

文章编号:1671-4229(2022)03-0081-08

广东省 2035 年土地利用空间分布的模拟预测

许贤炯, 龚建周, 陈晓越*

(广州大学 地理科学与遥感学院, 广东 广州 510006)

摘要:明确区域未来土地利用空间分布,是解决土地资源短缺和优化土地利用布局的前提。文章以我国GDP排名连续第一的广东省为研究区域,基于地理探测器剖析土地利用变化的主控因素,采用马尔科夫模型模拟未来2035年各土地利用类型数量,最后用FLUS模型模拟预测未来广东省土地利用的空间分布。模拟结果表明,2035年广东省建设用地增长最快,林地减少最多,这与珠三角地区建设用地持续侵占耕地、林地密切相关。耕地和林地的保护仍然是未来解决人地矛盾的重点与难点。

关键词:土地利用空间分布; FLUS模型; 地理探测器; 模拟预测; 广东省

中图分类号: F 301.24

文献标志码: A

Simulation and prediction of spatial distribution of land use in Guangdong province in 2035

XU Xian-jiong, GONG Jian-zhou, CHEN Xiao-yue*

(School of Geography and Remote Sensing, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: It is a fundamental prerequisite for the solution of land resource shortage and the optimization of land use layout to clarify the regional spatial distribution of future land use. This paper selects Guangdong province, which has been ranked first in GDP in China for years, as the study area for the following analysis. The first one is to analyze the main factors of land use change based on the simulations with GeoDetector to the quantity of the land use types in 2035 by using Markov model. The second one is to simulate and predict the spatial distribution of land use in Guangdong province in the future with FLUS model. The results show that the construction land of Guangdong will grow the fastest while the forest land will decrease the most in 2035. Meanwhile, the construction land will continue to encroach the cultivated land and the forest land. Consequently, the protection of cultivated land and forest land is still the focus and difficulty in solving the future contradiction between human and land resources.

Key words: spatial distribution of land use; FLUS model; GeoDetector; simulation and prediction; Guangdong province

土地利用是人类有目的地开发利用土地资源的一种人为活动^[1]。人类活动不断地改变着地表土地覆盖,引起土地利用变化,进而影响生态系统的结构和功能,改变水循环、碳氮循环等生态过程^[2];并通过改变大气组成成分,对地表温度、降水等大气状况产生影响,由此

作用于区域气候变化^[3],加剧了人地矛盾^[4]。1995年,国际地圈生物圈计划(IGBP)和全球环境变化人文计划(IHDP)联合提出“土地利用研究计划”,之后土地利用变化引起学者的广泛关注。我国在《第十四个五年计划和2035年远景目标纲要》中明确提出优化城镇化空间

基金项目: 国家自然科学基金项目(42071123)

作者简介: 许贤炯(1998—),男,硕士研究生. E-mail:geo_xxj@163.com

*通信作者. E-mail: chenxiaoyue@gzhu.edu.cn

引文格式:许贤炯,龚建周,陈晓越.广东省2035年土地利用空间分布的模拟预测[J].广州大学学报(自然科学版),2022,21(3):81-88.

布局,优化配置土地资源,深入践行生态文明理念,解决土地资源短缺和土地利用布局不合理等问题。《广东省 2020-2035 年国土空间规划》进一步强调落实耕地保护、建立生态保护红线,优化农业空间布局及营造良好生态空间。土地利用变化受到学者和政府的广泛关注,对其展开研究有利于解决一系列自然环境问题和社会发展问题。

至今,有关土地利用变化的研究已集中在数据资料的挖掘、驱动与演变机制、环境效应、未来演变模拟等几个方面^[1-5]。其中,土地利用的模型预测主要从数量预测和空间分布预测 2 个方面展开。数量预测主要有系统动力学(SD)^[6]、马尔科夫和灰色预测^[7]等模型。应用较为广泛的空间分布预测模型主要有 CLUE-S 模型^[8]和元胞自动机模型(CA)^[9]。其中 CLUE-S 模型只考虑将元胞分配给最终转换概率最大的土地利用类型,忽略其他概率较小的土地利用类型的转换机会;刘小平等提出的 FLUS 模型引入自适应惯性竞争机制,与 CLUE-S 模型相比更重视土地利用变化的不确定性^[10],该模型已被用于城市增长边界划定^[11-12]、生态空间模拟预测^[13]和土地利用预测^[14]等方面。开展规划目标年的土地利用数量与空间分布的模型预测研究,可为优化城镇化空间布局 and 合理配置土地资源的决策与实践提供研究支撑,也是未来土地利用规划的基础。

