

基于 CA-Markov 和 InVEST 模型的土地利用 变化对生境影响评价

——以福建省福州新区为例

黄康^{1,2}, 戴文远^{1,2,3}, 黄万里^{1,2,3}, 欧惠¹, 胡航箫¹

(1. 福建师范大学 地理科学学院, 福建 福州 350007; 2. 福建师范大学 地理研究所, 福建 福州 350007;
3. 福建师范大学 湿润亚热带生态地理过程教育部重点实验室, 福建 福州 350007)

摘要: [目的] 研究福建省福州新区近 15 a 来的土地利用变化并对未来 15 a 的变化进行预测, 并对 30 a 的生境质量变化进行分析; 将预测结果与规划形成对比, 为土地利用规划提供参考。[方法] 以福建省福州新区为例, 基于 2000 年 Landsat_ETM⁺ 和 2015 年 Landsat_OLI 遥感影像解译的土地利用数据, 对国家级新区——福州新区的土地利用动态变化进行空间分析, 运用 CA-Markov 模型对其 2030 年的土地利用格局进行预测。在此基础上, 进一步采用 InVEST 模型对新区内过去, 现在和未来的生境质量进行评价。[结果] ① 15 a 间福州新区耕地、林地、水域和建设用地变化速度较快, 草地和海域变化相对较小, 未利用地变化较小但变化较为剧烈; ② CA-Markov 模型预测显示研究区 2015—2030 年土地利用变化趋势与 2000—2015 年大体相同, 表现为除未利用地呈现增加的趋势外, 建设用地和生态用地分别呈现急剧扩张和持续减少的趋势; ③ 2000—2030 年研究区内大量耕地、林地、草地和水域向建设用地转化, 导致威胁源的增加, 进一步降低了生境质量。[结论] 福州新区由于建设用地快速扩张导致区内生境质量严重下降, 应加强生态保育, 合理控制建设用地的增长, 避免生境质量进一步恶化。建议将 2030 年用地规划中的建设用地边界作为限制建设区边界, 将预测结果作为允许建设区边界, 提高建设用地的集约利用程度。

关键词: 土地利用变化; 生境质量; CA-Markov 模型; InVEST 模型; 福州新区

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2019)06-0155-08

中图分类号: F301.2, X826

文献参数: 黄康, 戴文远, 黄万里, 等. 基于 CA-Markov 和 InVEST 模型的土地利用变化对生境的影响评价[J]. 水土保持通报, 2019, 39(6): 155-162. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2019.06.023; Huang Kang, Dai Wenyuan, Huang Wanli, et al. Impacts of land use change evaluation on habitat quality based on CA-Markov and InVEST models[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(6): 155-162.

Impacts of Land Use Change Evaluation on Habitat Quality Based on CA-Markov and InVEST Models

—Taking Fuzhou New District of Fujian Province as an Example

Huang Kang^{1,2}, Dai Wenyuan^{1,2,3}, Huang Wanli^{1,2,3}, Ou Hui¹, Hu Hangxiao¹

(1. School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007, China;

2. Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007, China; 3. Key Laboratory for Humid Subtropical Eco-geographical Processes of the Ministry of Education, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007, China)

Abstract: [Objective] This paper studies the land use change in Fuzhou New District of Fujian Province from 2000 to 2015, forecasts the land use pattern in 2030, analyzes the habitat quality change in 2000—2030, and compares the predicted results with the overall planning of the new district, in order to provide a reference for the rational use of land resources in the later stage of the new district. [Methods] Taking Fuzhou New District of Fujian Province as an example, based on the data of land use in 2000 and 2015, which was interpreted by Landsat_ETM⁺ and Landsat_OLI remote sensing image, the spatial analysis model of land use change was used to analyze the dynamic change of land use in Fuzhou New District, and the CA-Markov model was used

收稿日期: 2019-04-12

修回日期: 2019-05-17

资助项目: 福建省自然科学基金项目“区域生态安全格局对城市空间快速增长的响应与约束机制研究”(2018J01741); 福建省科技厅公益类项目(2017R1034-2)

