

Simulation of Land Use Spatial Layout Based on FLUS Model: A Case Study of Huadu District, Guangzhou

Xiaoning Ma¹, Peifeng Lin¹, Meizhao Chen²

¹School of Management, Guangdong University of Technology, Guangzhou Guangdong

²School of Society and Public Administration, Guangdong University of Foreign Studies, Guangzhou Guangdong
Email: zhengrongbao@163.com

Received: Jul. 10th, 2019; accepted: Jul. 23rd, 2019; published: Jul. 30th, 2019

Abstract

China's urbanization process is now in a rapid stage. New urbanization requires us to guide the rational expansion of urban land use, improve the efficiency of urban land use, promote the optimal allocation of land resources and the rational layout of urban space, and achieve regional coordinated and sustainable development. Taking Huadu District of Guangzhou City as an example, based on the 2010 land use status data, the FLUS model was used to simulate the land use status in 2015 at 30 m × 30 m scale, and the reliability of land use status in Huadu District in 2015 was verified. The Markov method is used to predict the land use of Huadu District in 2025, and establish three scenarios of cultivated land protection, ecological protection and compound extension to simulate the spatial distribution of land use in Huadu District. Results show that the Kappa index of the FLUS model is as high as 0.8869, the overall accuracy is 0.9132, the FOM index is also in line with the standard level, and the model simulation accuracy is high. The land use spatial layout under different scenarios is quite reasonable and scientific. The simulation results can provide a valuable reference for the national space planning.

Keywords

Land Use, Dynamic Simulation, FLUS Model, Huadu District

基于FLUS模型的花都区土地利用动态模拟研究

马小宁¹, 林沛锋¹, 陈美招²

¹广东工业大学管理学院, 广东 广州

²广东外语外贸大学社会与公共管理学院, 广东 广州

Email: zhengrongbao@163.com

收稿日期: 2019年7月10日; 录用日期: 2019年7月23日; 发布日期: 2019年7月30日

摘要

土地利用动态变化模拟是研究全球变化的重要内容。本文以广州市花都区为例, 基于2010年土地利用数据, 利用FLUS模型在30 m × 30 m尺度下模拟预测2015年的土地利用状况, 并与花都区2015年的土地利用现状数据进行精度验证, 再通过马尔科夫法预测2050年花都区的土地利用结构与布局。结果表明, FLUS模型模拟结果的Kappa指数高达0.8869, 总体精度为0.9132, FOM指数也符合标准水平, 模型模拟精度高, 模拟结果均具有较高的准确性和科学性, 模拟结果可为区域国土空间规划提供有价值的参考。

关键词

土地利用, 动态模拟, FLUS模型, 花都区

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着全球城市化的快速发展, 城市扩展引起的全球土地利用剧烈变化已引起学术界的广泛关注[1] [2]。研究区域土地利用变化及预测其动态演变规律, 对土地资源优化配置、城市空间的合理布局、区域可持续发展等具有重大的理论和现实意义[3] [4] [5] [6]。

90年代以来, 伴随着地理计算的发展和成熟, 利用数学模型与模拟实验相结合的研究方式越来越受到学术界的重视, 以数学模型为基础, 对土地利用的动态特征进行模拟和预测显现出了良好的效果而成为土地科学研究热点[7]。元胞自动机(CA)作为一种离散动态模型, 具有很强的模拟复杂系统的能力, 在模拟城市扩展时空演化等复杂非线性问题方面具有独特的优势[8] [9], 但CA模型本身存在的不确定性也会对土地利用变化的模拟结果产生不利影响[10]。近年来, 为了提高CA模型模拟对土地利用动态变化模拟的精度, 许多学者对CA模型进行改进, 有学者利用粒子群优化算法(PSO)对变换规则进行随机优化, 以减少不确定性[11] [12], 或者结合其他模型, 如生态模型和环境影响评价模型进行仿真, 预测重大政策对土地利用变化的影响[13]; Arsanjani等人建立了包括Logistic回归模型、马尔可夫链和CA模型的混合模型, 以综合自然环境因素和社会经济因素, 从而提高模拟精度[14]。但是, 目前大部分模型常常单独训练和估计各类型土地的转换概率, 忽略了各土地类型间的联系, 难以体现土地类型间的竞争及相互影响[15]; 刘小平提出了基于CA模型的FLUS (Future Land-Use Simulation)模型包含基于轮盘赌选择的自适应惯性竞争机制, 能够有效地处理各种土地利用类型相互转换的不确定性和复杂性, 解决了上述问题[16]。

目前FLUS模型在城市用地增长边界划定领域已有较多的应用[15] [16] [17], 但还缺乏基于县级层面的土地利用空间布局模拟和分析的案例, 本研究以广州市花都区为例, 以模拟城市扩张为目标, 将土地适宜性作为限制条件, 引入FLUS模型对2050年的土地利用空间布局进行模拟预测, 期望为花都区未来国土空间规划提供有价值的参考。

2. 数据来源与研究方法

2.1. 数据来源

本研究数据来源主要包括花都区 2010、2015 年土地利用现状数据、《广州市土地利用总体规划(2006~2020 年)》、《花都区土地利用总体规划(2010~2020 年)》、花都区地形 DEM 数据、《广州市统计年鉴(2018 年)》、《花都区国民经济和社会发展报告》等(表 1)。

Table 1. Data sources

表 1. 数据来源

数据类型	数据特征	数据来源
地形数据	DEM (30 m 空间分辨率)	地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/)
矢量数据	花都区 2010、2015 年土地利用现状数据	花都区国土资源和规划局
规划数据	《广州市土地利用总体规划(2006~2020 年)》、 《花都区土地利用总体规划(2010~2020 年)》	广州市规划和自然资源局网站、 花都区人民政府网站
社会经济数据	《广州市统计年鉴(2018 年)》、 《花都区国民经济和社会发展报告》	广州市统计局网站、花都区统计局网站

土地利用数据来自土地利用变更调查数据，并按现行的土地利用现状分类标准(GB/T21010-2017)进行分类，本文按研究所需分为八类，分别为林地、耕地、园地、草地、城镇村及工矿用地、水域及水利设施用地、交通运输用地和其他用地。在 Arcgis10.4 平台上，从土地利用现状矢量数据和 DEM 数据中提取出高程、坡度、河流、各级道路、铁路、基本农田保护区和生态环境安全区等基础数据。