广东省是我国的经济大省和强省,全省 GDP 已连续 31 年位居全国第一^[15]。随着城市化进程不断推进,建设用地侵占大量耕地、林地的现象导致土地资源紧缺,已成为经济和农业发展的瓶颈^[16]。广东省正处于城市快速发展阶段,土地利用结构不合理、生态用地减少使广东省生态环境压力与日俱增,同时也威胁到广东省的可持续发展。本文基于研究区 2010 年和 2015 年土地利用数据和同期自然社会经济的驱动因子,运用 FLUS 模型模拟预测 2035 年土地利用空间分布,以期为实现 2035 年远景目标和优化城市土地利用布局、缓解生态环境压力提供研究支撑。

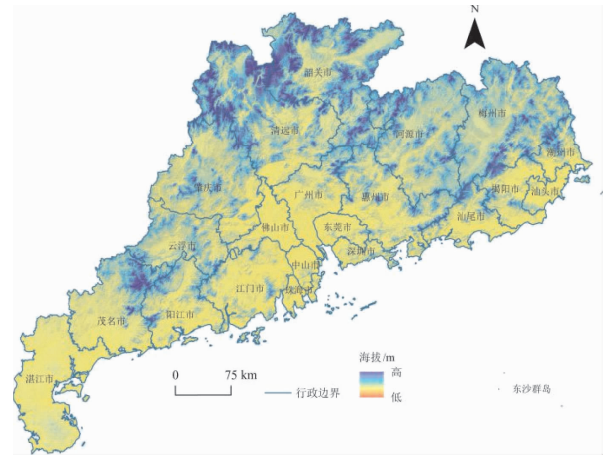
1 研究区概况、数据与方法

1.1 研究区概况与数据

1.1.1 研究区概况

广东省(20°09'~25°31' N, 109°45'~117°20' E)位于我国东南部,南临南海,共有 21 个地级市,面积达 17.97 万 km²。地势总体北高南低,如图 1 所示,以山地、丘陵和平原为主。广东省年均气温大于 20 °C,年均降水量

超 1 500 mm。据第七次全国人口普查数据,广东省常住人口超 1.26 亿人,与 2010 年第六次全国人口普查相比增长 20.81%,城镇化率超 70%;2020 年广东省地区生产总值超 110 760.94 亿元,居于全国首位,经济发展迅速。



注:绘制底图来源于国家自然资源部 <http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/> (审图号:GS(2019)3333 号)

图 1 广东省地形地貌图

Fig. 1 Guangdong topographic map

1.1.2 数据及预处理

研究数据包括土地利用(2010 年和 2015 年)、行政区划数据(2015 年)以及与土地利用同期的自然和社会经济数据(表 1),部分年份缺失的数据由最近年份数据代替。土地利用空间分布是自然和人类活动共同作用的结果,结合了广东省自然环境、社会经济环境的特点,并综合考虑数据可得性、数据一致性和因子可量化性,最终把自然环境中的海拔、坡度、气象条件、河流距离以及社会经济环境中的人口密度、人均 GDP 以及与铁路和公路的距离作为驱动因子,这些因子在较大程度上决定着土地的可利用性^[17]。在进行模拟预测前,对数据进行一系列预处理,包括重投影、按掩膜提取、重分类和重采样等空间分析过程,最终把数据转换成行列数为 605 × 754 的 1 km × 1 km 栅格,使用数据的公共部分进行模拟预测。

1.2 研究方法

拟以研究区 2010 年和 2015 年土地利用数据为基准,利用 FLUS 模型模拟 2035 年土地利用空间分布状况。运用 FLUS 模型模拟的过程需要经历 3 个关键步骤:①预测未来目标年各土地利用类型的数量;②运用计算土地利用适宜性概率;③基于 CA 原理的土地利用类型转换。本研究首先以 2010-2015 年土地利用转移概率为基准,预测得到 2015 年和 2035 年土地利用的数

量,并验证模型的可行性。

表 1 土地利用数据及驱动力因子数据

Table 1 Land use and driving factors data

数据类型	数据名称	数据	年份	数据来源
基础数据	土地利用数据	土地利用数据	2010 年、2015 年	资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/)
	行政区划数据	行政区划数据	2015 年	
驱动因子	自然环境数据	DEM	-	地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/)
		坡度	-	通过对 DEM 数据的空间分析得到
	年降水量	2010 年、2015 年	资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/)	
	年均气温	2010 年、2015 年		
	河流	2013 年、2015 年	OpenStreetMap 网站(https://www.openstreetmap.org/)	
	社会经济数据	人口密度	2010 年、2015 年	资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/)
		地均 GDP	2010 年、2015 年	
铁路		2013 年、2015 年	OpenStreetMap 网站(https://www.openstreetmap.org/)	
	公路	2013 年、2015 年		

