 个市(区)样本总数。SOM 网络的连接权值为 $\{w_{ij}\}, i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, 3, \dots, m$ 。

(2) SOM 神经网络模型的构建。①创建自组织映射模型；本研究所构建的 SOM 神经网络模型包含了 16 个训练样本(武汉市、黄石市、十堰市、荆州市、宜昌市、襄阳市、鄂州市、荆门市、孝感市、黄冈市、咸宁市、恩施市、随州市、仙桃市、天门市、潜江市)，12 个属性(非农产业生产总值比、全社会固定资产投资、地区生产总值、财政收入、社会消费品零售总额、常住人口、城市人口比、建成区人口密度、地均城市基本建设投资、地均从业人数、人口与用地弹性系数、建成区面积的地均 GDP)。使用 `net=newsom()` 构建一个新的 SOM 神经网络模型，运行“`net=newsom(minmax(P), [2 2])`”；，创建输出层为 2×2 模式的自组织映射的神经网络结构。等级的划分不宜过粗也不宜过细，根据陈园园等建立辽中南城市群的 SOM 神经网络模型的分级结果^[18]，结合本文的 16 个城市样本进行模拟分析，综合现实状况，将湖北省 16 市的耕地非农化压力等级分为 4 级。

②训练网络；`net=train(net, P)`。从训练样本中选出某一个城市 x_i ，衡量 x_i 的各个指标与其他的城市的区别，从其中选出和样本 x_i 差距最小的城市 x_j ，得出所有城市中的最佳匹配节点(Best-Match-Unit, BMU)，记为 $mc(2)$ ：

$$\|x_k - m_c\| = \min_i \{ \|x_k - m_i\| \} \quad (2)$$

用式(3)来决定最佳的匹配单元中的一个拓扑邻域值，调节 BMU 的选择及邻域内节点的权值；

$$m_i(t+1) = m_i(t) + \alpha(t)h_{ci}(t)[x(t) - m_i(t)] \quad (3)$$

其中： $m_i(t)$ 表示的是第 t 步的第 i 个节点的权值， $\alpha(t)$ 是第 t 步的学习速率， $0 < \alpha(t) < 1$ ， $h_{ci}(t)$ 是领域函数。

③网络仿真：用 sim 函数 $y = \text{sim}(\text{net}, P)$ 进行仿真，得到耕地非农化压力的分区结果。

三、研究结果

本文采取上述构建的 SOM 模型，从而实现湖北省 16 个市的耕地非农化压力区域差异分类，得到湖北省 16 个市的 2006-2014 年耕地非农化压力分级数据结果(图 2)，1 代表的是一级压力区，即耕地非农化压力最高的区域，依次递减。图 2 显示了孝感、黄冈和恩施的耕地非农化压力一直最高，武汉和宜昌次之，鄂州、随州、天门和潜江则较低；武汉和咸宁的耕地非农化压力在 2014 年时出现下降；荆州、襄阳、荆门、鄂州、仙桃和潜江的耕地非农化压力皆有所升高，其中荆州升高明显。图 2 较明显地显示了 2006-2014 年湖北省 16 个市的耕地非农化压力趋势，但为了更清晰直观地辨别湖北省 16 个市的耕地非农化压力区域差异，需将分类后的每一类压力级别的城市经 Arcmap 软件处理调整，得出区域差异图示(图 3-图 7)。

