

引用格式:曹祺文,吴健生,仝德,等.基于空间自相关的区域农地变化驱动力研究——以珠三角地区为例[J].资源科学,2016,38(4):714-727. [Cao Q W, Wu J S, Tong D, et al. Drivers of regional agricultural land changes based on spatial autocorrelation in the Pearl River Delta, China[J]. *Resources Science*, 2016, 38(4): 714-727]. DOI: 10.18402/resci.2016.04.13

# 基于空间自相关的区域农地变化驱动力研究 ——以珠三角地区为例

曹祺文<sup>1</sup>, 吴健生<sup>1,2</sup>, 仝德<sup>1</sup>, 张晓娜<sup>3</sup>, 卢志强<sup>1</sup>, 司梦林<sup>1</sup>

(1. 北京大学城市规划与设计学院城市人居环境科学与技术重点实验室, 深圳 518055;

2. 北京大学城市与环境学院资源与环境地理系地表过程与模拟教育部重点实验室, 北京 100871;

3. 天津工业大学管理学院, 天津 300387)

**摘要:**近年来,随着社会经济的快速发展,农地保护工作压力逐渐增大,掌握区域农地变化规律及其驱动力是制定可持续土地利用政策的基础。本文以珠三角地区为例,利用2000年和2010年土地利用遥感监测数据、基础地理空间数据和统计年鉴数据,分析了该区农地变化特征,然后在构建传统Logistic模型基础上引入空间自相关因子,采用AutoLogistic模型从自然、社会经济、空间距离和土地利用特征的空间自相关性等方面探讨了区域尺度农地变化驱动力。结果表明:①2000-2010年该区耕地、林地等农地以净减少为主,景观破碎度有所提高,耕地成为建设用地扩张的主要来源;②农地属性变化和土地开发强度的空间自相关性均为农地变化的重要驱动力,其他驱动力中耕地变化主要受地均GDP变化、到最近铁路的距离、总人口密度变化、年日照时数倾向率等因子影响,林地变化主要受地均GDP变化、总人口密度变化、坡度、到最近道路等因子影响;③同传统Logistic模型相比,采用能反映土地利用特征空间自相关性的AutoLogistic模型更适用于区域农地变化驱动力研究。

**关键词:**农地变化;驱动力;空间自相关;Logistic模型;AutoLogistic模型;珠三角地区

DOI: 10.18402/resci.2016.04.13

## 1 引言

土地利用/覆被变化(LUCC)不仅会引起地表下垫面性质的改变,也会对大气资源、生物多样性、水质、碳循环、生境质量等产生影响<sup>[1-3]</sup>,是全球变化研究的核心内容<sup>[4]</sup>,其中耕地、林地等农地变化又是LUCC中一个重要的问题。在追求GDP快速发展的压力下和城镇化进程不断加速的现实中,各区域普遍经历了剧烈的LUCC过程,农地成为建设用地扩张的主要来源,农地保护压力逐渐增大,土地供需矛盾越来越成为经济社会可持续发展的瓶颈<sup>[5]</sup>。为使得区域农地保护工作行之有效,制定出科学合理的保护政策,需要掌握农地变化规律,并综合考虑区

域农地变化格局自身特征,从宏观上深入研究农地变化的自然-社会经济驱动力,这也是有序推进城镇化进程和探索区域土地可持续利用路径的基础依据。

当前国内外关于农地变化的研究成果较为丰富,主要关注点集中在长时间序列农地动态变化特征<sup>[6,7]</sup>,农地利用变化强度<sup>[8]</sup>,耕地或林地等单一类型农地变化特征及其驱动力分析<sup>[9,10]</sup>等方面,也有部分学者研究农地变化所产生的生态环境效应<sup>[11]</sup>以及对耕地生产力潜在影响<sup>[12]</sup>。此外,在土地利用变化模拟<sup>[13,14]</sup>、城市扩张<sup>[15]</sup>等研究中对农地变化也有不同程度涉及。由于土地利用及其变化是空间显式的,存

收稿日期:2015-08-17;修订日期:2015-12-27

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41271101)。

作者简介:曹祺文,男,河南洛阳人,硕士生,主要研究方向为土地科学和景观生态学。E-mail: cqwgufeng@pku.edu.cn

通讯作者:仝德, E-mail: tongde@pkusz.edu.cn

2016年4月

在固有的空间自相关性,不同地块的空间位置组合在其内部形成了一定相互制约和影响的关系,使得地块属性容易受到其周边土地的影响,因此需要在农地变化研究中考虑空间自相关性。如 Jiang 等通过将空间自相关嵌入 CLUE-S 模型,提高了土地利用变化模拟精度<sup>[16]</sup>。在研究方法上,多元线性回归、层次分析法、系统动力学、Probit、Logistic 和 AutoLogistic 回归模型应用较多<sup>[17,18]</sup>。通常,多元线性回归要求因变量具有正态分布性,不适于二值变量,即不能反映具有空间异质性的农地变化驱动力;层次分析法在权重设置上主观性较强,且同样不能反映农地变化的空间信息;系统动力学可与元胞自动机模型相结合以反映空间格局动态,但识别驱动力的能力较弱<sup>[19,20]</sup>;Probit 和 Logistic 模型在 GIS 支持下能较好地反映驱动力的空间特性,也是常采用的方法,但一定程度上未能系统考虑农地利用变化的空间外部性即周围地块农地属性变化和土地开发强度自相关性的影响,有学者在模拟土地利用格局时比较了传统 Logistic 模型和 AutoLogistic 模型的模拟效果,发现前者仅能识别出土地利用总体格局,而加入了能反映邻域相互作用的空间自相关变量之后则提高了对土地利用格局分析的准确度<sup>[21]</sup>。就研究尺度而言以绿洲<sup>[22]</sup>、市域<sup>[23]</sup>、县域<sup>[24]</sup>、镇域<sup>[19]</sup>等中小尺度居多,大尺度研究相对较少。

珠三角地区是中国一体化程度较高的城镇群,经济发展和城镇化进程速率较快,农地利用格局变

化显著,可作为区域尺度农地变化研究的代表性案例。本文引入在动植物分布状况模拟<sup>[25]</sup>、土地利用多情景模拟<sup>[26]</sup>等领域得到较多应用的 AutoLogistic 模型,考虑农地属性变化和土地开发强度的空间自相关性,及自然、社会经济和空间距离等农地变化驱动因子的空间作用模式,以期加深对农地变化过程的理解,并为该区农地保护政策制定和土地资源可持续利用提供基础依据。

## 2 研究区概况

珠三角地区地处广东省中部,毗邻香港和澳门,包括广州、深圳、珠海、佛山、东莞、江门、中山、肇庆和惠州等九市(图 1),位于 21°34'N-24°34'N, 111°21'E-115°23'E,是中国最早的改革开放区域,经济一体化发展程度较高。该区土地总面积约为 54 392km<sup>2</sup>,2010 年建设用地面积约 6 867km<sup>2</sup>,农用地中耕地面积 12 698km<sup>2</sup>,林地面积 29 241km<sup>2</sup>,草地面积 965km<sup>2</sup>。高程 -32~1 439m,地势总体上北高南低,以平原地形为主。气候属亚热带季风性气候,夏季高温多雨,冬季温和少雨,年降水量为 1 200~2 800mm,年均温 19℃~24℃,年日照时数 1 328~2 380 h。社会经济方面,2000~2010 年 GDP 由 10 318 亿元迅速增长为 37 592 亿元,年均增长率达 13.80%;总人口由 3 239 万人增长至 5 726 万人;固定资产投资由 1 545 亿元增长至 11 914 亿元。社会经济的快速发展和人口的持续增长为该区域土地资源承载力和农地保护带来了一定压力。