2.2. 研究方法

FLUS 模型是用于模拟人类活动与自然影响下的土地利用变化以及未来土地利用情景的模型，该模型的原理源自元胞自动机(CA)，并在传统元胞自动机的基础上做了较大的改进。在 FLUS 模型中首先采用多层前馈神经网络算法(BP-ANN)从一期土地利用数据与包含人类活动与自然效应的多种驱动因子(地形、交通、区位、政策等方面)获取各类用地类型在研究范围内的适宜性概率，然后，利用基于轮盘赌的自适应惯性竞争机制，解决自然作用和人类活动共同作用下土地利用类型相互转化的不确定性和复杂性，使 FLUS 模型具有较高的模拟精度，获得近似于实际的土地用途分布结果。

该模型当中的多层前馈神经网络算法由输入层、隐含层和输出层共 3 层网络构成，其公式为[18]：

$$sg(g, k, t) = \sum_n w_{n,k} \times sigmoid(net_n(g, t)) = \sum_n w_{n,k} \times \frac{1}{1 + e^{-net_n(g, t)}} \quad (1)$$

公式中的 $sg(g, k, t)$ 表示第 k 种类型用地在栅格 g 、时间 t 上的适宜性概率； $w_{n,k}$ 是隐藏层和输出层间的权重； $sigmoid()$ 是隐藏层至输出层的激励函数； $net_n(g, t)$ 表示在第 n 个隐藏时间 t 上从栅格 g 接收到的信号。对于多层前馈神经网络算法输出的适宜性概率 $sg(g, k, t)$ ，在迭代时间 t 栅格 p 上，各用地类型的适宜性概率和恒定为 1，即：

$$\sum_k sg(g, k, t) = 1 \quad (2)$$

本研究中神经网络获取训练样本的采样方法为均匀采样策略(Uniform Sampling)，其特点是各类别用地的采样点数相同，隐藏层数量根据经验设置为 12 层，之后将各土地利用驱动力因子的栅格数据经过归一化处理一并输入到 BP-ANN 模型当中，最终得出各类型用地在研究区内的适宜性概率。

FLUS 模型中自适应惯性竞争机制的核心是自适应惯性，即每类土地的惯性系数由现有土地数量与土地需求之间的差异决定，并在迭代过程中进行自适应调整，从而使各类用地的数量向预定目标发展[19]，第 k 种用地在 t 时间上的自适应惯性系数 Ai_k^t 为：

$$Ai_k^t = \begin{cases} Ai_k^{t-1} & |D_k^{t-2}| \leq |D_k^{t-1}| \\ Ai_k^{t-1} \times \frac{D_k^{t-2}}{D_k^{t-1}} & 0 > D_k^{t-2} > D_k^{t-1} \\ Ai_k^{t-1} \times \frac{D_k^{t-2}}{D_k^{t-1}} & D_k^{t-1} > D_k^{t-2} > 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中， D_k^{t-1} 、 D_k^{t-2} 分别为 $t-1$ 、 $t-2$ 时刻第 k 种类型用地的栅格数量与需求量之间的差。

在 BP-ANN 模型计算出每个栅格适宜性的总概率后，通过 CA 模型迭代，将各类型用地分配到栅格中。栅格 g 在 t 时点转化为地类 k 的总概率 $Tp_{g,k}^t$ ，可表示为：

$$Tp_{g,k}^t = sg(g, k, t) \times \Omega_{g,k}^t \times Ai_k^t \times (1 - sp_{p \rightarrow k}) \quad (4)$$

式中： $sp_{p \rightarrow k}$ 为土地利用类型 p 转化为类型 k 的成本； $1 - sp_{c \rightarrow k}$ 代表发生转化的难易程度； $\Omega_{g,k}^t$ 为邻域作用，其公式为：

$$\Omega_{g,k}^t = \frac{\sum_{N \times N} con(p_g^{t-1} = k)}{N \times N - 1} \times w_k \quad (5)$$

式中： $\sum_{N \times N} con(p_g^{t-1} = k)$ 表示在 $N \times N$ 的 Moore 的邻域窗口，上一次迭代结束后第 K 种地类的栅格总量； w_k 为各用地类型的领域作用的权重。本研究中采用 3×3 Moore 领域，CA 迭代次数设定为 300 次。

精度检验利用 Kappa 指数和 FOM 指数来验证模型模拟的精度，以此来说明模型在该地区应用的可靠性。

Kappa 指数是 1960 年由 Cohen 提出用于检测遥感影像分类结果是否一致的检验方法，通过对土地利用数据和影像分类结果建立误差矩阵，其中矩阵列表示土地利用类型，矩阵行表示影像数据的分类类型，每一个元素表示像元的数量。在本研究中可引入来检验模拟结果与现状的一致性，Kappa 系数计算公式为[20]：

$$Kappa = \frac{OA_0 - OA_e}{1 - OA_e}, \quad OA_0 = \frac{\sum_{k=1}^n OA_{kk}}{N} \quad (6)$$

式中， OA_0 是分类的总体精度(overall accuracy)，表示对每一个随机样本，模拟结果与土地利用数据一致的概率； OA_e 表示由于偶然机会造成的模拟结果与土地利用现状数据相一致的概率； n 为土地利用类型数量， N 为样本总数； OA_{kk} 为第 k 种土地利用类型被正确分类的样本数目，当分类结果与实际类型完全吻合时，Kappa 系数的值为 1，Kappa 系数越大表明精度越高。

FOM (Figure of Merit)意为优值，是 1978 年由 Pratt 提出用来做性能评价的方法，其计算公式如下[21]：

$$FOM = \frac{1}{\max\{N_e, N_d\}} \sum_{k=1}^{N_d} \frac{1}{(1 + \beta d(k)^2)} \quad (7)$$

其中 N_e 表示土地利用模拟结果的像元个数， N_d 表示实际土地利用现状的像元个数； β 为大于 0 的尺度系数，通常为 1/9； $d(k)$ 为第 k 个被检测到的实际土地利用现状像元与最近的土地利用模拟结果像元的距离。FOM 指数的值处于 0 到 1 之间，指数大小受模拟年数影响，每模拟年数增加一年，FOM 指数增加不大于 0.01 为标准水平。