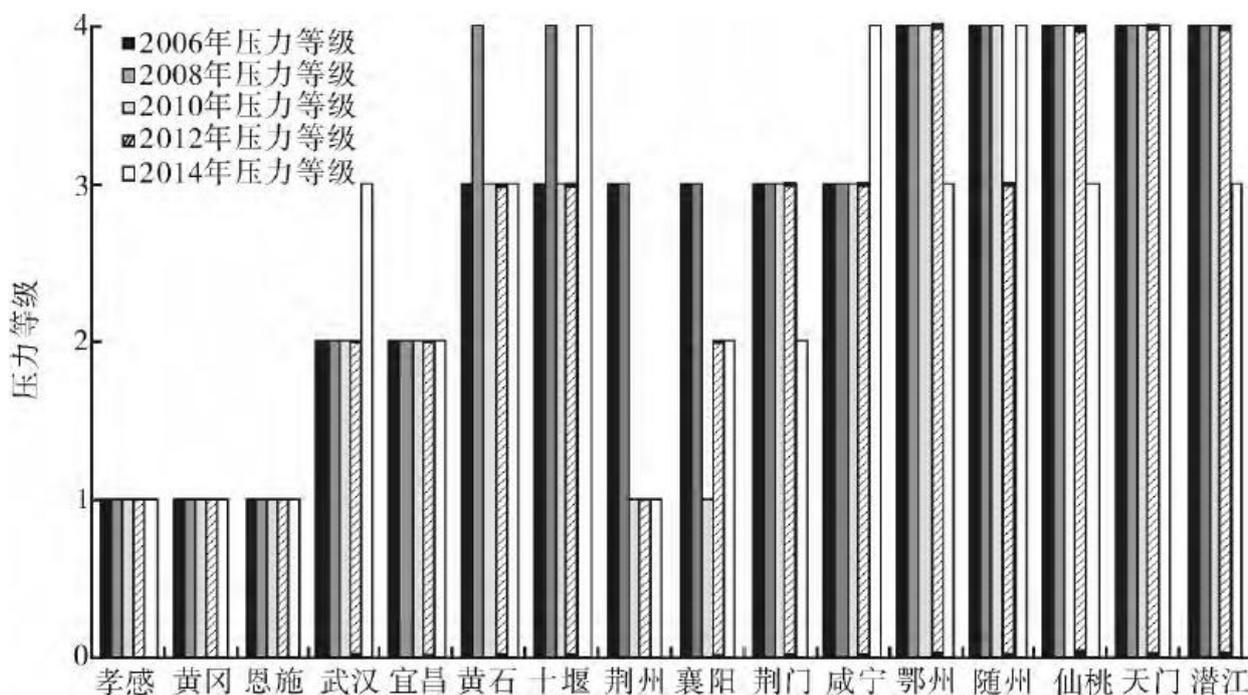


图 2 2006—2014 年湖北省 16 市耕地非农化压力趋势

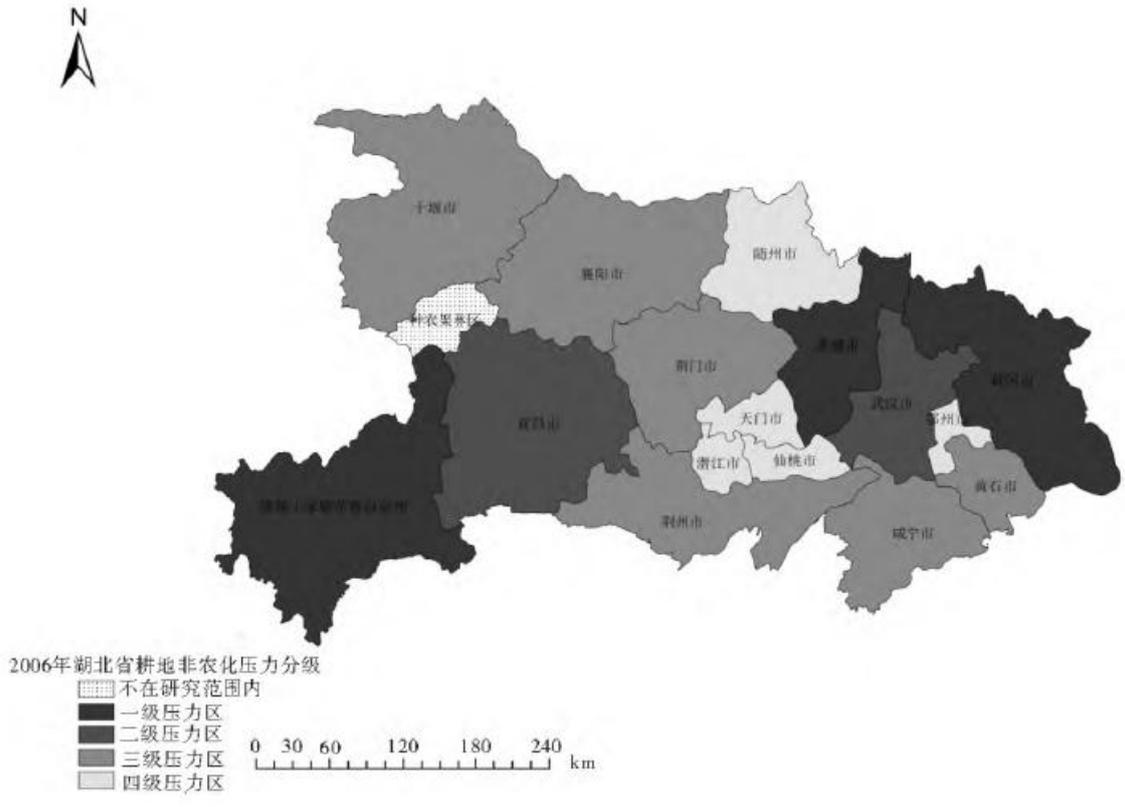


图 3 2006 年湖北省耕地非农化压力分级区域结果

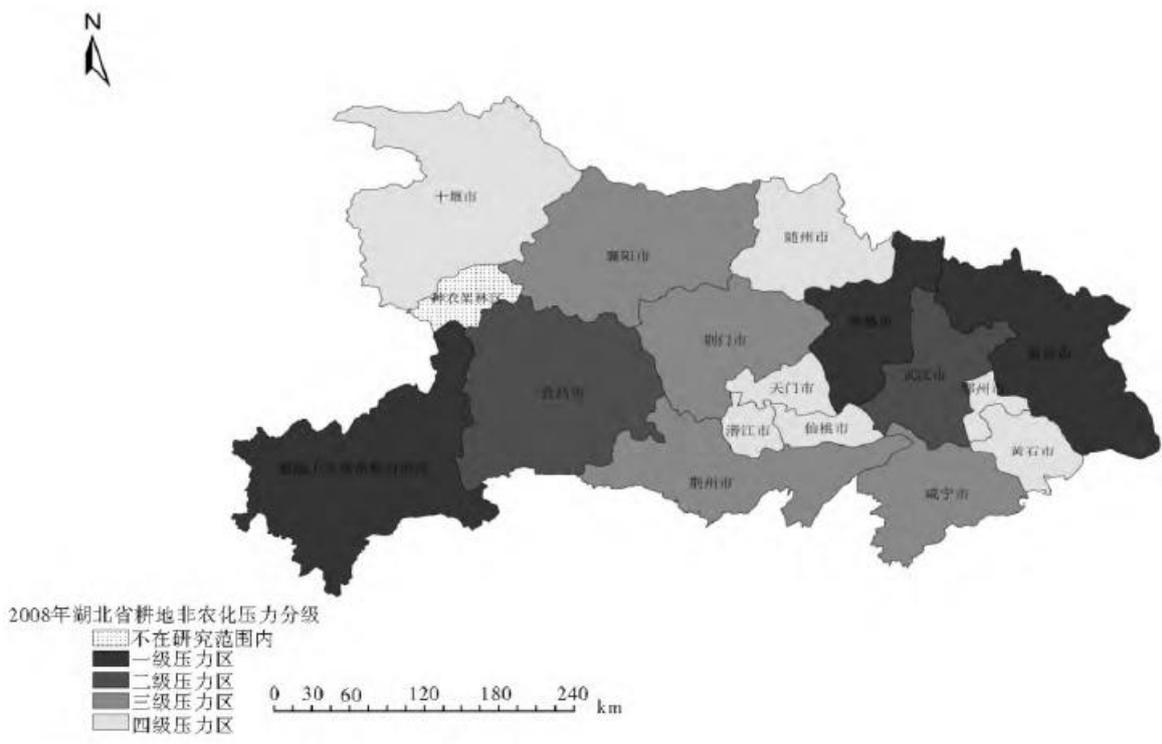


图 4 2008 年湖北省耕地非农化压力分级区域结果

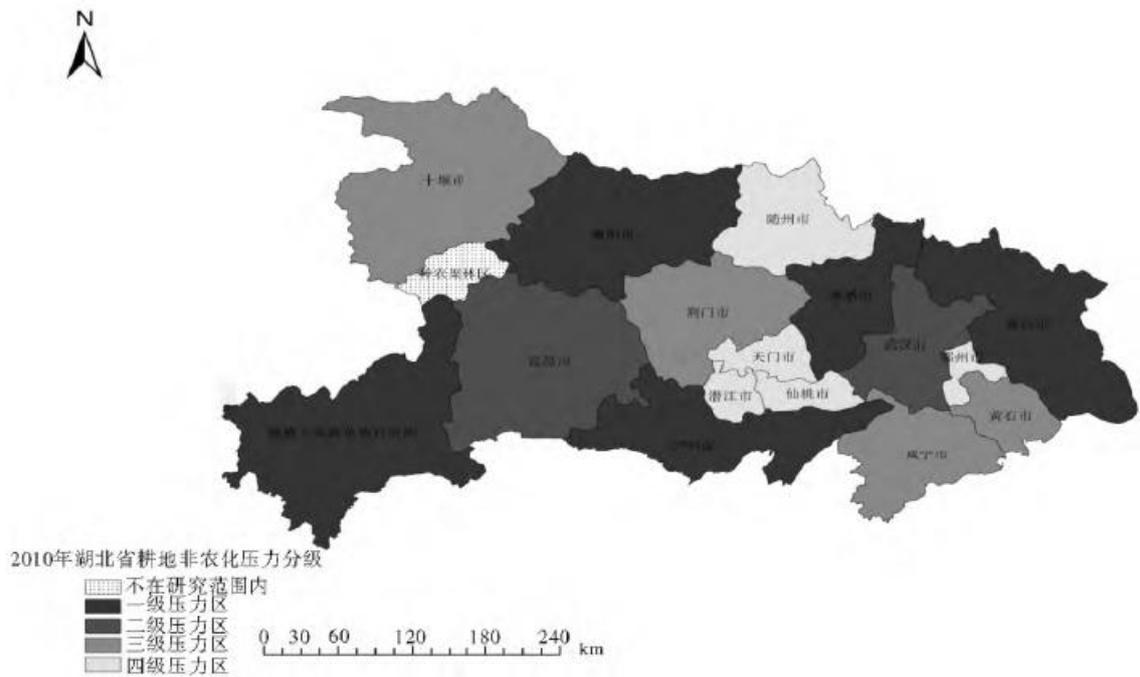


图 5 2010 年湖北省耕地非农化压力分级区域结果

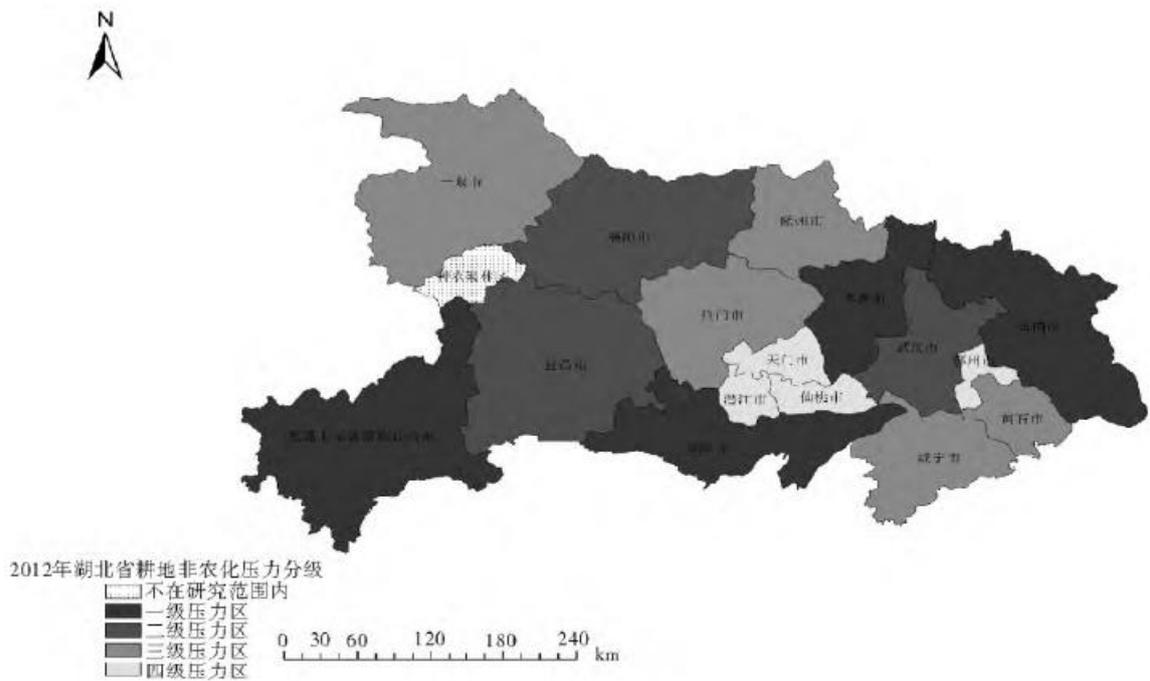