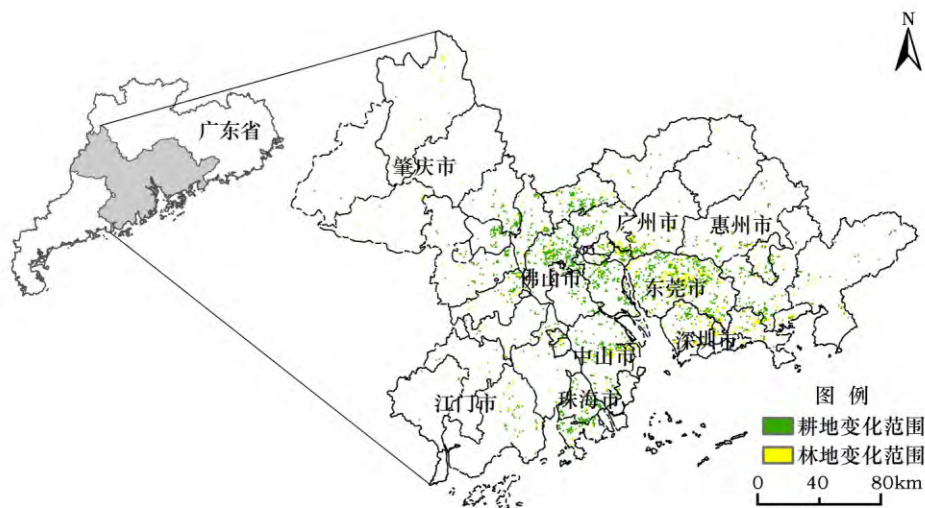


图 1 珠三角地区地理位置及农地变化范围

Figure 1 Location of Pearl River Delta Area and distribution of agricultural land change

### 3 数据来源与研究方法

#### 3.1 数据来源与预处理

采用的土地利用数据来源于中国科学院资源环境数据中心(<http://www.resdc.cn>)提供的珠三角地区2000年和2010年1km栅格土地利用遥感监测数据<sup>[27]</sup>。分别提取两期耕地和林地分布数据,当2010年耕地或林地发生变化即转变为其他地类时,栅格赋值为1,否则赋值为0,在此基础上,分别将其作为耕地和林地变化驱动力回归模型的因变量。由于草地面积在珠三角农地中所占比例较低,故本文重点分析耕地、林地等主要类型农地的变化以及驱动力。

参考类似研究成果<sup>[28-30]</sup>,并基于本区域实际特征和数据代表性、可获取性,从自然、社会经济、空间距离和土地利用特征的空间自相关性等四个方面构建农地变化驱动力体系(表1)。各具体指标数据来源及预处理方法如下:

(1)自然驱动力。主要包括年降水量、年均温、

年日照时数等气象因子的倾向率,高程、坡度和坡向等地形因子以及土壤有机质含量。其中,倾向率用以表征气象因子变化趋势,正值表示趋向增加或提高,值为负表示趋向减少或降低,计算方法详见文献<sup>[31]</sup>。气象因子数据源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.nmic.cn/home.do>)提供的中国地面气候资料年值数据集<sup>[32]</sup>,根据珠三角及周边区域26个气象站点2000-2010逐年气候资料,计算得到各因子倾向率,并基于Kriging法进行空间模拟。

地形因子通过30 m ASTER GDEM提取,其中为将坡向转为连续型变量,对其进行三角函数转换,计算公式如下:

$$\begin{aligned} tran\_aspect = & \cos(aspect \cdot \pi/180 \\ & - south\_aspect \cdot \pi/180) \end{aligned} \quad (1)$$

式中  $tran\_aspect$  为转换后坡向,  $tran\_aspect \in [-1, 1]$ ,其值越接近于-1表示越偏向北坡,越接近于1表示越偏向南坡;  $aspect$  为根据DEM所提取的原始坡向值;  $south\_aspect$  为南坡原始值,即180。

表1 农地变化驱动力指标

Table 1 Indicators of agricultural land change driving forces

	变量	变量名称	单位或描述
因变量	2000-2010年耕地变化	<i>Culti_land_change</i>	0, 1
	2000-2010年林地变化	<i>Forest_change</i>	0, 1
自然驱动力	年降水量倾向率	$\theta\_precipitation$	mm/10a
	年均温倾向率	$\theta\_temperature$	°C/10a
	年日照时数倾向率	$\theta\_sunshine$	h/10a
	高程	<i>Elevation</i>	m
	坡度	<i>Slope</i>	°
	坡向	<i>Aspect</i>	[-1, 1]
	土壤有机质含量	<i>OM</i>	%
社会经济驱动力	2000-2010年总人口密度变化	<i>Pop_density</i>	人/km <sup>2</sup>
	2000-2010年农村人口密度变化	<i>Rural_pop_density</i>	人/km <sup>2</sup>
	2000-2010年固定资产投资变化	<i>Invest</i>	万元
	2000-2010年农机总动力变化	<i>Power</i>	kW
	2000-2010年地均GDP变化	<i>GDP</i>	万元/km <sup>2</sup>
空间距离驱动力	到最近乡镇中心的距离	<i>DIS2center</i>	km
	到最近道路的距离	<i>DIS2road</i>	km
	到最近铁路的距离	<i>DIS2railway</i>	km
	到最近农村居民点的距离	<i>DIS2residential</i>	km
	到最近河流的距离	<i>DIS2river</i>	km
土地利用特征的空间自相关性	耕地属性变化空间滞后	<i>Lag_crop</i>	
	林地属性变化空间滞后	<i>Lag_forest</i>	
	土地开发强度空间滞后	<i>Lag_light</i>	

2016年4月

土壤有机质含量源于国家地球系统科学数据共享平台(<http://www.geodata.cn/>)提供的中国1公里网格土壤碳分布数据<sup>[33]</sup>,乘以 Van Bemmelen 因数 1.724<sup>[34]</sup>求得。

(2)社会经济驱动力。主要包括2000-2010年总人口密度变化、农村人口密度变化、固定资产投资变化、农机总动力变化、地均GDP变化。其中,总人口密度变化和地均GDP变化分别源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)提供的全国人口空间分布1公里网格数据<sup>[35]</sup>和全国GDP空间分布1公里网格数据<sup>[36]</sup>(2000年,2010年),区(县)级农村人口密度变化、固定资产投资变化和农机总动力变化源于各市统计年鉴(2000年,2010年)<sup>[37-45]</sup>。

(3)空间距离驱动力。主要包括到最近乡镇中心的距离、到最近道路的距离、到最近铁路的距离、到最近农村居民点的距离及到最近河流的距离。其中,乡镇中心、道路、铁路和河流数据源于国家基础地理信息中心(<http://www.ngcc.cn/>)<sup>[46]</sup>,且后三者在此基础上结合 OpenStreetMap 和近期谷歌卫星影像进行修正。农村居民点数据则从土地利用数据中提取。空间距离的计算在 ArcGIS 10.1 的 Spatial Analyst 模块中完成。

(4)土地利用特征的空间自相关性。包括耕地(或林地)属性变化空间自相关性和土地开发强度空间自相关性,在 GeoDa 软件中计算出各变量空间滞后值,即观测值与邻域值的加权平均。因土地变化受邻域性影响较大,通常若某农用地块周围较多土地属性发生变化或土地开发较为成熟,则该农用地块在下一阶段发生农转非的概率较高。因此,本组变量的加入可以将上述因子的影响纳入模型之中。其中,土地开发强度以研究初期2000年 DMSP/OLS 夜间灯光数据 DN 值为表征,所用数据为 NOAA/NGDC 发布的2000年辐射定标数据,该产品包含稳定光源且消除了灯光饱和和效应,能较好地反映人类活动特征。本文假定土地开发强度与夜间灯光 DN 值成正比关系,即灯光亮度越大,土地利用开发程度越高。

为保持空间数据匹配性,以上所有数据均进行 1km×1km 栅格化处理。

### 3.2 农地变化分析

本文主要分析以耕地和林地为代表的农地变化特征。首先,掌握农地数量变化及其流失去向,借助土地年均变化率以反映变化幅度和速率,其计算方法可参阅文献[47,48],此处不再赘述。其次,基于常用性、简化性等原则,选取平均斑块面积、平均斑块周长、破碎度和面积加权平均斑块分维数等指数,从斑块形状、破碎程度等方面探讨农地景观空间构型特征及其演变。各指数计算方法和生态学意义可参阅文献[49,50]。