3. 结果与分析

3.1. 土地利用变化影响因子

1) 地形条件

地形条件决定着土地利用的方向和方式以及变化趋势，而地形条件中的高程和坡度是决定土地利用变化的主要因素，因此本次研究选择高程和坡度作为地形驱动力因子(图 1)。

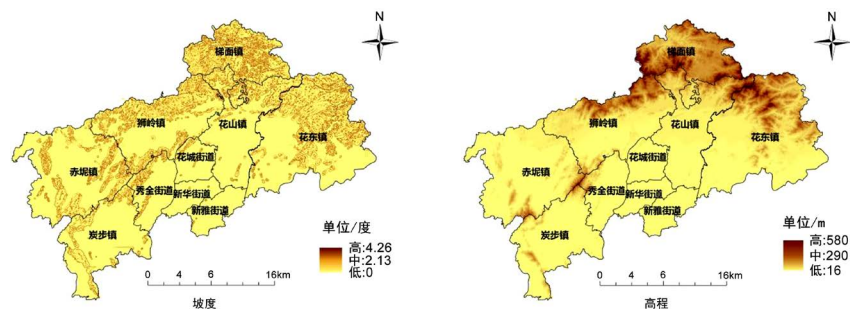


Figure 1. Topographical factors
图 1. 地形条件因素

2) 可达性

交通条件和城镇中心、城市中心对土地利用方式具有重要影响，可达性条件是否优越直接影响到土地利用效益。可达性因素选取交通条件和到城镇中心的距离，包括到高速公路的距离、到一般公路(包括乡、县、省道)的距离、到铁路的距离、到机场的距离、到区中心的距离、到镇中心的距离，以上影响因素通过 Arcgis10.4 平台的欧氏距离工具得到(图 2)。

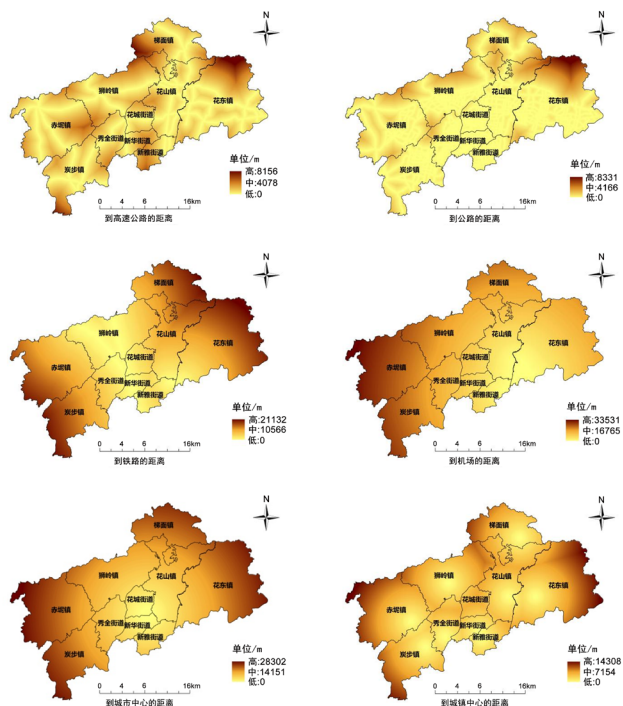


Figure 2. Reachability factor
图 2. 可达性因素

3) 水资源

水资源和人类的生产生活息息相关，人类的生存发展离不开水资源，自古以来许多城市都是沿水而建，土地距离水源远近会对其利用方式产生影响，特别是农用地；且在土地利用变化当中，河流和水库用地的状态通常处于长期不变的情况。因此本研究选取土地到河流的距离作为水资源影响因素，选取河流水库作为建设用地扩展的限制性因素(图 3)。

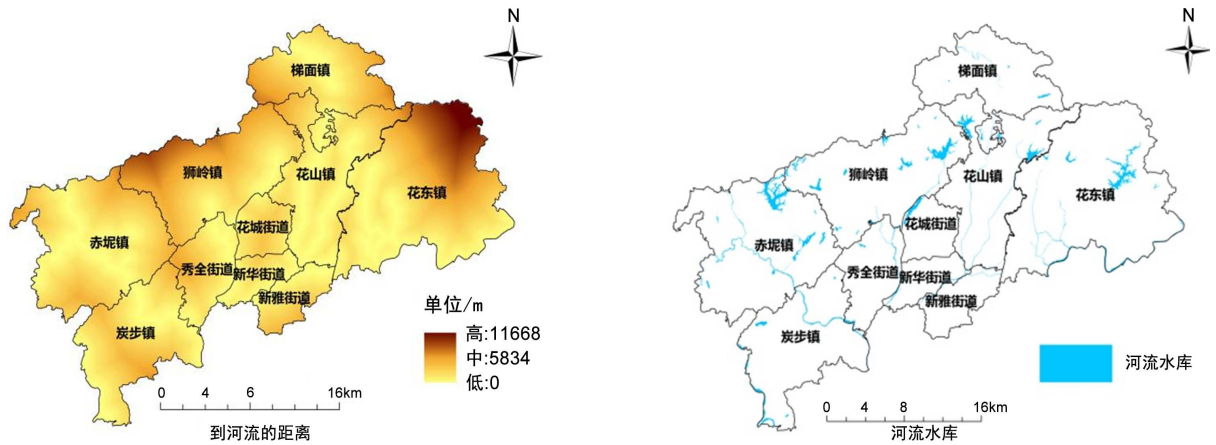


Figure 3. Water resources factors
图 3. 水资源因素

4) 社会环境

GDP 是衡量一个地区经济发展水平最重要的指标之一，GDP 的高低一定程度上决定了区域的土地利用方式，影响土地利用空间布局，而人口是城市发展必不可少的条件，人口的多寡也影响了土地利用的方式和模式，因此本研究选取了 GDP 和人口作为土地利用变化的社会环境影响因子(图 4)。