然后,采用地理探测器探测所有驱动因子和土地利用适宜性的关系,在保证合理选取土地利用适宜性驱动因子的前提下,利用 FLUS 内嵌的神经网络算法(ANN)模块,计算土地利用适宜性概率。有关模型分别介绍如下:

1.2.1 FLUS 模型

(1) 基于人工神经网络计算适宜性概率

FLUS 模型中借助 BP-ANN 人工神经网络模型,将一期土地利用数据和形成各类土地利用的驱动因子结合计算出各土地利用类型的分布适宜性概率,BP-ANN 是一种多层前馈神经网络,由输入层、隐藏层和输出层 3 个神经层组成,其中输入层神经元与驱动因子对应,输出层神经元则与各种土地利用类型对应^[17-18],适宜性概率的计算公式如下:

$$P(t,x,y) = \sum_j w_{j,k} \times \text{sigmoid}(\text{net}_j(x,t)) = \sum_j w_{j,k} \times \frac{1}{1 + e^{-\text{net}_j(x,t)}} \quad (1)$$

式中, $P(t,x,y)$ 表示 t 时刻元胞 x 转换为土地利用类型 y 的适宜性概率, $w_{j,k}$ 是隐藏层与输出层之间的权重, $\text{sigmoid}()$ 是隐藏层到输出层的激励函数, $\text{net}_j(x,t)$ 是第 j 个隐藏层 t 时刻在元胞 x 上接收到的信号。 $\sum P(t,x,y)$ 恒为 1,体现了土地利用类型之间的联系与竞争关系。

(2) 自适应惯性竞争机制

FLUS 模型在传统的 CA 模型上作出了明显改进,它基于自适应惯性竞争机制,土地利用的转化能否实现取决于土地利用最终转换概率和轮盘赌的结果,前者取决于适宜性概率、惯性系数、邻域因子和转换成本,后者的融入使得最终转换概率较低的土地利用仍有机会发生

转化,充分考虑到土地利用变化的不确定性,提高了模型的精度^[17-18],具体原理如下:

1) 惯性系数由当前土地利用数量与未来的土地需求决定,在迭代计算过程中不断自我调整,确保模拟得到的土地利用数量与需求量近似。其公式为

$$I_y^t = \begin{cases} I_y^{t-1} & \text{if } |D_y^{t-1}| \leq |D_y^{t-2}| \\ I_y^{t-1} \times \frac{D_y^{t-2}}{D_y^{t-1}} & \text{if } D_y^{t-1} < D_y^{t-2} < 0 \\ I_y^{t-1} \times \frac{D_y^{t-1}}{D_y^{t-2}} & \text{if } 0 < D_y^{t-2} < D_y^{t-1} \end{cases} \quad (2)$$

式中, I_y^t 为当迭代次数为 t 时土地利用类型 y 的惯性系数; D_y^{t-1} 和 D_y^{t-2} 分别为当迭代次数为 $t-1$ 次和 $t-2$ 次时土地利用类型 y 预测栅格数与需求量的差值。

2) 邻域因子表示邻近元胞之间的相互作用,公式如下:

$$\Omega_{x,y} = \frac{\sum_{N \times N} \text{con}(c_x^{t-1} = y)}{N \times N - 1} \times W_k \quad (3)$$

式中, $\sum_{N \times N} \text{con}(c_x^{t-1} = y)$ 表示土地利用类型 y 在 $t-1$ 次迭代时,在 $N \times N$ 邻域范围内所占有的元胞数目; W_k 为不同地类邻域作用的权重,其处于 $[0,1]$ 之间,值越大则表示该土地利用类型的扩张能力越强。

3) 转换成本指当前土地利用类型转换为其他类型的难易程度,其值为 0 或 1,当允许转化时设定为 1,不允许转化时设定为 0。

4) 最终转换概率是每种土地利用类型最终出现在不同元胞上的概率,表达式为

$$TP_{x,y}^t = P_{x,y} \times \Omega_{x,y} \times I_y^t \times (1 - sc_{c \rightarrow y}) \quad (4)$$

式中, $TP'_{x,y}$ 表示元胞 x 在 t 时从初始土地利用类型转变为类型 k 的概率, $P_{x,y}$ 为适宜性概率, $\Omega_{x,y}$ 为邻域因子, I_y 为惯性系数, $sc_{c \rightarrow y}$ 为土地利用类型 c 转化为类型 k 的转换成本。