### 3.3 回归方法

本文设定农地变化( $Y$ )为二分变量,即发生变化时  $Y=1$ , 否则为 0, 故构建非线性的 Logistic 和 AutoLogistic 回归模型。Logistic 模型可表达为如下形式:

$$P(Y=1|x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{\exp(\beta_0 + \sum \beta_i x_i)}{1 + \exp(\beta_0 + \sum \beta_i x_i)} \quad (2)$$

通常对公式(2)进行 Logit 变换,以转变为线性公式(3):

$$\ln\left(\frac{P}{1-P}\right) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_n x_n \quad (3)$$

式中  $P$  为农地变化发生的概率;  $\beta_0$  为常数项;  $\beta_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 为自变量  $x_i$  的偏回归系数。

然而,传统 Logistic 模型由于不能考虑农地格局的空间依赖关系而产生一定模型偏差,本文引入 Besag 提出的含有空间自相关因子的 AutoLogistic 模型<sup>[51]</sup>,其形式如公式(4):

$$\ln\left(\frac{P}{1-P}\right) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_n x_n + \sum_{i=1}^m \beta_i Autocov_i \quad (4)$$

式中  $Autocov_i$  ( $i=1, 2, \dots, m$ ) 为空间自相关因子,即农地属性变化和土地开发强度的空间滞后值。在 GeoDa 软件中计算  $Autocov$  变量时,其空间权重取空间点对距离的倒数,即距离越大权重越小。

发生比率(Odds Ratio)可以帮助理解自变量对事件概率的作用,常用于解释模型回归系数<sup>[28]</sup>。当  $\beta_i$  为正时,表示  $x_i$  每增加一单位,将引起发生比率扩大  $\exp(\beta_i)$  倍,即农地变化概率提高,反之亦然。

利用 Stata 平台 Logistic 函数完成模型构建,得到参数估计  $\beta$ 、标准误差  $SE$ 、Wald  $\chi^2$  统计量、显著性水平  $P$  和发生比率 Odds Ratio。对回归方程进行

似然比卡方检验, 概率  $P$  值小于给定显著性水平时, 表明参数估计有效, 模型可采用。模型解释能力的检验则常采用  $ROC$  方法<sup>[52]</sup>, 一般认为  $ROC \geq 0.7$  时模型具有较好的解释能力。此外, 预测正确率  $PCP$  也常用以评估模型预测能力。

### 3.4 样点抽取

根据模型原理, 需随机创建一定数量对照点与农地变化点进行模型拟合, 通常对照点数量大于等于农地变化点。本文基于珠三角地区农地变化实际状况, 采用分层随机抽样方法获取均匀分布于研究区的样点。其中, 耕地变化模型共 4 000 个样点 (1 500 个耕地变化点, 2 500 个耕地未变点), 林地变化模型共 2 000 个样点 (500 个林地变化点, 1 500 个耕地未变点)。在 GIS 平台中利用样点矢量文件提取因变量和各驱动因子值, 构建样点属性库。

## 4 结果及分析

### 4.1 2000–2010 年珠三角地区农地变化特征

2000–2010 年珠三角地区耕地、林地等主要类型农地以净减少为主 (表 2)。其中, 耕地面积由 14 458 km<sup>2</sup> 减少为 12 698 km<sup>2</sup>, 净减少 1 760 km<sup>2</sup>, 而林地变化幅度相对较小, 其面积由 29 779 km<sup>2</sup> 减少为 29 241 km<sup>2</sup>, 减幅为 538 km<sup>2</sup>。根据能反映地类面积变

化幅度与速度的土地年均变化率, 耕地和林地年均变化率分别为 -1.10 % 和 -0.16 %, 均以转出为主, 但耕地变化明显大于林地。

从农地变化结构看 (表 3), 耕地除 12 679 km<sup>2</sup> 保持不变外, 多数为建设用地扩张所占用, 其面积达 1 472 km<sup>2</sup>, 此外分别有 95 km<sup>2</sup>、7 km<sup>2</sup> 和 205 km<sup>2</sup> 转变为林地、草地和水域。林地有 29 089 km<sup>2</sup> 保持不变, 其转出部分以建设用地为绝对主导, 面积达 639 km<sup>2</sup>, 此外也有少量转为耕地、草地和水域。因此, 基于经济社会发展需求的土地城镇化是珠三角地区耕地、林地等农地变化的主要驱动力, 深刻影响着该区域土地利用结构。

进一步地, 从景观形态层面分析珠三角地区农地变化特征 (表 4)。从平均斑块面积和平均斑块周长来看, 林地均大于耕地, 其中耕地平均斑块面积和平均斑块周长随时间变化有所降低, 而林地平均斑块面积和周长随时间变化而分别增大和降低。这表明林地集中连片程度更高, 加之较多小型林地斑块可能在建设用地扩张过程中被侵占从而提高了平均斑块面积, 而斑块形状复杂性的降低也使得平均斑块周长有所减小。相反, 耕地斑块面积相对较小, 且其在土地城镇化过程中转为建设用地较

表 2 2000–2010 年珠三角地区主要类型农地数量变化及动态度

Table 2 Change of cultivated land and forest amount and their dynamic degree in Pearl River Delta from 2000 to 2010

	总面积/km <sup>2</sup>		转出面积 /m <sup>2</sup>	转入面积 /m <sup>2</sup>	净变化 /km <sup>2</sup>	土地利用动态度 /%
	2000年	2010年				
耕地	14 458	12 698	1 779	19	-1 760	-1.10
林地	29 779	29 241	690	152	-538	-0.16

表 3 2000–2010 年珠三角地区主要类型农地变化方向

Table 3 Direction of cultivated land and forest change in Pearl River Delta from 2000 to 2010 (km<sup>2</sup>)

农地类型	2000年	2010年					
		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
耕地	耕地	12 679	95	7	205	1 472	0
林地	林地	10	29 089	12	28	639	1

表 4 2000–2010 年珠三角地区主要类型农地景观格局指数及其变化

Table 4 Landscape pattern metrics and their change of cultivated land and forest in Pearl River Delta from 2000 to 2010

	平均斑块面积/km <sup>2</sup>		平均斑块周长/km		破碎度		面积加权平均斑块分维数	
	2000年	2010年	2000年	2010年	2000年	2010年	2000年	2010年
耕地	5.382 7	4.457 8	10.383 4	9.244 2	0.165 8	0.186 8	1.193 6	1.158 6
林地	22.995 3	23.132 8	20.261 0	20.126 4	0.071 7	0.074 3	1.221 3	1.208 5

2016年4月

多,使得斑块面积随时间进一步减小,斑块周长也相应降低。

破碎度能反映景观在特定时间和性质上的破碎化程度及其所受人类干扰的强度<sup>[53]</sup>。耕地和林地的破碎度均有不同程度提升,尤其是耕地受到人类活动影响较强,较多小型建设用地的增加使得耕地斑块连续性有所降低,构成异质性的镶嵌体。这与面积加权平均斑块分维数的变化相一致,通常其值越低斑块形状越规整,而所受干扰程度越大<sup>[54,55]</sup>。耕地和林地分维数各有不同程度降低,且林地始终高于耕地,表明两种农业景观斑块受到人类活动的干扰逐渐增大,但林地相对弱于耕地,也再次反映了耕地是主要的建设用地扩张来源。

#### 4.2 区域农地变化驱动力回归模型

在构建农地变化驱动力回归模型之前,对各自

变量进行共线性问题诊断,结果自变量的容忍度均大于0.2,相关系数也小于临界值0.7,表明自变量间共线性不严重,均可参与模型构建<sup>[28,56,57]</sup>。

##### 4.2.1 耕地变化回归模型

比较耕地变化的传统 Logistic 回归模型和加入空间自相关变量的 AutoLogistic 回归模型的拟合优度(表5),似然比卡方检验的观测值分别为 1 473.39 ( $P=0.000$ ) 和 1 785.98 ( $P=0.000$ ),而 ROC 均大于 0.7,能够通过检验,但 AutoLogistic 回归模型效果更优,ROC 由 0.841 0 提高到 0.869 3。此外,在设定耕地变化概率阈值为 0.5,即预测值大于 0.5 时认为耕地发生地类转变,否则不发生变化的条件下,AutoLogistic 模型的预测准确率 PCP 同 Logistic 模型相比由 78.72% 提高至 80.30%。因此,区域耕地变化空间格局中是存在空间自相关性的,引入空间自