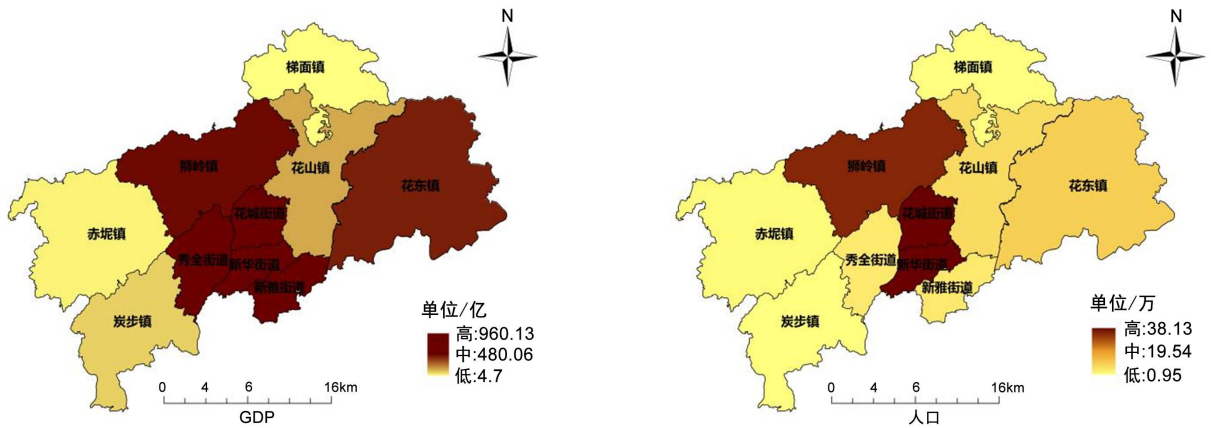


Figure 4. Social environmental factors
图 4. 社会环境因素

5) 政府政策

政府相关土地管控政策的强制力干预，是影响城市土地利用的重要因素之一，对城市用地的扩展有明显的约束作用，因此本研究选取了《花都区土地利用规划(2006-2020 年)》中的花都区基本农田保护区和生态环境安全控制区作为限制性因素(图 5)。

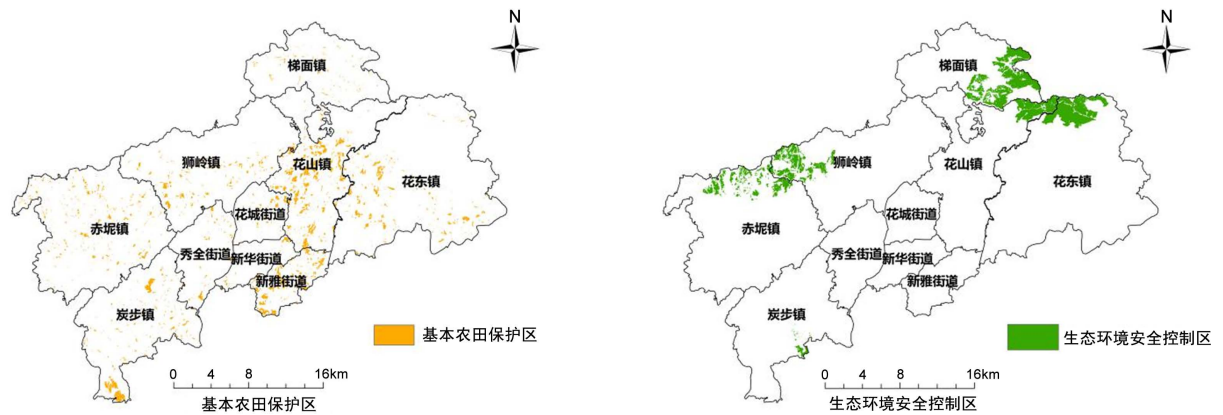


Figure 5. Restrictive factors

图 5. 限制性因素

3.2. 土地适宜性分布

将花都区 2010 年土地利用现状栅格数据作为初始数据, 将代表各类影响因子的栅格数据做标准化处理, 采用均匀采样策略提取所有栅格数据的 20% 像元作为训练样本, 隐藏层数量根据经验设置为 12 层, 使用 BP-ANN 模型计算每一种土地利用类型在各个像元上的适宜性概率, 适宜性概率决定了土地利用类型在该区域上分布的可能性。

1) 林地适宜性分布

如图 6 所示, 花都区的林地适宜性概率呈北高南低的, 东西局高, 中部低的布局, 适宜性布局情况与花都区较高海拔地区基本吻合, 说明林地在花都海拔较高的山地、丘陵地区有较强的适宜性。从局部来看, 林地在梯面镇全镇, 狮岭镇北部, 花山镇北部, 花东镇中北部, 秀全、狮岭、赤坭、炭步四镇街交界处, 以及赤坭和炭步西部地区均呈现较强的适宜性; 林地在花城、新华、新雅街道、狮岭镇南部, 花山镇南部, 花东镇西部, 炭步镇东部和秀全街道东部的适宜性较差。

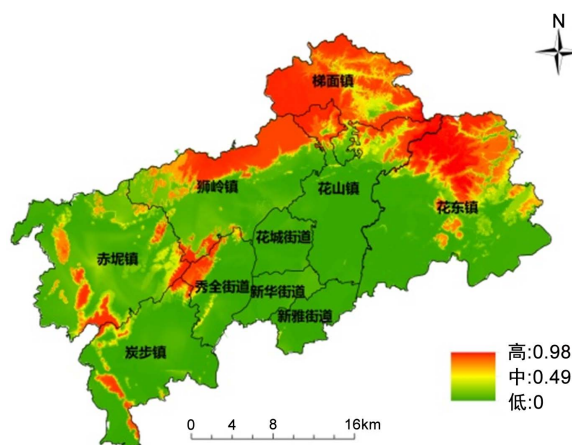


Figure 6. Forestland suitability probability

图 6. 林地适宜性概率

2) 耕地适宜性分布

如图 7 所示, 花都区的耕地适宜性概率总体偏低, 最高仅为 0.58, 说明耕地在全区的适宜性较差, 北部丘陵和中部城市中心区的耕地适宜性最差, 其中适宜性概率较高地区出现在花山镇中部、花城街道

东部边缘、花东镇东南部、赤坭镇西北部、炭步镇的中部和西南部地区，上述地区大多地势平坦，水利设施完善，灌溉水源充足。划定为基本农田的耕地大部分坐落于各个镇街耕地适宜性较强的区域，但各镇街的耕地适宜性区域差异较大，一些基本农田可进行适当的调整，向适宜地区适当增加，使其更加集中连片，起到更好保护耕地的作用。