图 6 2012 年湖北省耕地非农化压力分级区域结果

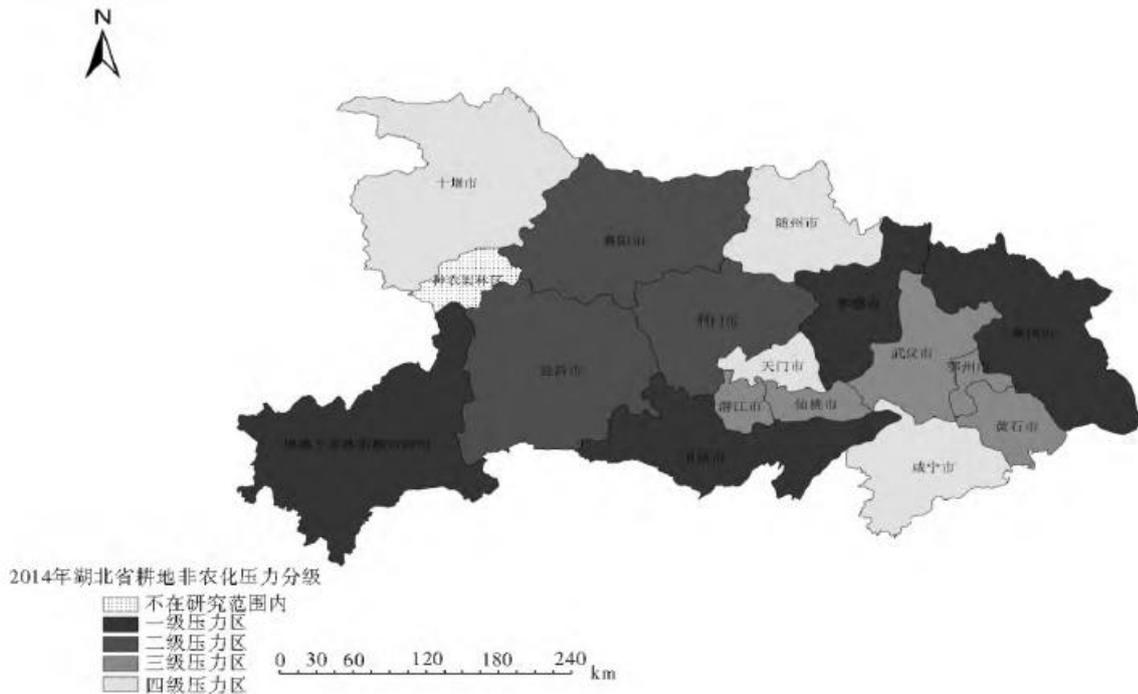


图 7 2014 年湖北省耕地非农化压力分级区域结果

从湖北省 16 市的耕地非农化压力程度分析: (1) 第一类区域的非农产业生产总值比、常住人口、建成区人口密度、地均从业人数、地均 GDP、地均基本建设投资等六项指标较大, 非农产业生产总值比以及地均从业人数能较好地反映该城市的产业发展状况, 这两项指标越大, 证明该城市的非农产业较发达, 越需要将耕地非农化, 以加大非农产业发展。说明了这一区域耕地非农化压力较高, 为耕地非农化压力一级压力区。