1.2.2 地理探测器

地理探测器是探测空间分异性及其驱动因子的方法,它要求自变量为类型变量,如果原数据为连续型变量,则需进行离散化处理,这明确了地理探测器是一种非线性模型,避免了自变量之间存在多重共线性的问题^[19]。地理探测器分成 4 个模块,分别为因子探测、交互作用探测、风险区探测和生态探测,该探测模型在研究土地利用变化驱动因子中应用越来越广泛^[20],对不同地理现象也有较强的适应性。本文以土地利用数据为因变量,地均 GDP、人口密度、土壤类型、海拔、坡度、距公路距离、距铁路距离、距水系距离、年均气温和年降水量为自变量,使用因子探测来明确土地利用变化的驱动因子,提高未来土地利用模拟的精度,计算公式如下:

$$q = 1 - \left(\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \right) / N \sigma^2 = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (5)$$

式中, L 为自变量的数目; N_h 为第 h 类的样本数目, N 为总样本数目; σ_h^2 为第 h 类的方差, σ^2 为样本因变量的方差。 q 的值域为 $[0, 1]$, q 值越大,代表自变量 X 对因变量 Y 的解释力越强。连续型自变量的离散化方法不同或划分等级数目不同都会对驱动因子的探测结果有影响,因此,有学者提出以 q 值的大小来评判分区效果, q 值越大,离散化效果越好^[21-22]。

1.2.3 马尔科夫模型

马尔科夫过程中假设事件的状态转移只与前一时刻的状态有关,与过去的状态无关,这种性质也称为无

后效性。土地利用变化也具有无后效性,因此,可以采用马尔科夫模型对未来土地利用需求进行预测^[23]。其一般表达式为

$$\pi(k) = \pi(k-1)P = \pi(0)P^k \quad (6)$$

式中, $\pi(k)$ 为 k 时刻的状态概率向量; $\pi(0)$ 为初始状态概率向量,即预测初期各土地利用类型面积与总面积的比值; P 为状态转移概率矩阵, P_{ij} 为预测期间土地利用类型从状态 i 转移到状态 j 的状态转移概率。预测结果取决于初始状态概率向量和状态转移概率矩阵。

由于马尔科夫模型在长时间尺度预测上容易产生较大偏差,综合考虑时间的长短及数据的可得性,本文土地利用需求预测的时间间隔为 5 年。

但马尔科夫模型只能对未来土地利用需求进行预测,而不能明确其空间分布,元胞自动机模型(CA)与马尔科夫模型的结合可以解决上述问题。

2 结果与分析

2.1 广东省土地利用演化过程

土地利用转移矩阵可以清楚展示各种土地利用类型之间的转化情况。本文利用广东省 2010 年和 2015 年土地利用数据,汇制土地利用转移矩阵(表 2)。2010 - 2015 年土地利用转换发生在耕地、林地、草地以及建设用地之间,其中耕地、林地转变为建设用地的面积分别为 365 km² 和 310 km²; 林地转草地的面积为 377 km²。面积增加的是建设用地和草地,并以建设用地增加更明显;耕地和林地面积呈下降趋势,两者相比,林地减少更快;水域和未利用土地变化较小。未来耕地和林地的保护仍然是重中之重。

表 2 2010 - 2015 年广东省土地利用转移矩阵

Table 2 Land use transfer matrix of Guangdong from 2010 to 2015

/km²

2010 年	2015 年					
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用土地
耕地	41 085	3	6	6	365	0
林地	34	106 420	377	7	310	0
草地	3	3	7 116	0	48	0
水域	0	3	8	6 007	76	0
建设用地	0	1	1	2	10 515	0
未利用土地	0	0	0	0	0	84

2.2 土地利用变化的地理探测、FLUS 模型训练及精度验证

2.2.1 地理探测

土地利用变化是自然和社会经济方面多种驱动因

子综合作用的结果。使用地理探测分析土地利用变化需要将驱动因子数据离散化,但是不同的离散化方法或分级数量都会直接影响到驱动分析结果。常见的离散化方法有标准差分级(Standard Deviation, SD)、自然间断

点分级(Natural Breaks,NB)、几何间隔分级(Geometrical Interval,GI)、等间隔分级(Equal Interval,EI)和分位数分级(Quantile,QU)5种方法。为此,本文同时运用以上5