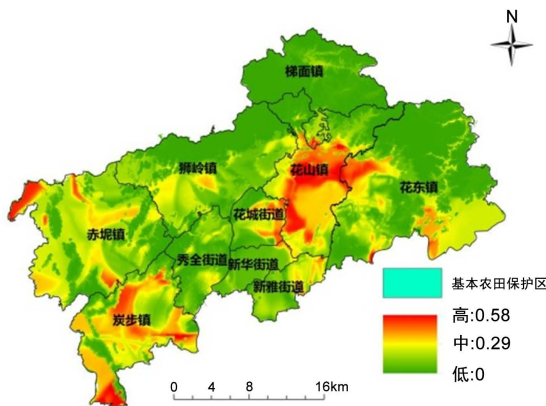


Figure 7. Cultivated land suitability probability
图 7. 耕地适宜性概率

3) 城镇村及工矿地用地适宜性分布

如图 8 所示，城镇村及工矿地用地在花都区中部平原有较强的适宜性，适宜性呈中部向四周扩散减弱的趋势，北部和东西两翼的适宜性较差。该类用地适宜性最强地区在城市中心区，其中作为花都区政治、经济、文化、科技和对外交往中心的新华街道适宜性最强，花城街道、秀全街道和狮岭镇次之，城市中心区当中，新雅街道的适宜性较弱。其他郊区镇当中越靠近城市中心区位置的区域，适宜性越强。

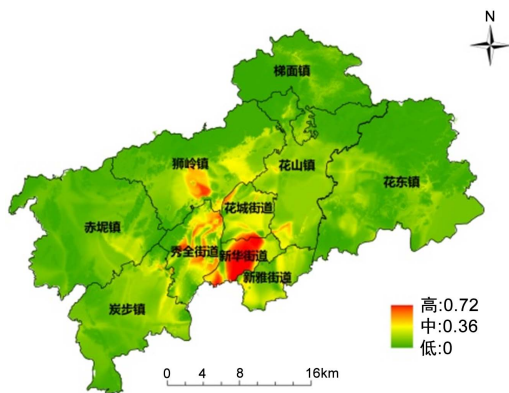


Figure 8. Suitability probability of urban villages and industrial and mining land
图 8. 城镇村及工矿用地适宜性概率

4) 园地适宜性分布

如图 9 所示，园地适宜性在花都区的中东部，东南部和西北部地区有较强的适宜性，中部、北部和西南部的适宜性较差，适宜性强的地区多分布在低矮丘陵和水资源丰富地区。各镇街中花东镇的园地总体适宜性最强，花山北部和梯面南端的交界地区也拥有较强的适宜性，狮岭西部至赤坭东部也出现适宜性较强的连片地带，花山镇全境具有较好适宜性。其中赤坭、花山和花东镇均拥有规模较大的农产品生产基地、生态农业基地或种植盆景、香草生产种植基地，且拥有地区自身的知名农产品品牌。

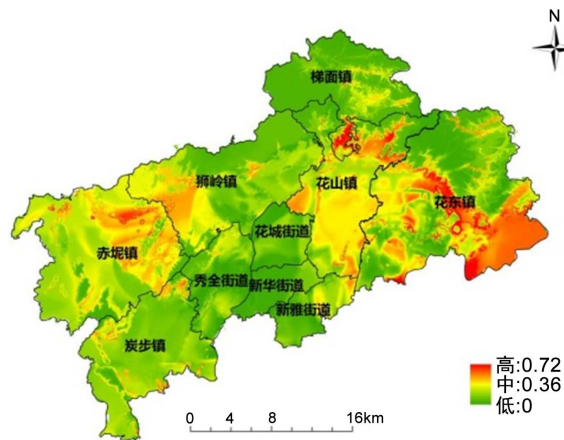


Figure 9. Park suitability probability
图 9. 园地适宜性概率

5) 水域及水利设施用地适宜性分布

如图 10 所示, 水域及水利设施用地总体适宜性概率偏低, 最高为 0.56, 在花都区的西部有连片适宜性较强地区, 东北部有树根状适宜性较强地区, 中部和北部适宜性较弱, 中东部狮岭、梯面和花山三镇交界处适宜性中等, 总体适宜性分布由西向东减弱。水域及水利设施用地适宜性较强的地区主要分布在赤坭镇、炭步镇和花东镇, 因为北江支流巴江河自西北向东南贯穿赤坭和炭步两镇, 且赤坭镇拥有三坑水库、集益水库、皇母水库及 62 个大小山塘; 花东镇适宜性较强地区为九湾潭水库, 该水库库容 4292 万立方米, 是花都区最大水库, 为广州市第二大水库。

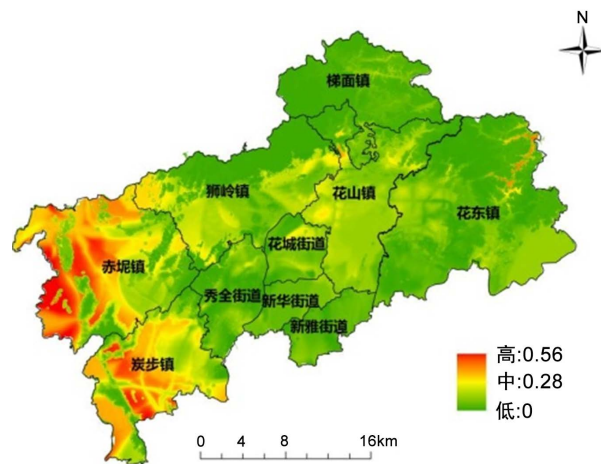


Figure 10. Probability of land suitability for waters and water conservancy facilities
图 10. 水域及水利设施用地适宜性概率

6) 交通运输用地适宜性分布

如图 11 所示, 交通运输用地在花都区中部和东南部有小片适宜性较强区, 全境均有适宜性中等条形状区分布, 两片适宜性明显较强区域分别位于花东镇境内以及花城和新华街道的交界处, 从地图上看这两个区域分别是广州白云国际机场和广州北站。交通运输用地适宜性中等地区呈现贯穿不同镇街的条状, 或环绕城市中心的圈状分布, 除了在经济较为发达的城市中心区具有较好的适宜性, 花东镇依靠空港经济区发展起来的空港物流业也使得花东镇具有较为良好的交通运输用地适宜性。