(2) 第二类区域的非农产业生产总值比、地均 GDP、地均基本建设投资较大, 地区生产总值、全社会固定资产投资、社会消费品零售总额、财政收入等经济指标次之, 经济因素对耕地非农化产生了一定的影响, 但是其影响不足以自然禀赋给耕地非农化带来的效应。所以此类区域耕地非农化压力略低于上一个分类, 但仍处耕地非农化压力较大的状态, 为耕地非农化压力二级压力区。(3) 第三类区域的指标值位于中间地位, 自然禀赋因素较第四类稍大, 该类耕地非农化压力较低, 为耕地非农化压力三级压力区。(4) 第四类区域的经济水平较低, 常住人口较少, 已有的建成区面积尚可平衡人地关系, 所以其耕地非农化压力最低, 为耕地非农化压力四级压力区。

从耕地非农化压力随时间变化的情况分析: (1) 2008 年黄石、十堰在该年的耕地非农化压力降低, 主要原因是人口与用地弹性系数、地均 GDP、地均基本建设投资三项指标较 2006 年有所降低。进一步说明了自然禀赋因素对湖北省的耕地非农化有着较大的影响。(2) 对比 2006 年、2008 年, 2010 年时荆州、襄阳的常住人口、人口与用地弹性系数指标加快幅度较大, 导致耕地非农化压力变大, 成为一级压力区。侧面反映了社会因素对湖北省耕地非农化压力有影响。(3) 与 2006 年、2008 年、2010 年对比, 2012 年时荆州的全社会固定资产投资、建成区人口密度、人口与用地弹性系数、地均 GDP 和地均基本建设投资较之升高, 导致其耕地非农化压力增加; 随州的地均 GDP、地均基本建设投资较大, 导致其耕地非农化压力增加; 2012 年时襄阳的建成区人口密度、地均从业人数、人口与用地弹性系数比较 2010 年时稍有降低, 影响了耕地非农化, 使耕地非农化压力先增大后减小。进一步反映了区域经济和资源禀赋对湖北省的耕地非农化压力产生较大的影响。(4) 较 2012 年, 2014 年时荆门的耕地非农化压力变大, 其中地均基本建设和地均 GDP 较以往有所增加, 该城市的经济发展速率逐渐增加, 促使荆门的耕地非农化利用。由于其他的城市逐渐发展, 武汉的常住人口增速较慢, 建成区人口密度和地均非农产业从业人数较小, 苑韶峰等验证了经济较发达的地区随着城市化水平的提高在一定程度上减弱了耕地非农化的压力^[7], 因此武汉的耕地非农化压力降低。恩施的山区面积较大, 其已有的建成区面积较小, 常住人口较多, 导致建成区人口密度较大, 为了满足人们的生活需求, 需要增加建设用地, 所