种方法,对所有连续型驱动因子进行离散化处理,将其结果运用于地理探测,计算并比较q值,取最大q值对应的离散化结果,列于表3。

表 3 地理探测器分区及因子探测结果
Table 3 The result of geodetector zoning and factor detection

驱动因子	最佳离散化方法	分级数值	q 值	p 值
人口密度	SD	[0,66.04][66.04,275.93][275.93,906.08][906.08,1536.23][1536.23,2166.39][2166.39,2796.54][2796.54,3426.70][3426.7,4056.85][4056.85,37213.1]	0.128	0
海拔	GI	[-52,1.54][1.54,5.47][5.47,15.47][15.47,40.92][40.92,105.66][105.66,270.38][270.38,689.52][689.52,1756]	0.044	0
距铁路距离	QU	[0,3000][3000,7071.07][7071.07,12083][12083,18357.6][18357.6,25709.9][25709.9,35510.6][35510.6,49929.9][49929.9,95718.3]	0.024	0
距公路距离	GI	[0,33.4][33.4,1182.59][1182.59,40718.5]	0.030	0
距水系距离	QU	[0,1000][1000,2000][2000,3000][3000,4242.64][4242.64,6082.76][6082.76,8062.26][8062.26,11704.7][11704.7,58215.1]	0.016	0
地均 GDP	NB	[93.97,671.37][671.37,1894.05][1894.05,4006.68][4006.68,7212.64][7212.64,10409.65][10409.65,14167.83][14167.83,19199.77][19199.77,24550.2]	0.142	0
年降水量	SD	[1479.32,1635.84][1635.84,1746.69][1746.69,1857.54][1857.54,1968.39][1968.39,2079.24][2079.24,2190.1][2190.1,2300.95][2300.95,2711.5]	0.017	0
坡度	GI	[0,0.9][0.9,2.62][2.62,5.9][5.9,12.14][12.14,24.01][24.01,46.62][46.62,89.65]	0.007	0
年均气温	QU	[12.7,19.73][19.73,20.76][20.76,21.39][21.39,21.92][21.92,22.51][22.51,22.95][22.95,23.41][23.41,25.52]	0.038	0
土壤类型	/	/	0.047	0

所选驱动因子均通过 $p = 0.05$ 的显著性检验,此时 q 值具有现实意义,表明本文所选土地利用变化驱动因子合理, q 值越大表示该因子对土地利用变化的解释力越强。驱动因子的影响程度由强到弱分别为地均 GDP、人口密度、土壤类型、海拔、年均气温、距公路距离、距铁路距离、年降水量、距水系距离和坡度。显然,人口密度和 GDP 等社会经济因子的影响程度比自然因子的更大。

2.2.2 土地利用数量结构的马尔科夫模型模拟

本研究以广东省 2010 - 2015 年土地利用转移概率为基准,假设相同时间间隔下不同地类依照此概率平稳变化,以 2010 年为起始年份,利用马尔科夫模型预测得到 2015 年和 2035 年土地利用数量结构。

成本矩阵和邻域权重的设置对模拟结果的精度有重要影响,根据王保盛等^[24]对历史情景下 FLUS 模型邻

域权重设置的研究,同时间尺度下各土地类型面积的变化量的归一化值可以较好地反映不同地类的扩张能力,能够更好地还原历史情景。因此,本文通过 2010 - 2015 年土地利用转移矩阵确定成本矩阵,即均设置为 1,对该时间段内的各土地利用面积变化值进行归一化处理,得出邻域权重参数,计算公式如下:

$$y_i = \frac{x_i - x_{i_min}}{x_{i_max} - x_{i_min}} \quad (7)$$

式中, y_i 是归一化值, x_i 为地类面积变化值, x_{i_max} 、 x_{i_min} 分别表示第 i 种土地利用类型面积变化的最大值和各种地类面积变化值中的最小值。

对不同年份土地利用模拟均采用相同的成本矩阵和邻域权重参数,计算得到的土地利用数量结构和邻域权重参数列于表 4。

表 4 FLUS 模型邻域权重参数和未来土地利用马尔科夫预测值

Table 4 Neighborhood weight parameter and future land use prediction based on Markov model /km²

参数类型	年份	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用土地
土地利用数量结构	2015 年	41 122	106 430	7 508	6 022	11 314	84
	2035 年	39 780	103 608	8 809	5 745	14 454	84
邻域权重参数	/	0.25	0	0.7	0.43	1	0.47