表5 珠三角地区耕地变化驱动力回归模型对比

Table 5 Comparison of regression models for driving forces of cultivated land change

解释变量	Logistic					AutoLogistic				
	参数 $\beta$ 值 估计	标准误差 SE	检验统计量 Wald $\chi^2$	$Pr>\chi^2$	发生比率	参数 $\beta$ 值 估计	标准误差 SE	检验统计量 Wald $\chi^2$	$Pr>\chi^2$	发生比率
$\theta\_precipitation$	-0.000 14	0.000 6	0.063	0.802	0.999 8	0.001 02	0.000 6	2.541	0.111	1.001 0
$\theta\_temperature$	-2.332 41**	0.862 8	7.307	0.007	0.097 1	-0.754 10	0.919 1	0.673	0.412	0.470 4
$\theta\_sunshine$	-0.003 26*	0.001 3	6.072	0.014	0.9967	-0.003 46*	0.001 4	5.739	0.017	0.996 5
Elevation	-0.003 18	0.001 6	3.720	0.054	0.996 8	-0.000 71	0.001 5	0.212	0.645	0.999 3
Slope	-0.007 75	0.015 4	0.253	0.615	0.992 3	-0.019 39	0.015 9	1.489	0.222	0.980 8
Aspect	0.104 53	0.057 0	3.366	0.067	1.110 2	0.131 29*	0.060 3	4.744	0.029	1.140 3
OM	-0.002 39*	0.001 0	5.610	0.018	0.997 6	-0.001 23	0.001 0	1.463	0.226	0.998 8
Pop_density	0.000 60	0.000 3	3.442	0.064	1.000 1	0.000 09*	0.000 0	6.265	0.012	1.000 1
Rural_pop_density	0.000 29	0.000 2	2.793	0.095	1.000 3	0.000 21	0.000 2	1.260	0.262	1.000 2
Invest	-0.000 10**	2.79E-8	7.320	0.007	0.999 9	-0.000 01*	2.88E-8	5.274	0.022	0.999 9
Power	-0.000 10	0.51E-8	2.941	0.086	0.999 0	0.000 01	0.58E-8	1.933	0.164	1.000 1
GDP	0.000 08**	0.04E-8	362.849	0.000	1.001 0	0.000 06**	0.05E-8	159.412	0.000	1.000 1
DIS2center	0.000 04	0.000 1	3.189	0.074	1.000 1	0.000 04	0.000 1	2.282	0.131	1.000 1
DIS2road	-0.000 90**	0.000 2	9.095	0.003	0.999 0	-0.000 04	0.000 1	2.003	0.157	0.999 5
DIS2railway	-0.000 40**	0.05E-8	63.836	0.000	0.999 9	-0.000 02**	0.05E-8	21.539	0.000	0.999 9
DIS2residential	0.000 01	0.000 1	0.447	0.504	1.000 1	0.000 02	0.000 1	1.229	0.268	1.000 1
DIS2river	-0.000 01	0.000 1	0.721	0.396	0.999 9	0.000 01	0.000 1	0.612	0.434	1.000 1
Lag_crop						2.361 23**	0.158 9	220.566	0.000	10.604 0
Lag_light						0.008 39*	0.003 9	4.435	0.035	1.008 4
常数 Constant	-1.702 33**	0.409 7	17.267	0.000	0.182 2	-2.739 45**	0.439 7	38.815	0.000	0.064 6
模型参数	LR $\chi^2(17)=1 473.39 P=0.000$ ROC=0.841 0 预测正确率 PCP=78.72%					LR $\chi^2(19)=1 785.98 P=0.000$ ROC=0.8 693 预测正确率 PCP=80.30%				

注:\*\*和\*分别表示在 1%和 5%水平上显著。

相关因子的 AutoLogistic 模型拟合效果优于传统 Logistic 模型。

根据 Wald  $\chi^2$  统计量和显著性水平  $P$  值(表5), 耕地变化的 Logistic 和 AutoLogistic 模型中重要的解释变量均包括地均 GDP 变化、到最近铁路的距离、固定资产投资变化及年日照时数倾向率。其中, 地均 GDP 变化的回归系数在 Logistic 和 AutoLogistic 模型中均为正, 表明耕地转变为其他地类(特别是建设用地)的概率随 GDP 的增大而增大, 即 GDP 的快速发展产生了相应的用地需求。根据不同模型的发生比率(Odds Ratio), 地均 GDP 每增加万元, 耕地变化的概率增加为原来的 1.001 0 和 1.000 1 倍。到最近铁路的距离回归系数在模型中都为负, 表明铁路等基础设施的建设加快了邻近耕地的变化, 根据发生比率, 到最近铁路的距离每增加 1km, 耕地变为其他地类的概率将减小为原来的 0.999 9 倍。固定资产投资变化的回归系数在两模型中均为负, 对耕地变化概率产生负向影响。年日照时数倾向率的回归系数也均为负, 倾向率增大即年日照时数的逐渐增加降低了耕地变化概率。

此外, 在 Logistic 模型中年均温倾向率、有机质含量和到最近道路的距离等解释变量也具有显著负向影响, 表明近年来交通基础设施的建设促进了耕地变化, 而温度、土壤等决定耕地质量的基础条件在一定程度上也成为相关利益主体做出耕地保护或流转决策的依据。当考虑地块属性变化和土地开发强度的空间自相关性时, AutoLogistic 模型中其他具有显著性影响的变量则包括坡向、总人口密度变化及耕地属性变化和土地开发强度的空间滞后项。其中, 经三角函数转换之后的坡向回归系数为正, 发生比率为 1.140 3, 表明处于南坡的耕地发生变化的概率更大。总人口密度的增大则对耕地变化产生正向影响, 每平方公里人口增加 1 人, 耕地发生地类变化的概率将增加为原来的 1.000 1 倍。耕地属性变化和土地开发强度两个空间滞后项的回归系数都为正, 其发生比率分别为 10.604 0 和 1.008 4, 均对耕地变化具有正向促进作用, 即周边地块地类转变状况和开发强度具有一定邻域效应。

#### 4.2.2 林地变化回归模型

比较林地变化的 Logistic 和 AutoLogistic 回归模

型的拟合优度(表6), 似然比卡方检验的观测值分别为 1 190.91 ( $P=0.000$ ) 和 1 273.22 ( $P=0.000$ ), 且 ROC 远大于 0.7, 模型均通过相关检验。与耕地变化回归模型类似, 引入空间自相关 AutoLogistic 模型同传统 Logistic 模型相比效果更佳, ROC 由 0.937 1 提高到 0.949 5, 而设定林地变化概率阈值为 0.5 时模型总预测正确率 PCP 则由 90.20% 提高为 91.00%。这表明, 研究林地变化空间格局时也应考虑空间自相关性, 即采用 AutoLogistic 模型是合适的。

根据 Wald  $\chi^2$  统计量和显著性水平  $P$  值(表6), 林地变化的 Logistic 和 AutoLogistic 模型中重要的解释变量均包括地均 GDP 变化、坡度、总人口密度变化、到最近道路的距离和到最近铁路的距离。其中, 地均 GDP 的增长加大了林地转为其他土地利用类型的概率, 其回归系数在 Logistic 和 AutoLogistic 模型中分别为 0.000 11 和 0.000 10, 发生比率为 1.000 1, 即地均 GDP 每增加万元, 林地变化的概率将增加为 1.000 1 倍, 反映了经济因子变动对林地变化的影响。坡度为负的回归系数表明林地变化的概率随坡度的增加而减小。总人口密度变化对林地变化的影响与地均 GDP 变化相类似, 其回归系数为正, 表明人口密度的增大加速了林地变化, 根据不同模型的发生比率, 每平方公里人口增加 1 人, 林地变化的概率变为原来的 1.000 4 倍和 1.000 3 倍。到最近道路的距离和到最近铁路的距离等解释变量回归系数为负, 即随着与最近道路和铁路距离的减小, 林地变化的概率将相应增大, 反映出交通基础设施建设对沿线林地分布格局的影响。