以其耕地非农化压力常年处于高压状态。

对湖北省耕地非农化压力进行时空差异分析,压力区域分为两大类:第一大类中大部分城市是湖北省的重要城市,这部分城市经济基础较高,历史悠久,拥有丰富的人文风情,也是湖北省人口密度较高的城市;第二大类主要是湖北省经济欠发达的地区,有部分是刚成立的城市,城镇化水平较低。结果说明了耕地非农化压力的地域差异与经济发展程度、人口密度、建成区地均产值三者密切相关。

2006年湖北省的耕地非农化压力大小从西南、东北地区往省内中部地区递减;2008年湖北省的耕地非农化压力大小变化的整体走势与2006年差别不大,仅十堰市和黄石市的压力略有降低;2010年湖北省的耕地非农化压力大小呈现从西南、东北走向往边缘化发展的格局。全省的边缘城市的耕地非农化程度变大或者不变;2012年湖北省的耕地非农化压力大小呈现以武汉市、宜昌市为耕地非农化高压中心 and 连接处,辐射周边城市,使周边城市的耕地非农化级别递减的格局,形成了两条共同发展的平行线。直至2014年,武汉市建成区面积增速减缓,使之耕地非农化压力趋于平缓,武汉市周边的小城市逐渐发展,在武汉市的带领下,非农产业数量增加,使之耕地非农化压力有小幅上升。从2006-2014年,湖北省的耕地非农化压力格局产生了变化,2006-2010年间湖北省各市的耕地非农化压力以西南、东北地区最高,边缘城市次之;2010-2014年间,湖北省各市的耕地非农化压力从边缘化格局往中部地区转移(图3-图7)。

四、结论与讨论

1. 结论

本文考虑了经济因素、社会因素和资源禀赋3个方面对湖北省耕地非农化压力产生的影响,利用2006年、2008年、2010年、2012年和2014年的湖北省16市的面板数据,基于SOM神经网络模型对湖北省的耕地非农化压力进行区域差异研究,结果表明湖北省16个主要城市的耕地非农化压力存在一定的区域差异。

(1)从2006-2014年,湖北省的耕地非农化压力区域差异主要呈现两阶段变化,2006-2010年间湖北省16市的耕地非农化压力以西南、东北地区最高,边缘城市次之;2010-2014年间,湖北省各市的耕地非农化压力从边缘化格局往中部地区转移。分类结果说明了耕地非农化压力的区域差异与经济发展程度、人口密度和建成区地均产值密切相关。其中非农产业生产总值比、常住人口、建成区人口密度、地均从业人数、人口与用地弹性系数、地均GDP、地均基本建设投资等7种因素对耕地非农化的影响最大。

(2)经济的快速发展,无法避免非农产业的增加,但区域资源具有有限性,因此城市的建成区面积也不会一味加大。又因为耕地的流失与粮食安全和生态环境密切相关,耕地非农化的速度需要控制,可以通过提高耕地利用集约度,将细碎化或荒废的耕地规模经营,以期提高耕地的生产效率、经济功能和社会保障功能,让人们提高对耕地的认识,并主动选择第一产业,从而降低耕地非农化压力。其次在不影响城市经济发展的情况下,可以通过减少耕地非农化压力大的区域的常住人口数量,刺激人口流出,降低人口密度,还需要进一步完善土地利用规划,以期控制各区域的基本建设投资,以期来减弱耕地非农化压力。

(3)结果和现实统一表明了SOM模型是一种可用来研究耕地非农化压力区域分类的新方法。本文采用SOM模型对湖北省耕地非农化程度进行了分类,分类结果符合现实情况。

2. 讨论

(1)本研究还有部分待完善之处。本文运用SOM模型对湖北省16个主要城市的耕地非农化压力进行分类,分类结果符合现实状况,SOM神经网络模型为耕地非农化压力程度分级管理提供了合理的方法,并可以推广到分析我国各个省份的耕地非农化