2.2.3 基于 FLUS 模型训练与精度验证

基于设置好的参数,以 2010 年土地利用及同年驱动因子数据,运用 FLUS 模型得到 2015 年的土地利用分布数据;将其与同期土地利用真实数据对比,进行数量精度验证(表 5),结果表明两者十分贴近,FLUS 模型能很好地根据土地利用需求进行空间分布模拟。根据现有数据的公共部分,绘制实际与模拟土地利用分布图层及两者的叠加结果见图 2,两者不一致的情况主要出现在珠三角地区,这些地区经济发展快、人口增长快。采用总体精度、Kappa 系数和 FoM 指数对 2015 年广东省土地利用模拟结果进行空间精度验证,计算得总体精度为 0.98,Kappa 系数为 0.96,FoM 指数为 0.01,进一步证明了 FLUS 模型的空间模拟精度高。为此,将使用当前的参

数,模拟预测 2035 年广东省土地利用空间分布情况。

表 5 2015 年广东省土地利用类型实际与模拟栅格数对比

Table 5 Comparison between actual and simulated grid of land use types in Guangdong in 2015

数量精度验证	2015 年实际值/个	2015 年预测值/个	相对误差/%
耕地	41 122	41 123	0.002 4
林地	106 430	106 429	0.000 9
草地	7 508	7 508	0
水域	6 022	6 022	0
建设用地	11 314	11 314	0
未利用土地	84	84	0

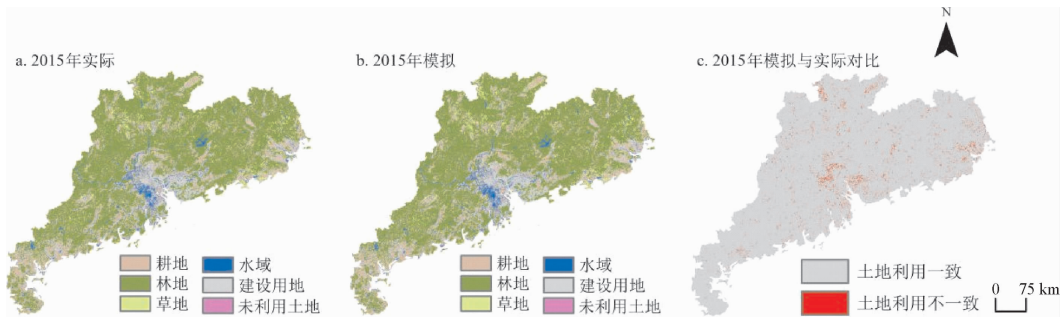


图 2 2015 年广东省实际与模拟土地利用及其叠加结果

Fig. 2 Actual and simulated land use and their superposition results in Guangdong in 2015

2.3 2035 年广东省土地利用模拟预测结果

在通过精度验证的基础上,假定广东省土地利用变化仅按历史变化趋势,即自然、社会经济因子基本沿当前速度发展,本文将该情景定义为自然发展情景。以 2015 年土地利用、年降水量、年均气温、人口密度、人均 GDP、距水系距离、距铁路距离和距公路距离数据为初始条件,其他参数不变,使用数据的公共部分,运用 FLUS 模型模拟 2035 年广东省土地利用,结果见图 3。面积变化见表 6,2015 - 2035 年建设用地和草地持续增加,分别增加 3 140 km² 和 1 301 km²;其中,建设用地集中分布在珠江三角洲城市,扩张范围也集中在该处,主要侵占周围耕地和林地,在其他地区则零散分布;耕地和林地持续减少,分别减少 1 342 km² 和 2 822 km²,耕地连片出现在珠江三角洲外的其他城市,这些城市耕地数量基本不变;水域仍然主要分布在佛山市及河源市,

面积变化微小;林地、草地分布范围涉足广东省各市,在建设用地集中分布的区域面积较少。

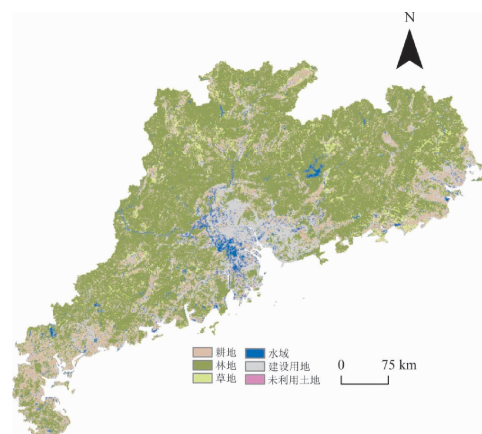


图 3 2035 年广东省模拟土地利用类型图

Fig. 3 Map of simulated land use type in Guangdong in 2035

表6 2015-2035年广东省土地利用面积变化

Table 6 Changes of land use area in Guangdong from 2015 to 2035 /km²

土地利用类型	2015年实际值	2035年预测值
耕地	41 122	39 780
林地	106 430	103 608
草地	7 508	8 809
水域	6 022	5 745
建设用地	11 314	14 454
未利用土地	84	84