林地变化的 Logistic 和 AutoLogistic 模型中显著的解释变量总体较为相近, 但除上述变量外 Logistic 模型中农业机械总动力变化也在一定程度上产生负向影响, 即农机总动力等农业投入的增加使得林地变化的概率有所降低。而引入空间自相关的 AutoLogistic 模型中其他重要的解释变量则主要包括林地属性变化和土地开发强度的空间滞后项, 前者深刻反映了周围林地属性变化状况即土地利用空间格局对内部林地变化的作用, 林地变化的概率将随周围地块流转数量的增加而增加。然而, 以灯光亮度为表征的土地开发强度空间滞后项与此相

2016年4月

表6 珠三角地区林地变化驱动力回归模型对比

Table 6 Comparison of regression models for driving forces of forest

解释变量	Logistic					AutoLogistic				
	参数 $\beta$ 值 估计	标准误差 SE	检验统计量 Wald $\chi^2$	$Pr>\chi^2$	发生比率	参数 $\beta$ 值 估计	标准误差 SE	检验统计量 Wald $\chi^2$	$Pr>\chi^2$	发生比率
$\theta\_precipitation$	-0.001 04	0.000 9	1.233	0.267	0.998 9	-0.000 27	0.001 1	0.064	0.801	0.999 7
$\theta\_temperature$	-2.335 57	1.447 0	2.607	0.106	0.096 8	-1.134 94	1.507 7	0.567	0.452	0.321 4
$\theta\_sunshine$	-0.000 57	0.001 9	0.094	0.760	0.999 4	0.000 16	0.001 9	0.007	0.935	1.000 2
<i>Elevation</i>	-0.001 37	0.001 2	1.284	0.257	0.998 6	-0.001 62	0.001 2	1.705	0.192	0.998 4
<i>Slope</i>	-0.070 50**	0.016 7	17.778	0.000	0.931 9	-0.063 08**	0.017 2	13.497	0.000	0.938 9
<i>Aspect</i>	-0.039 22	0.114 4	0.118	0.732	0.961 5	-0.080 62	0.120 4	0.448	0.503	0.922 5
<i>OM</i>	-0.003 00	0.001 6	3.394	0.065	0.997 0	-0.002 55	0.001 6	2.390	0.122	0.997 5
<i>Pop\_density</i>	0.000 40**	0.000 1	16.222	0.000	1.000 4	0.000 37**	0.000 1	13.079	0.000	1.000 3
<i>Rural\_pop\_density</i>	0.000 20	0.005 0	0.163	0.686	1.000 2	0.000 28	0.000 5	0.265	0.607	1.000 2
<i>Invest</i>	-8.83E-8	5.69E-8	2.409	0.121	0.999 9	-9.75E-8	5.64E-8	2.985	0.084	0.999 9
<i>Power</i>	-0.04E-8**	0.01E-8	9.064	0.003	0.999 9	-0.01E-8	0.01E-8	1.057	0.304	0.999 9
<i>GDP</i>	0.000 11**	0.000 1	113.823	0.000	1.000 1	0.000 10**	0.000 1	86.566	0.000	1.000 1
<i>DIS2center</i>	-0.08E-8	0.000 1	0.033	0.855	0.999 9	-0.000 03	0.000 1	0.484	0.487	0.999 9
<i>DIS2road</i>	-0.000 15**	0.000 1	8.119	0.004	0.999 8	-0.000 11*	0.000 1	4.085	0.043	0.999 8
<i>DIS2railway</i>	-0.000 03**	-0.08E-8	12.458	0.000	0.999 9	-0.000 02*	0.08E-8	3.954	0.047	0.999 9
<i>DIS2residential</i>	-0.000 03	0.000 1	1.052	0.305	0.999 9	0.000 01	0.000 0	0.179	0.672	1.000 1
<i>DIS2river</i>	-0.000 02	0.000 1	0.726	0.394	0.999 9	-0.09E-8	0.000 1	0.091	0.763	0.999 9
<i>Lag\_forest</i>						3.046 55**	0.344 2	78.340	0.000	21.042 6
<i>Lag\_light</i>						-0.005 87*	0.002 6	4.957	0.026	0.994 1
常数 <i>Constant</i>	-0.436 20	0.624 6	0.488	0.485	0.646 5	-1.172 19	0.657 0	3.183	0.074	0.309 7
模型参数	$LR \chi^2(17)=1 190.91; P=0.000$ $ROC=0.937 1$ ; 预测正确率 $PCP=90.20\%$					$LR \chi^2(19)=1 273.22; P=0.000$ $ROC=0.949 5$ ; 预测正确率 $PCP=91.00\%$				

注:\*\*和\*分别表示在0.01和0.05水平上显著。

反,其对林地变化产生一定负向影响,即在土地开发强度较高的区域林地变化概率反而低,这与部分高城市化水平地区如深圳市等所采取的严格的生态管控政策有关。

## 5 区域农地变化驱动机理及启示

根据农地变化驱动力回归模型,特别是引入空间自相关性的 AutoLogistic 回归模型,对珠江三角洲地区 2000-2010 年耕地、林地等主要类型农地变化的驱动机理和启示分析如下:

### 5.1 耕地变化驱动力

耕地变化驱动力中自然驱动力主要包括年日照时数倾向率和坡向,分别产生负向和正向影响。其中,年日照时数倾向率的增大意味着年日照时数总体趋向增加,这有利于作物生长和土壤养分含量

的提升<sup>[58]</sup>,其对耕地变化概率的降低说明耕地流转更容易发生在耕地质量相对较低的区域,体现出耕地保护政策和土壤生产能力在农地变化过程中的基础作用。此外,由于南坡相比北坡有更多的耕地分布,故坡向变量表现为正向影响。社会经济驱动力主要包括总人口密度变化、固定资产投资变化和地均 GDP 变化,分别产生正向、负向和正向影响。进入 21 世纪,珠三角区域社会经济持续的快速发展使得人口数量和 GDP 增长迅速,建设用地作为一切生产生活活动的支撑空间,人们对其数量的需求日益增加,促进了土地城镇化过程,而耕地是增量土地的重要来源,从而产生了总人口密度变化和地均 GDP 变化变量对耕地变化概率的正向作用。对于固定资产投资变化所产生的负向影响,可能的



解释为珠三角地区中,快速城市化区域如深圳市等固定资产投资增长速率较高,但其耕地资源不足,而开发建设相对落后的地区如江门市虽然固定资产投资增加相对较少,但其耕地更易在城镇化进程中发生地类变化,故表现该变量为负的回归系数。空间距离驱动力为到最近铁路的距离,主要产生负向影响。各空间距离指标是土地区位的重要表征,模型结果反映出交通区位在农地变化过程中的驱动作用,铁路等交通基础设施的建设带动了沿线经济发展,对更高土地利用经济效益的追求提高了耕地流转开发概率,从而表现为该变量的负向作用。土地利用特征的空间自相关性中耕地属性变化和土地开发强度的空间滞后项均对耕地变化具有显著性正向影响,这是由于建设用地扩张范围具有一定连续性,使得当周围地块发生地类转变或邻近其他开发强度较高的地块时,耕地发生变化的概率将有所提升。

### 5.2 林地变化驱动力

林地变化驱动力中自然驱动力主要为坡度,由于多数林地在2010年转为建设用地,而居住区、工业用地等城市用地建设均有相应的坡度要求(最大坡度不超过25%),使得林地变化更多地发生在相对平缓区域,从而表现为坡度变量的负向影响。社会经济驱动力与耕地变化较为类似,主要为总人口密度变化和地均GDP变化,均产生显著正向影响,再次反映了区域人口增长和经济发展所产生的大量建设用地扩张需求促使林地等农地被占用并开发成为增量建设用地的过程。空间距离驱动力包括到最近道路的距离和到最近铁路的距离,均产生负向影响。表明当前驱动农地变化的区位因素中交通设施建设是最重要的因子,便利的交通条件为生产要素外迁提供了良好基础环境,进而促进了建设用地扩张<sup>[59]</sup>。土地利用特征的空间自相关性中林地属性变化和土地开发强度的空间滞后项则分别具有显著性正向和负向影响。前者的正向影响产生机制与耕地属性变化空间滞后项类似,即与建设用地扩张范围的连续性有关,而后的负向影响则很大程度上源于该区域部分发达城市良好的生态保护和宜居生态城市建设工作,如深圳市划定了严格的基本生态控制线,将集中连片的森林或山区林