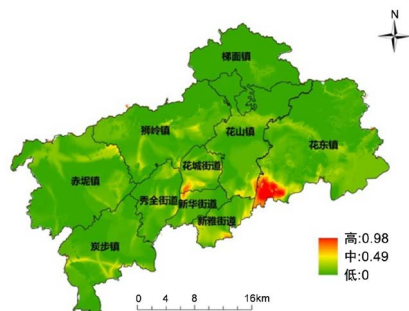


Figure 11. Suitability probability of transportation land
图 11. 交通运输用地适宜性概率

7) 草地适宜性分布

如图 12 所示,草地在花都区中部和东部有带状适宜性较强区域,但全区分布状况而言,适宜性很低,仅有很小部分地区拥有适宜性,原因是草地在全区土地利用总面积仅占 0.61%,是比较弱势的土地利用类型,多是作为城市绿化、水库伴生草地或风景区绿化。最大分布地区是花城、秀全和新华街道交界处的花都湖公园。

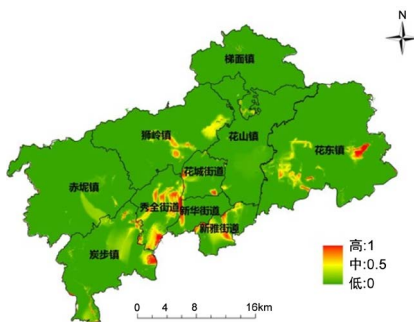


Figure 12. Grassland suitability probability
图 12. 草地适宜性概率

8) 其他用地适宜性分布

如图 13 所示,花都区的其他用地适宜性强地区较为分散,全区适宜性偏弱,主要分布在东部和中部,镇街中花城街道北部,新雅和新华街道交界地带,秀全街道西部,狮岭东南片,赤坭中部,梯面东南部,花东中西部和东部均出现适宜性较强地区,其中花东镇的总体适宜性最强,有较连片适宜区。

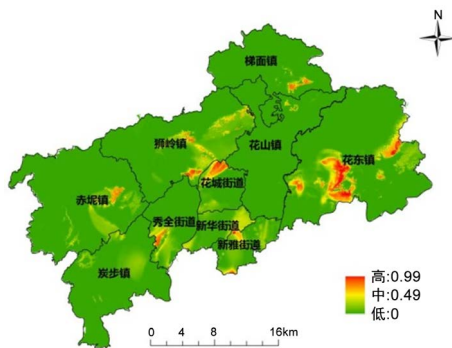


Figure 13. Other land suitability probability
图 13. 其他用地适宜性概率

3.3. 模拟参数设定

利用 GeoSOS-FLUS 平台进行模拟前，除了输入图像栅格数据，还要设置转换成本矩阵和邻域权重因子，不同的参数设定会造成土地利用模拟结果的变化。

1) 转换成本矩阵

转换成本矩阵用于设置土地利用类型的相互转换关系，当一种土地类型允许向另一种转化时，将对应转换成本值设置为 1，不允许转化时参数设置为 0，参数设置如图 4-15 所示，允许除了交通运输用地和城镇村及工矿用地以外的其他用地相互转换，因为广州市作为经济发达地区，建设用地的经济效益极高，几乎不可能再转换成农用地，为了使实验结果更为具有现实价值，暂不考虑特殊情形；交通运输用地作为交通基础设施，也不可能出现部分的转移，与其他用地类型不发生相互转换，见表 2。

Table 2. Conversion cost matrix parameters

表 2. 转换成本矩阵参数

	林地	林地	耕地	水域及水利设施用地	城镇村及工矿用地	园地	交通运输用地	草地	其他用地
耕地	1	1	1	1	1	1	0	1	1
水域及水利设施用地	1	1	1	1	1	1	0	1	1
城镇村及工矿用地	1	1	1	1	1	1	0	1	1
园地	1	1	1	1	1	1	0	1	1
交通运输用地	0	0	0	0	0	0	1	0	0
草地	1	1	1	1	1	1	0	1	1
其他用地	1	1	1	1	1	1	0	1	1

2) 邻域权重因子

邻域权重因子用于设置不同土地利用类型的扩张能力，邻域权重因子的值介于 0 到 1 之间，越接近 1 表示该土地利用类型的扩张能力越强，越接近 0 表示该土地利用类型的扩张能力越弱。

本研究根据实际情况设置邻域权重因子，林地在自然生态环境中的扩张性较强，且在花都区的北部丘陵地区林地属于强势和被保护地类，所以将邻域权重因子的值设为 0.8；花都区属于经济较发达地区，且正处于快速城市化进程中，城市正处于扩张期，大量农用地和未利用地被转换成建设用地，所以城镇村及工矿用地在该区域的扩张性较强，将其邻域权重因子的值设置为 1，耕地、园地、草地和其他用地的扩张性较弱，将邻域权重因子的值设置为 0.5；考虑到交通用地和水域及水利设施用地大部分属于自然河流、交通道路或水利基础设施，除了在人为干预下发生大幅度变化，较长时期内的土地利用方式不会发生大的变动，显然其扩张性较弱，所以将邻域权重因子的值设置为 0.1。

3.4. 模拟结果与分析

以 2015 年花都区土地利用现状的栅格数据作为初始数据，将马尔科夫链的未来土地利用类型预测数量作为未来预期值，河流水库作为限制转换区(图 15)，向 FLUS 模型当中输入各项数据和参数以后得到 2050 年在自由发展下的花都区土地利用空间布局情况(图 16)，各地类像元数变化如图 14 所示。

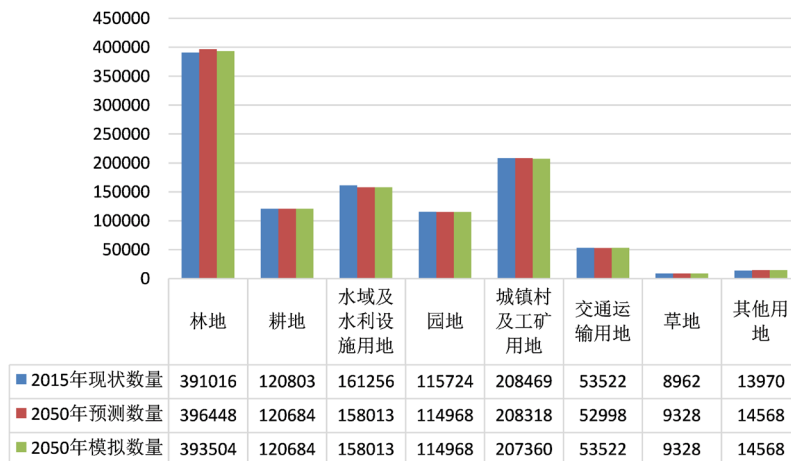


Figure 14. Comparison of land use type pixel numbers
图 14. 土地利用类型像元数对比

本次研究中，采用随机采样策略从现状栅格数据和模拟结果栅格数据中抽取 10%的像元进行 Kappa 指数检验。经检验，本次模拟实验的总体精度为 90.49%，Kappa 指数为 0.88，模拟结果精度达到“极佳”的标准，模拟结果与现实状态基本吻合，模拟效果好。经检验，FOM 指数 0.0327，处于标准水平，模型模拟水平好。