3 结论与讨论

3.1 结论

本文基于2010年和2015年的土地利用数据及其驱动因子数据,借助GIS空间分析技术、马尔科夫模型、地理探测器和FLUS模型,对广东省2035年土地利用的空间分布进行模拟研究,主要结论如下:

(1)在对广东省土地利用变化的地理探测基础上,本文选取地均GDP、人口密度、土壤类型、海拔、年均气温、距公路距离、距铁路距离、年降水量、距水系距离以及坡度作为驱动因子;再将马尔科夫和FLUS模型结合,通过对模型训练与验证后,用于模拟预测研究区2035年土地利用。结果表明,研究方案设计能达到令人满意的效果,所选驱动因子对土地利用变化有较好的解释力,模拟结果的总体精度、Kappa系数和FoM指数分别达到0.98、0.96和0.01,FLUS模型可作为理想的土地

利用模拟预测工具。

(2)在自然发展情景下,2015-2035年广东省建设用地、草地、耕地和林地延续了2010-2015年的变化趋势,建设用地、林地面积变化最大,珠江三角洲土地利用变化比其他地区更为明显;而其它地类基本不变。在自然发展情景下,城市建设用地扩张过快,林地、耕地进一步缩减,使广东省生态环境面临更严重威胁,加强对耕地、林地的保护仍然是未来需要面临的重点问题,同时需要制定合理的城市发展规划,进一步提高土地资源的节约集约利用。

3.2 讨论

本研究分析结果的不确定性主要来自3个方面:①未能把所有土地利用变化驱动因子考虑在内,土地利用变化是多因素综合作用的结果,文中只选取了广东省范围内的部分重要影响因素,驱动因子选择的全面性对提高模型模拟精度有重要影响;②在土地利用变化驱动因子的研究方法上,常见的方法有多元线性回归、逻辑回归、地理加权回归和灰色关联度分析等方法,不同分析方法筛选出的驱动因子可能存在差异,最终影响模拟的结果;③土地利用是自然因素和人类活动共同作用的结果,对于未来土地利用模拟,本研究只考虑了自然发展情景,但实际上社会经济因子变化较大以及未来受政策因素的影响也更大,未来土地利用需求与分布也会随之变化,因此,需要从不同的情景综合考虑,才能实现模拟预测结果与现实契合。此外,仍需加强对土地利用转换规则的探讨,避免主观设置,以提高模型模拟的准确性。

参考文献:

- [1] 陈佑启, 杨鹏. 国际上土地利用/土地覆盖变化研究的新进展[J]. 经济地理, 2001, 21(1): 95-100.
- [2] 王永琪, 马姜明. 基于县域尺度珠江-西江经济带广西段土地利用变化对生态系统服务价值的影响研究[J]. 生态学报, 2020, 40(21): 7826-7839.
- [3] 刘振, 潘益农, 张润森, 等. 环太湖地区土地利用变化的局地气候效应[J]. 气象科学, 2013, 33(6): 619-626.
- [4] 陈永林, 谢炳庚, 李晓青, 等. 2003-2013年长沙市土地利用变化与城市化的关系[J]. 经济地理, 2015, 35(1): 149-154.
- [5] 范树平, 程从坤, 刘友兆, 等. 中国土地利用/土地覆盖研究综述与展望[J]. 地域研究与开发, 2017, 36(2): 94-101.
- [6] 田贺, 梁迅, 黎夏, 等. 基于SD模型的中国2010-2050年土地利用变化情景模拟[J]. 热带地理, 2017, 37(4): 547-561.
- [7] 赵小汎, 陈文波, 代力民. Markov和灰色模型在土地利用预测中的应用[J]. 水土保持研究, 2007, 14(2): 19-21.
- [8] 刘欣, 赵艳霞, 冯晓森, 等. 基于CLUE-S模型的多目标土地利用格局模拟与优化——以河北省廊坊市北三县为例[J]. 地理与地理信息科学, 2018, 34(5): 92-98.
- [9] 龚建周, 曹紫薇, 陈康林, 等. 基于元胞自动机模型的广州市用地变化模拟研究[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2013, 12(6): 78-85.
- [10] 王明常, 郭鑫, 王凤艳, 等. 基于FLUS的长春市土地利用动态变化与预测分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2019, 49(6): 1795-1804.
- [11] 吴欣昕, 刘小平, 梁迅, 等. FLUS-UGB多情景模拟的珠江三角洲城市增长边界划定[J]. 地球信息科学学报,