地纳入生态保护范围,以降低项目建设对生态环境及其用地的破坏,从而使得该空间自相关变量回归系数为负。

### 5.3 区域农地变化驱动力比较及启示

在耕地和林地等区域农地变化过程中,自然因子形成了基础性但非主要的驱动作用,其对农地变化的影响不如社会经济、空间距离和土地利用空间自相关性的影响大。这是因为土壤养分、气温、降水等影响农地质量的因子日益可以通过农业投入或工程措施(如科学施肥、农田水利工程等)得到改善或补充。社会经济驱动力对农地变化的影响甚为显著,尤其是总人口密度和GDP的变化。通常,城市人口和GDP的快速增长需要相应数量的土地来承载,也就产生了建设用地扩张的动力,这在很大程度上提高了农地城市流转开发的概率。为形成合理的土地空间格局和促进土地可持续利用,政府应当合理调控人口增长,充分运用大数据和其他科学的数据分析技术,提高城乡规划和土地利用规划的科学性和预见性。在用地管控方面,需避免盲目开发建设土地,优先满足重大项目建设用地需求,通过存量土地内部挖潜的方式逐步减少增量空间,并权衡好农地保护与经济发展、城市扩张之间的关系,科学划定城市增长边界(UGB)。此外,空间距离驱动因子反映出交通区位对农地变化构成重要的正向影响,交通基础设施的建设可能会加速农地城市流转开发。因此,政府可通过科学可持续的交通规划,并结合其他相关经济发展政策以实现交通设施沿线农地的保护,减少建设用地不合理蔓延。最后,驱动力中土地利用特征的空间自相关性表明已有土地开发状况对农地变化的影响不可忽视,未来城市土地利用和管理工作应在分析当前土地利用格局特征的基础上,注重合理引导城市发展方向,避免“摊大饼”式发展。

## 6 结论

本文基于GIS和空间分析技术,首先从数量和空间构型等方面分析了珠三角地区2000-2010年农地变化特征,其次构建并比较了传统Logistic模型和引入空间自相关的AutoLogistic模型的适用性,从自然、社会经济、空间距离及土地利用特征的空间自相关性四个层次探讨了珠三角地区农地变化的驱

2016年4月

动力,主要研究结论如下:

(1)珠三角地区2000-2010年耕地、林地这两种主要类型农地变化以净减少为主,其转出部分多数为建设用地扩张所占用,特别是耕地成为增量建设用地的主要来源。从景观构型上看,耕地和林地的破碎度均有不同程度提升,两种农业景观斑块受到人类活动的干扰逐渐增大,构成异质性的镶嵌体。

(2)珠三角地区2000-2010年耕地变化的驱动力主要包括自然驱动力中年日照时数倾向率和坡向,社会经济驱动力中总人口密度变化、固定资产投资变化和地均GDP变化,空间距离驱动力中到最近铁路的距离,以及土地利用特征的空间自相关性中耕地属性变化和土地开发强度的空间滞后项。林地变化驱动力则主要包括自然驱动力中的坡度,社会经济驱动力中的总人口密度变化、地均GDP变化,空间距离驱动力中的到最近道路的距离和到最近铁路的距离,以及土地利用特征的空间自相关性中林地属性变化和土地开发强度的空间滞后项。在区域农地变化过程中,自然、社会经济、空间距离和土地利用特征的空间自相关性等四个层次因子均有不同程度的驱动作用。其中,自然因子构成基础性和累积性驱动作用,其对农地变化的影响相对较小。社会经济驱动力具有显著性影响,特别是人口和GDP的增长。空间距离驱动力是土地区位的表征,其中交通区位影响甚为显著。而土地利用特征的空间自相关性则对农地变化具有不可忽视的邻域效应。

(3)本文在构建珠三角区域农地变化驱动力回归模型时,引入了土地属性变化和以夜间灯光数据DN值为表征的土地开发强度空间滞后项,反映了采样点周围土地属性变化和原有土地开发利用状况在农地变化中的作用。其模型结果无论是ROC和总体预测准确率PCP,还是空间滞后变量的回归系数及其显著性,均表明AutoLogistic回归模型在分析区域农地变化驱动力时比传统Logistic模型更为适用和可靠。

本文尚存在不足之处,有待进一步改进,包括:在探讨珠三角地区农地变化驱动力时仅基于2000-2010年单一时期数据进行分析,而农地变化驱动力在不同时期可能不一致,在下一步工作中需进行多

期数据分析,以明晰驱动力的时间差异性;研究中使用了大量的空间数据,其分辨率虽然能满足区域尺度研究要求,但不可避免地降低了模型精度,未来应获取更精细化数据,并在回归模型中纳入更多驱动因子,以降低模型偏差。

#### 参考文献(References):

- [1] Foley J A, Defries R, Asner G P, et al. Global consequences of land use[J]. *Science*, 2005, 309(5734): 570-574.
- [2] Verburg P H, Soepboer W, Veldkamp A, et al. Modeling the spatial dynamics of regional land use: The clue-s model[J]. *Environmental Management*, 2002, 30(3): 391-405.
- [3] Fleskens L, Duarte F, Eicher I. A conceptual framework for the assessment of multiple functions of agro-ecosystems: A case study of Tras-os-Montes olive groves[J]. *Journal of Rural Studies*, 2009, 25(1): 141-155.
- [4] Pielke R A. Land use and climate change[J]. *Science*, 2005, 310(5754): 1625-1626.
- [5] 周小平,王情,谷晓坤,等. 基于 Logistic 回归模型的农户宅基地置换效果影响因素研究-以上海市嘉定区外冈镇宅基地置换为例[J]. *资源科学*, 2015, 37(2): 258-264. [Zhou X P, Wang Q, Gu X K, et al. Factors influencing the effect of rural residence replacement based on logistic regression modeling for Waigang, Shanghai[J]. *Resources Science*, 2015, 37(2): 258-264.]
- [6] Swetnam R D. Rural land use in England and Wales between 1930 and 1998: Mapping trajectories of change with a high resolution spatio-temporal dataset[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 81(1-2): 91-103.
- [7] 古琳,刘波,龚固堂,等. 成都市近20年林地景观变化特征[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(5): 1081-1089. [Gu L, Liu B, Gong G T, et al. Dynamic characteristics of forest landscape in Chengdu City in last 20 years[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(5): 1081-1089.]
- [8] 周青,黄贤金,濮励杰,等. 区域农地利用变化强度及其驱动机制研究-以原锡山市为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2003, 12(6): 535-540. [Zhou Q, Huang X J, Pu L J, et al. Intensity and mechanism in change of regional agricultural land use-a case study of former Xishan city of Wuxi city[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2003, 12(6): 535-540.]
- [9] 刘彦随,王介勇,郭丽英. 中国粮食生产与耕地变化的时空动态[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(12): 4269-4274. [Liu Y S, Wang J Y, Guo L Y. The spatial-temporal changes of grain production and arable land in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(12): 4269-4274.]