从图 15 可知，与 2015 年现状值相比，2050 年(自由发展情景)的像元数量总体上保持稳定，其中林地、草地和其他用地分别增长了 0.64%、4.08%和 4.28%；耕地、水域及水利设施用地、园地和城镇村及工矿用地分别减少了 0.1%、2.01%、0.65%和 0.53%；交通运输用地数量保持不变。其中林地、草地和其他用地的增加主要来源于耕地、水域及水利设施用地、园地和城镇村及工矿用地的减少，区域土地利用结构总体上无太剧烈变化。与 2050 年预测数量相比，2050 年模拟结果的土地利用结构中耕地、水域及水利设施用地、园地、交通运输用地、草地和其他用地的数量相同，林地和城镇村及工矿用地小于 2050 年预测数量。

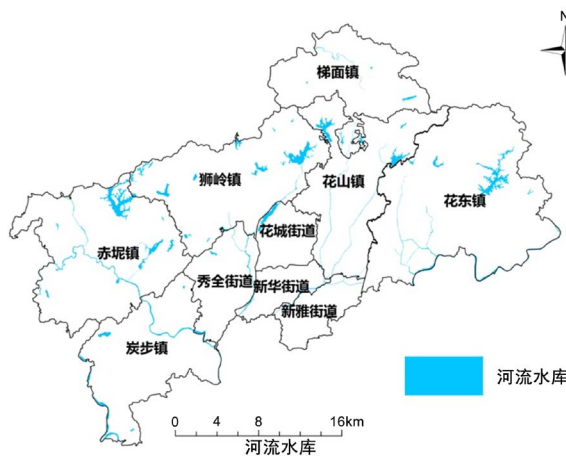


Figure 15. Limits the conversion area
图 15. 限制转换区

从情景模拟结果(图 16)很难目视分辨花都区土地利用发生的变化，因此为了更为直观地分析花都区的土地利用发生的变化，本研究从土地利用结构入手，通过 Arcgis 的区域分析功能将两期土地利用栅格数据进行叠加分析，得到 2050 年的花都区各土地利用类型的转移矩阵。

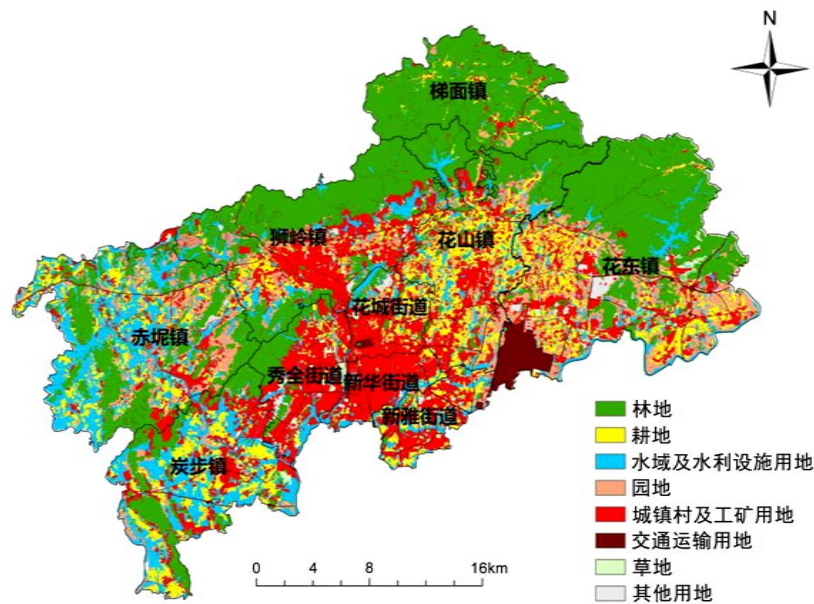


Figure 16. Huadu district 2050 forecast scenario
图 16. 花都区 2050 年预测情景

由表 3 可知, 2050 年预测情景的各类用地总体上保持结构稳定, 只有小部分土地利用类型发生在内部的互相转换。从表中可看出各地类之间的转移情况和转移趋势, 其中林地主要向水域及水利设施用地和城镇村及工矿用地转移; 耕地发生转移的面积较少, 向林地、水域及水利设施用地、园地和城镇村及工矿用地均有小面积转移; 水域及水利设施用地主要向林地和城镇村及工矿用地转移; 园地主要向林地、水域及水利设施用地和城镇村及工矿用地转移; 城镇村及工矿用地主要向林地、水域及水利设施用地转移; 交通运输用地不发生转移现象; 草地主要向城镇村及工矿用地转移; 其他用地向各地类均有少量面积转移。从转移方向上看, 林地是花都区农用地内部较为强势的地类, 共有 819.45 hm^2 其他土地利用类型转换成林地, 城镇村及工矿用地是外部较为强势的土地利用类型, 共有 600.32 hm^2 其他土地利用类型转换成城镇村及工矿用地, 总体趋势上农用地较易转变成建设用地。

Table 3. Land use transfer matrix 2015~2050 (unit: hm^2)
表 3. 2015~2050 年土地利用转移矩阵(单位: hm^2)

土地利用类型	林地	耕地	水域及水利设施用地	园地	城镇村及工矿用地	交通运输用地	草地	其他土地
林地	34549.44	7.00	146.11	70.86	299.49	0.00	11.48	19.37
耕地	14.35	10726.90	34.44	20.81	22.24	0.00	0.27	0.18
水域及水利设施用地	330.79	39.56	13796.96	84.13	192.30	0.00	6.82	6.01
园地	92.56	33.90	80.90	10079.49	66.02	0.00	0.81	2.24
城镇村及工矿用地	377.70	25.83	128.35	59.29	18010.08	0.00	40.90	34.53
交通运输用地	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4794.34	0.00	0.00
草地	1.26	0.72	3.23	1.35	18.39	0.00	776.66	0.45
其他土地	2.78	1.08	1.08	1.79	1.79	0.00	0.18	1243.88