- 2018, 20(4): 532-542.
- [12] 赵林峰, 刘小平, 刘鹏华, 等. 基于地理分区与 FLUS 模型的城市扩张模拟与预警[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(3): 517-530.
- [13] 王旭, 马博文, 李丹, 等. 基于 FLUS 模型的湖北省生态空间多情景模拟预测[J]. 自然资源学报, 2020, 35(1): 230-242.
- [14] 林沛锋, 郑荣宝, 洪晓, 等. 基于 FLUS 模型的土地利用空间布局多情景模拟研究——以广州市花都区为例[J]. 国土与自然资源研究, 2019(2): 7-13.
- [15] 蒋超, 龚建周, 赵冠伟, 等. 近四十年来广东省土地利用结构特征量化分析[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2020, 19(4): 88-95.
- [16] 林珍铭, 夏斌, 董武娟. 基于信息熵的广东省土地利用结构时空变化分析[J]. 热带地理, 2011, 31(3): 266-271.
- [17] 李国珍. 基于 FLUS 模型的深圳市土地利用变化与模拟研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2018.
- [18] Liu X P, Liang X, Li X, et al. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects[J]. Landscape and Urban Planning, 2017, 168(5): 94-116.
- [19] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- [20] 陈晓晓. 基于 FLUS 模型的土地利用变化定量归因及模拟——以渭库绿洲为例[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2020.
- [21] Song Y Z, Wang J F, Ge Y, et al. An optimal parameters-based geographical detector model enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis: Cases with different types of spatial data[J]. GIScience & Remote Sensing, 2020, 57(5): 593-610.
- [22] Cao F, Ge Y, Wang J F. Optimal discretization for geographical detectors-based risk assessment[J]. GIScience & Remote Sensing, 2013, 50(1): 78-92.
- [23] 井云清, 张飞, 张月. 基于 CA-Markov 模型的艾比湖湿地自然保护区土地利用/覆被变化及预测[J]. 应用生态学报, 2016, 27(11): 3649-3658.
- [24] 王保盛, 廖江福, 祝薇, 等. 基于历史情景的 FLUS 模型邻域权重设置——以闽三角城市群 2030 年土地利用模拟为例[J]. 生态学报, 2019, 39(12): 4284-4298.

【责任编辑: 孙向荣】

(上接第 80 页)

- [11] 李勇辉, 白利鹏. 云南省农业科技创新资源配置效率及影响因素研究[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(6): 63-69.
- [12] 魏振香, 郭琬婷. 旅游生态效率时空特征及影响因素研究[J]. 生态经济, 2021, 37(2): 111-119.
- [13] 马占新, 马生昫, 包斯琴高娃. 数据包络分析及其应用案例[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [14] Malmquist S. Index numbers and indifference surfaces [J]. Trabajos De Estadística, 1952, 4(2): 209-242.
- [15] Wang J F, Hu Y. Environmental health risk detection with GeoDetector [J]. Environmental Modelling & Software, 2012, 33: 114-115.
- [16] 李云燕, 羨瑛楠, 殷晨曦. 低碳城市发展评价方法模式研究——以四直辖市为例[J]. 生态经济, 2017, 33(12): 46-51.
- [17] 吴健生, 许娜, 张曦文. 中国低碳城市评价与空间格局分析[J]. 地理科学进展, 2016, 35(2): 205-213.
- [18] 段永蕙, 针宏艳, 张乃明. 山西省低碳城市评价与空间格局分析[J]. 生态经济, 2018, 34(4): 55-58.
- [19] 广东省统计局. 广东省统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2009-2018.
- [20] 广东省人民政府. 关于我省山区及东西两翼与珠江三角洲联手推进产业转移的意见(试行)[J]. 广东省人民政府公报, 2005(8): 3-6.
- [21] 任松彦, 汪鹏, 赵黛青, 等. 基于 CGE 模型的广东省重点行业碳排放上限及减排路径研究[J]. 生态经济, 2016, 32(7): 69-73.
- [22] 刘凯, 晏为谦, 于文益. 广东省电力生产活动碳排放特征研究[J]. 科技管理研究, 2019, 39(23): 250-255.
- [23] 庄大昌, 叶浩. 广东省经济发展与滨海环境污染的关系[J]. 热带地理, 2013, 33(6): 731-736.
- [24] 郭洪旭, 黄莹, 赵黛青, 等. 基于情景分析的广东省建筑节能减排潜力研究[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(12): 305-310.

【责任编辑: 孙向荣】