- [10] 徐新良,刘纪远,庄大方,等. 基于3S技术的中国东北地区林地时空动态特征及驱动力分析[J]. 地理科学, 2004, 24(1): 55-60. [Xu X L, Liu J Y, Zhuang D F, et al. Analysis on spatial-temporal characteristics and driving factors of woodland change in the northeastern China based on 3s technology[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2004, 24(1): 55-60.]
- [11] 谭永忠,吴次芳,王庆日,等. “耕地总量动态平衡”政策驱动下中国的耕地变化及其生态环境效应[J]. 自然资源学报, 2005, 20(5): 727-734. [Tan Y Z, Wu C F, Wang Q R, et al. The change of cultivated land and ecological environment effects driven by the policy of dynamic equilibrium of the total cultivated land[J]. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(5): 727-734.]
- [12] Song W, Pijanowski B C. The effects of China's cultivated land balance program on potential land productivity at a national scale [J]. *Applied Geography*, 2014, 46: 158-170.
- [13] Halmy M W A, Gessler P E, Hicke J A, et al. Land use/land cover change detection and prediction in the north-western coastal desert of Egypt using Markov-CA[J]. *Applied Geography*, 2015, 63: 101-112.
- [14] Gong W, Yuan L, Fan W, et al. Analysis and simulation of land use spatial pattern in Harbin prefecture based on trajectories and cellular automata-Markov modelling[J]. *International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation*, 2015, 34(1): 207-216.
- [15] Chen J, Chang K T, Karacsonyi D, et al. Comparing urban land expansion and its driving factors in Shenzhen and Dongguan, China[J]. *Habitat International*, 2014, 43(3): 61-71.
- [16] Jiang W G, Chen Z, Lei X, et al. Simulating urban land use change by incorporating an autologistic regression model into a CLUE-S model[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2015, 25(7): 836-850.
- [17] Seto K C, Michail F, Burak G, et al. A meta-analysis of global urban land expansion[J]. *PLoS ONE*, 2011, 6(8): e23777-e23777.
- [18] Thapa R B, Murayama Y. Drivers of urban growth in the Kathmandu Valley, Nepal: Examining the efficacy of the analytic hierarchy process[J]. *Applied Geography*, 2010, 30(1): 70-83.
- [19] Shu B, Zhang H, Li Y, et al. Spatiotemporal variation analysis of driving forces of urban land spatial expansion using logistic regression: A case study of port towns in Taicang City, China[J]. *Habitat International*, 2014, 43(4): 181-190.
- [20] 刘小平,黎夏,叶嘉安. 基于多智能体系统的空间决策行为及土地利用格局演变的模拟[J]. 中国科学D辑:地球科学, 2006, 36(11): 1027-1036. [Liu X P, Li X, Ye G O. Multi-agent systems for simulating spatial decision behaviors and land-use dynamics[J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 2006, 49(11): 1184-1194.]
- [21] Dendoncker N, Rounsevell M, Bogaert P. Spatial analysis and modelling of land use distributions in Belgium[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2007, 31(2): 188-205.
- [22] 马晴,李丁,廖杰,等. 疏勒河中下游绿洲土地利用变化及其驱动力分析[J]. 经济地理, 2014, 34(1): 148-155. [Ma Q, Li D, Liao J, et al. Analysis of land use change and its driving forces in the oasis of Shule river middle and lower reaches[J]. *Economic Geography*, 2014, 34(1): 148-155.]
- [23] 牛星,欧名豪. 扬州市土地利用变化的驱动力机制研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2007, 17(1): 102-108. [Niu X, Ou M H. A study on driving-force system of regional land-use change: Taking Yangzhou city as an example[J]. *China Population Resources and Environment*, 2007, 17(1): 102-108.]
- [24] 谢菲,舒晓波,廖富强,等. 浮梁县土地利用变化及驱动力分析[J]. 水土保持研究, 2011, 18(2): 213-217. [Xie F, Shu X B, Liao F Q, et al. Analysis on land use change and driving forces in Fuliang County, Jiangxi Province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2011, 18(2): 213-217.]
- [25] Piorecky M D, Prescott D R C. Multiple spatial scale logistic and autologistic habitat selection models for northern pygmy owls, along the eastern slopes of Alberta's rocky mountains[J]. *Biological Conservation*, 2006, 129(3): 360-371.
- [26] 王祺,蒙吉军,毛熙彦. 基于邻域相关的漓江流域土地利用多情景模拟与景观格局变化[J]. 地理研究, 2014, 33(6): 1073-1084. [Wang Q, Meng J J, Mao X Y. Scenario simulation and landscape pattern assessment of land use change based on neighborhood analysis and auto-logistic model: A case study of Lijiang river basin[J]. *Geographical Research*, 2014, 33(6): 1073-1084.]
- [27] 中国科学院资源环境科学数据中心. 中国土地利用现状遥感监测数据(2000, 2010)[DB/OL]. [2015-07-01]. <http://www.resdc.cn>. [Data Center for Resources and Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences (RESDC). Remote Sensing Data for Modern Land Use in China (2000, 2010)[DB/OL]. [2015-07-01]. <http://www.resdc.cn>.]
- [28] 谢花林,李波. 基于Logistic回归模型的农牧交错区土地利用变化驱动力分析-以内蒙古翁牛特旗为例[J]. 地理研究, 2008, 27(2): 294-304. [Xie H L, Li B. Driving forces analysis of land-use pattern changes based on logistic regression model in the farming-pastoral zone: A case study of Ongiud Banner, Inner Mongolia[J]. *Geographical Research*, 2008, 27(2): 294-304.]
- [29] 吴巍,周生路,魏也华,等. 城乡结合部土地资源城镇化的空间驱动模式分析[J]. 农业工程学报, 2013, (16): 220-228. [Wu W, Zhou S L, Wei Y H, et al. Modeling spatial determinants of land urbanization in urban fringe[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2013, (16): 220-228.]