4. 结论与展望

本文以 2010 年花都区土地利用现状数据为初始年份数据, 选取多类土地利用影响因子数据, 运用土地数量预测方法马尔科夫法和土地利用动态模拟模型 FLUS 模型计算出花都区各种土地利用类型的未来需求量和区域适宜性分布状况, 从而模拟花都区 2015 年的土地利用空间布局, 并把模拟结果通过 Kappa 系数和 FOM 系数与 2015 年现实土地利用现状数据进行精度检验, 验证模型精度。在此基础上, 预测 2050 年土地利用动态情景, 经过精度验证发现, Kappa 系数和 FOM 系数均达到标准水平, 模拟效果极佳, 表明 FLUS 模型在模拟土地利用动态变化上能达到较为理想的效果, 是实现国土空间规划布局模拟的有效工具。

由于影响土地利用空间布局的因素众多, 本研究只选取了部分较为重要的因素, 例如人文、经济等方面的因素并未加入此次模拟, 所以在今后的研究当中, 将考虑如何把人文、经济方面的因素综合考虑加入模拟实验当中, 或者进一步开展多情景模拟研究, 以提高实验的模拟精度, 使其更加合理和科学, 更能符合现实需求。且本文只研究了 FLUS 模型在县区级尺度区域中的模拟效果, 对其他尺度的土地利用动态模拟的适用性有待进一步探索。

基金项目

国家自然科学基金项目(41001054)、教育部人文社会科学项目(18YJAZH063、19YJA630009、19YJAZH116)联合资助。

参考文献

- [1] 何剑锋, 庄大方. 长江三角洲地区城镇时空动态格局及其环境效应[J]. 地理研究, 2006, 25(3): 388-396.
- [2] 宁越敏. 中国城市化特点、问题及治理[J]. 南京社会科学, 2012(10): 19-27.
- [3] 孙平军, 修春亮. 中国城市空间扩展研究进展[J]. 地域研究与开发, 2014, 33(4): 46-52.
- [4] 卓莉, 李强, 史培军, 等. 20 世纪 90 年代中国城市用地外延扩展特征分析[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2007, 47(3): 98-102.
- [5] 匡文慧, 刘纪远, 邵全琴, 等. 区域尺度城市增长时空动态模型及其应用[J]. 地理学报, 2011, 66(2): 178-188.
- [6] 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.
- [7] 徐新良, 赵美艳, 闵稀碧. 城市扩展研究的主要进展与展望[J]. 生态科学, 2014, 33(3): 619-624.
- [8] 夏畅, 王海军, 张安琪, 等. 耦合管控效应的城市空间多情景模拟与政策分析[J]. 人文地理, 2017, 32(3): 68-76.
- [9] 黎夏, 叶嘉安. 知识发现及地理元胞自动机[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2004, 34(9): 865-872.
- [10] Yeh, A.G. and Li, X. (2006) Errors and Uncertainties in Urban Cellular Automata. *Computers Environment and Urban Systems*, **30**, 10-28. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2004.05.007>
- [11] Feng, Y.F., Liu, Y.L., Tong, X.T., et al. (2011) Modeling Dynamic Urban Growth Using Cellular Automata and Particle Swarm Optimization Rules. *Landscape and Urban Planning*, **102**, 188-196. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.04.004>
- [12] 冯永玖, 童小华, 刘妙龙. 城市形态演化的粒子群智能随机元胞模型与应用——以上海市嘉定区为例[J]. 地球信息科学学报, 2010, 12(1): 17-25.
- [13] Sun, Z., et al. (2009) The Land-Use Evolution and Impact Assessment Model: A Comprehensive Urban Planning Support System. *URISA Journal*, **21**, 57-68.
- [14] Arsanjani, J.J., Helbich, M., Kainz, W., et al. (2013) Integration of Logistic Regression, Markov Chain and Cellular Automata Models to Simulate Urban Expansion. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **21**, 265-275. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2011.12.014>
- [15] 朱寿红, 舒帮荣, 马晓冬, 等. 基于“反规划”理念及 FLUS 模型的城镇用地增长边界划定研究——以徐州市贾汪区为例[J]. 地理与地理信息科学, 2017, 33(5): 80-86.

- [16] Li, X.L., Chen, G.C., Liu, X.L., *et al.* (2017) A New Global Land-Use and Land-Cover Change Product at a 1 km Resolution for 2010 to 2100 Based on Human-Environment Interactions. *Annals of the American Association of Geographers*, 5, 1040-1059. <https://doi.org/10.1080/24694452.2017.1303357>
- [17] 张子明, 刘平辉, 朱寿红. 基于 FLUS 模型的城镇用地增长边界划定研究——以临川区为例[J]. 江西农业学报, 2018, 30(5): 117-123.
- [18] 杨人豪, 杨庆媛, 曾黎陈, 等. 基于 BP-ANN 模型的农村土地生态安全评价及影响因素分析——以重庆市丰都县为例[J]. 水土保持研究, 2017, 24(3): 206-213.
- [19] 杜际增, 王根绪, 李元寿. 基于马尔科夫链模型的长江源区土地覆盖格局变化特征[J]. 生态学杂志, 2015, 34(1): 195-203.
- [20] 许文宁, 王鹏新, 韩萍, 等. Kappa 系数在干旱预测模型精度评价中的应用——以关中平原的干旱预测为例[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(6): 81-86.
- [21] 马蒙蒙. 彩色图像高分辨率边缘检测算法研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安工程大学, 2017.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网首页: <http://cnki.net/>, 点击页面中“外文资源总库 CNKI SCHOLAR”, 跳转至: <http://scholar.cnki.net/new>, 搜索框内直接输入文章标题, 即可查询;
或点击“高级检索”, 下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2169-2556, 即可查询。
2. 通过知网首页 <http://cnki.net/>顶部“旧版入口”进入知网旧版: <http://www.cnki.net/old/>, 左侧选择“国际文献总库”进入, 搜索框直接输入文章标题, 即可查询。

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ass@hanspub.org