压力程度。然而，耕地非农化的水平是动态变化的，耕地非农化程度的分级也应该是动态的。在基于 SOM 模型条件下，深入探讨耕地非农化程度的动态变化的分级情况是至关重要的，也能更好地运用资源来发展经济，保护粮食和生态安全。

(2)影响耕地非农化的因子问题。本文耕地非农化指标主要从该市(区)经济、人口和社会三个大方面出发。该指标的选取并不一定是最全面的。在今后的研究中，需要进一步研究发现符合各地区实际情况的影响因素，形成较标准的指标体系，以完善分类结果。

参考文献:

- [1] 郝飞飞, 黄楚兴. 耕地非农化研究综述[J]. 中国集体经济, 2012, 4(2):93-93.
- [2] 吴先华. 耕地非农化研究综述[J]. 地理与地理信息科学, 2006, 22(1):51-56.
- [3] ZHAI G F, IKEDA S. An empirical model of land use change in China[J]. *Reviews of urban & regional development studies*, 2000, 12(1):36-53.
- [4] LEE L. Factors affecting land use change at the urban-rural fringe[J]. *Growth and change*, 1979, 10(4):25-31.
- [5] DENG X, HUANG J, ROZELLE S, et al. Impact of urbanization on cultivated land changes in China[J]. *Land use policy*, 2015(45):1-7.
- [6] 张基凯, 吴群, 黄秀欣. 耕地非农化对经济增长贡献的区域差异研究——基于山东省 17 个地级市面板数据的分析[J]. *资源科学*, 2010, 32(5):959-969.
- [7] 苑韶峰, 杨丽霞, 杨桂山, 等. 耕地非农化的社会经济驱动因素异质性研究——基于 STIRPAT 和 GWR 模型的实证分析[J]. *经济地理*, 2013, 33(5):137-143.
- [8] 张光宏, 崔许锋. 耕地资源非农化驱动机制及其区域差异性[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(8):1632-1640.
- [9] 朱新华, 陈利根, 王铮. 耕地非农化与收入差距关系的实证研究[J]. *地域研究与开发*, 2008, 27(3):113-116.
- [10] AGARWAL P, SKUPIN A. *Self-organising maps: applications in geographic information science*[M]. West Sussex, UK: John Wiley & Sons Ltd, 2008.
- [11] 胡永进, 张鸣峰. 基于 SOM 神经网络模型的耕地利用集约度分区研究——以湖北省为例[J]. *江苏农业科学*, 2013, 41(11):391-394.
- [12] 李春华, 李宁, 史培军. 基于 SOM 模型的中国耕地压力分类研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2007, 16(3):318-322.
- [13] VAN D, ZANDEN E H, LEVERS C, VERBURG P H, et al. Representing composition, spatial structure and management intensity of European agricultural landscapes: a new typology[J]. *Landscape and urban planning*, 2016(150):36-49.
- [14] SHANMUGANATHAN S, SALLIS P, BUCKERIDGE J. *Self-organising map methods in integrated modelling of*

environmental and economic systems[J].Environmental modelling &software, 2006, 21(9):1247-1256.

[15]张孝宇, 谢新朋, 张安录. 武汉市耕地非农化的空间非均衡发展及空间扩散路径分析[J]. 自然资源学报, 2014, 29(10):1649-1659.

[16]曲福田, 陈江龙, 陈雯. 农地非农化经济驱动机制的理论分析与实证研究[J]. 自然资源学报, 2005, 20(2):231-241.

[17]赵可, 张安录, 徐卫涛. 中国城市建设用地扩张驱动力的时空差异分析[J]. 资源科学, 2011, 33(5):935-941.

[18]陈园园, 李宁, 丁四保. 城市群空间联系能力与 SOM 神经网络分级研究——以辽中南城市群为例[J]. 地理科学, 2011, 31(12): 1461-1467.