2016年4月

- [30] Dubovyk O, Sliuzas R, Flacke J. Spatio-temporal modelling of informal settlement development in Sancaktepe district, Istanbul, turkey[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2011, 66(2):235-246.
- [31] 马明国, 王建, 王雪梅. 基于遥感的植被年际变化及其与气候关系研究进展[J]. *遥感学报*, 2006, 10(3):421-431. [Ma M G, Wang J, Wang X M. Advance in the inter-annual variability of vegetation and its relation to climate based on remote sensing[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 10(3):421-431.]
- [32] 中国气象科学数据共享服务网. 中国地面累年值年值数据集 [DB/OL]. [2015-07-01]. <http://cdc.nmic.cn/home.do>. [China Meteorological Data Sharing Service System. Annual Dataset of China Ground Cumulative Annual Value [DB/OL]. [2015-07-01]. <http://cdc.nmic.cn/home.do>.]
- [33] 国家地球系统科学数据共享平台. 中国公里网格土壤碳分布 [DB/OL]. [2015-07-01]. <http://www.geodata.cn/>. [National Data Sharing Infrastructure of Earth System Science. Distribution of China Soil Carbon in 1km Grid [DB/OL]. [2015-07-01]. <http://www.geodata.cn/>.]
- [34] 于建军, 杨锋, 吴克宁, 等. 河南省土壤有机碳储量及空间分布 [J]. *应用生态学报*, 2008, 19(5):1058-1063. [Yu J J, Yang F, Wu K N, et al. Soil organic carbon storage and its spatial distribution in Henan Province[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(5):1058-1063.]
- [35] 中国科学院资源环境科学数据中心. 全国人口空间分布公里网格数据(2000,2010)[DB/OL]. [2015-07-01]. <http://www.resdc.cn>. [Data Center for Resources and Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences (RESDC). Spatial Distribution of National Population in 1km grid (2000, 2010) [DB/OL]. [2015-07-01]. <http://www.resdc.cn>.]
- [36] 中国科学院资源环境科学数据中心. 全国GDP空间分布公里网格数据(2000,2010)[DB/OL]. [2015-07-01]. <http://www.resdc.cn>. [Data Center for Resources and Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences (RESDC). Spatial Distribution of National GDP in 1km grid (2000, 2010) [DB/OL]. [2015-07-01]. <http://www.resdc.cn>.]
- [37] 广州市统计局. 广州统计年鉴[J]. 北京: 中国统计出版社, 2001, 2011. [Guangzhou Municipal Bureau of Statistics. Statistic yearbook of Guangzhou [J]. Beijing: Chinese Statistics Press, 2001, 2011.]
- [38] 深圳市统计局. 深圳统计年鉴[J]. 北京: 中国统计出版社, 2001, 2011. [Shenzhen Municipal Bureau of Statistics. Statistic yearbook of Shenzhen [J]. Beijing: Chinese Statistics Press, 2001, 2011.]
- [39] 佛山市统计局. 佛山统计年鉴[J]. 北京: 中国统计出版社, 2001, 2011. [Foshan Municipal Bureau of Statistics. Statistic yearbook of Foshan [J]. Beijing: Chinese Statistics Press, 2001, 2011.]
- [40] 东莞市统计局. 东莞统计年鉴[J]. 北京: 中国统计出版社, 2001, 2011. [Foshan Municipal Bureau of Statistics. Statistic yearbook of Foshan [J]. Beijing: Chinese Statistics Press, 2001, 2011.]
- [41] 中山市统计局. 中山统计年鉴[J]. 北京: 中国统计出版社, 2001, 2011. [Zhongshan Municipal Bureau of Statistics. Statistic yearbook of Zhongshan [J]. Beijing: Chinese Statistics Press, 2001, 2011.]
- [42] 珠海市统计局. 珠海统计年鉴[J]. 北京: 中国统计出版社, 2001, 2011. [Zhuhai Municipal Bureau of Statistics. Statistic yearbook of Zhuhai [J]. Beijing: Chinese Statistics Press, 2001, 2011.]
- [43] 江门市统计局. 江门统计年鉴[J]. 北京: 中国统计出版社, 2001, 2011. [Jiangmen Municipal Bureau of Statistics. Statistic yearbook of Jiangmen [J]. Beijing: Chinese Statistics Press, 2001, 2011.]
- [44] 肇庆市统计局. 肇庆统计年鉴[J]. 北京: 中国统计出版社, 2001, 2011. [Zhaoqing Municipal Bureau of Statistics. Statistic yearbook of Zhaoqing [J]. Beijing: Chinese Statistics Press, 2001, 2011.]
- [45] 惠州市统计局. 惠州统计年鉴[J]. 北京: 中国统计出版社, 2001, 2011. [Huizhou Municipal Bureau of Statistics. Statistic yearbook of Huizhou [J]. Beijing: Chinese Statistics Press, 2001, 2011.]
- [46] 国家基础地理信息中心. 中国1:400万基础地理数据[DB/OL]. [2015-07-01]. <http://www.ngcc.cn/>. [National Geomatics Center of China. 1: 4 000 000 China basic geographical data[DB/OL]. [2015-07-01]. <http://www.ngcc.cn/>.]
- [47] 朱会义, 李秀彬, 何书金, 等. 环渤海地区土地利用的时空变化分析[J]. *地理学报*, 2001, 56(3):253-260. [Zhu H Y, Li X B, He S J, et al. Spatio-temporal change of land use in Bohai Rim[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(3):253-260.]
- [48] 李志, 刘文兆, 郑粉莉. 基于CA-Markov模型的黄土塬区黑河流域土地利用变化[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(1):346-352. [Li Z, Liu W Z, Zheng F L. Land use change in Heihe catchment on loess tableland based on CA-Markov model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2010, 26(1):346-352.]
- [49] 张金屯, 邱扬, 郑凤英. 景观格局的数量研究方法[J]. *山地学报*, 2000, 18(4):346-352. [Zhang J T, Qiu Y, Zheng F Y. Quantitative methods in landscape pattern analysis[J]. *Journal of Mountain Science*, 2000, 18(4):346-352.]
- [50] Wu J. Effects of changing scale on landscape pattern analysis: Scaling relations[J]. *Landscape Ecology*, 2004, 19(2):125-138.
- [51] Besag J, Besag J. Spatial interaction and the statistical analysis of lattice systems[J]. *Journal of the Royal Statistical Society*, 1974, 36

- (2):192-236.
- [52] Pontius R. Quantification error versus location error in comparison of categorical maps[J]. *Photogramm Eng Remote Sens*, 2000, 66(8):1011-1016.
- [53] 邱彭华,徐颂军,谢跟踪,等. 基于景观格局和生态敏感性的海南西部地区生态脆弱性分析[J]. *生态学报*, 2007, 27(4):1257-1264. [Qiu P H, Xu S J, Xie G Z, et al. Analysis on the ecological vulnerability of the western Hainan island based on its landscape pattern and ecosystem sensitivity[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(4):1257-1264.]
- [54] 彭建,王仰麟,张源,等. 滇西北生态脆弱区土地利用变化及其生态效应-以云南省永胜县为例[J]. *地理学报*, 2004, 59(4):629-638. [Peng J, Wang Y L, Zhang Y, et al. Land use change and its ecological effect in the ecotone of northwest of Yunnan Province, China: A case study of Yongsheng County[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(4):629-638.]
- [55] 郭琳,宋戈,张远景,等. 基于最佳分析粒度的巴彦县土地利用景观空间格局分析[J]. *资源科学*, 2013, 35(10):2052-2060. [Guo L, Song G, Zhang Y J, et al. Land-use spatial analysis for Bayan County based on optimal grain size[J]. *Resources Science*, 2013, 35(10):2052-2060.]
- [56] 邓祥征,刘纪远,战金艳,等. 太仆寺旗土地利用变化时空格局的动态模拟[J]. *地理研究*, 2004, 23(2):147-156. [Deng Z X, Liu J Y, Zhan J Y, et al. Landscape pattern and spatial feature of land use in Taips County in Inner Mogolia[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2004, 23(2):147-156.]
- [57] 徐嘉兴,李钢,陈国良. 基于 Logistic 回归模型的矿区土地利用演变驱动力分析[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(20):247-255. [Xu J X, Li G, Chen G L. Driving force analysis of land use change based on Logistic regression model in Mining Area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2012, 28(20):247-255.]
- [58] 石淑芹,曹祺文,李正国,等. 气候与社会经济因素对土壤有机质影响的空间异质性分析-以黑龙江省中部地区为例[J]. *中国生态农业学报*, 2014, 22(9):1102-1112. [Shi S Q, Cao Q W, Li Z G, et al. Influence of spatial heterogeneity of climatic and socio-economic factors on soil organic matter-a case study of the central Heilongjiang Province, China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(9):1102-1112.]
- [59] 王雪微,王士君,宋飏,等. 交通要素驱动下的长春市土地利用时空变化[J]. *经济地理*, 2015, 35(4):155-161. [Wang X W, Wang S J, Song Y, et al. Changchun land use spatio-temporal variation under the transportation elements' driving[J]. *Economic Geography*, 2015, 35(4):155-161.]

# Drivers of regional agricultural land changes based on spatial autocorrelation in the Pearl River Delta, China

CAO Qiwen<sup>1</sup>, WU Jiansheng<sup>1,2</sup>, TONG De<sup>1</sup>, ZHANG Xiaona<sup>3</sup>, LU Zhiqiang<sup>1</sup>, SI Menglin<sup>1</sup>

*(1. Key Laboratory of Urban Habitant Environment Science and Technology, School of Urban Planning and Design, Peking University, Shenzhen 518055, China;*

*2. Laboratory of Earth Surface Processes of Ministry of Education, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;*

*3. School of Management, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)*

**Abstract:** Land use/cover change (LUCC) is at the core of global change and agricultural land change is important in the study of LUCC. With socio-economic development, pressure on agricultural land protection has been increasing in China. To develop sustainable land use policy, we need to understand regional agricultural land changes and driving forces. Using land use monitoring data, basic geographic spatial data and statistical yearbooks, we analyzed characteristic of agricultural land change in the Pearl River Delta Area, China. Traditional Logistic modeling and AutoLogistic modeling which bring in spatial autocorrelation were compared to investigate the drivers of agricultural land change at regional scale from the perspectives of natural, socio-economic, spatial distance and spatial autocorrelation of land use characteristics. We found that cultivated land and forest in this region decreased from 2000 to 2010, leading to further fragmentation. Cultivated land has become a main source of expansion of construction land. And, both spatial autocorrelation of agricultural land property and land development intensity are important driving forces of agricultural land change. As for other driving forces, cultivated land change was mainly affected by factors such as ‘change of per kilometer GDP’, ‘distance to nearest railway’, ‘change of total population density’, ‘tendency rate of annual sunshine hours’. Forest changes were mainly affected by ‘change of per kilometer GDP’, ‘change of total population density’, ‘slope’ and ‘distance to nearest road’. Compared with traditional Logistic modeling, the AutoLogistic model is more suited to study driving forces of regional agricultural land change.

**Key words:** agricultural land change; driving forces; spatial autocorrelation; Logistic model; Autologistic model; Pearl River Delta Area