第一作者: 黄康(1995—), 男(汉族), 江西省南昌市人, 硕士研究生, 研究方向为土地利用管理。E-mail: 814958549@qq.com。

通讯作者: 戴文远(1972—), 男(汉族), 福建省莆田市人, 硕士, 副教授, 主要从事土地利用与城乡发展研究。E-mail: dwygeo@fjnu.edu.cn。

to predict the land use pattern in 2030. On this basis, the past, present and future habitat qualities in the new district were further evaluated by the InVEST model. [Results] ① During 2000—2015, the cultivated land, forest land, water area and construction land in Fuzhou New District changed rapidly, the change of grassland and sea area was relatively small, and the change of unused land area was relatively small, but the transfer in and out was more intense; ② CA-Markov model prediction showed that the change trend of land use in the study area in 2015—2030 was basically the same as that in 2000—2015. In addition to the increasing trend of unused land, the construction land and ecological land showed the trend of rapid expansion and continuous reduction respectively; ③ From 2000 to 2030, a large number of cultivated land, forest land, grassland and water area in the study area transformed into construction land, resulting in the increase of threat sources and further reducing the habitat quality. [Conclusion] Due to the rapid expansion of construction land in Fuzhou New District, the quality of habitat in the area is seriously reduced. We should strengthen ecological conservation, reasonably control the growth of construction land, and avoid the further deterioration of habitat quality. The boundary of construction land in 2030 land use planning should be taken as the boundary of restricted construction area, and the predicted result should be taken as the boundary of permitted construction area, so as to improve the intensive utilization of construction land.

Keywords: land use change; habitat quality; CA-Markov model; InVEST model; Fuzhou New District

土地利用变化是在经济社会变革和创新驱动下,与经济社会发展阶段转型相适应的区域土地利用格局变化的过程。随着城镇化进程的快速发展,土地利用变化一直是全球变化与可持续发展研究的热点之一^[1-3]。在自然和人为等多方面驱动因素的综合影响下土地利用发生变化,反之,土地利用变化也对生态系统中的物质交换与能量循环产生重要影响,进而影响生境质量和生态变化过程,最终改变生态系统的结构与功能^[4]。因此,深入研究土地利用变化对生境质量的影响,对分析区域生态环境,促进区域可持续发展具有重要的意义。近年来生境质量评价多采用模型的方法^[5-7],其中采用最广的是由美国斯坦福大学和世界自然基金会等机构研发的一种可以量化多种生态系统服务的 InVEST 模型,该模型具有数据需求量相对较小,结果可视化等特点。褚琳等^[8]利用 InVEST 模型对 2000—2010 年辽宁省海岸带景观格局与生境质量变化进行了研究并分析了引起变化的原因。郑宇等^[9]采用 InVEST 模型分析昌黎县土地利用及景观格局的变化对生境质量产生的影响,但多数研究都只针对于研究区过去和现在的生境质量进行评价,对未来情况预测的研究较少。而 CA-Markov 模型^[10-11]可以对未来的土地利用格局进行预测,通过将 CA 模型^[12-13]和 Markov 模型^[14]有机结合,既可以提高预测的精度,又可以更好地模拟土地利用格局的空间变化。井云清^[15]等、吴晶晶^[11]等运用 CA-Markov 模型分别对艾比湖湿地自然保护区和乌江下游地区的土地利用/覆被变化及预测进行了分析。但目前运用 CA-Markov 模型对土地利用变化模拟预测的研究多集中在较大区域尺度,而在中小区域尺

度范围内的研究较少。因此,本文以福建省福州新区为例,将 CA-Markov 模型的模拟预测能力以及 InVEST 模型的生境质量分析能力相结合,针对中尺度区域实现对生境质量变化与预测的研究。

国家级新区——福州新区既是推进福州大都市区向东面海发展的关键一环,又是两岸交流合作的重要承载区、扩大对外开放重要门户、东南沿海重要现代产业基地、改革创新示范区和生态文明先行区。根据《福州新区发展规划》(初稿),福州新区应坚持绿色发展理念,充分利用区内的生态优势,走新型城镇化的道路,建设生态宜居型新城区。但在新区发展过程中,无法避免的会造成生态用地的破坏以及生境质量的下降。因此,本文首先利用 CA-Markov 模型对福州新区内各土地利用类型的变化进行模拟和预测,深入分析其土地利用变化规律;其次通过 InVEST 模型对过去、现在和未来的生境质量进行评价,分析土地利用变化对生境产生的影响,为福州新区今后的发展建设提供科学依据。

1 研究区概况

福州新区于 2015 年经国务院批复成立,2016 年被进一步确立为大众创业万众创新示范基地。该区位于福州市滨海地区,地理坐标介于 $119^{\circ}13'12''$ — $119^{\circ}42'47''$ E, $25^{\circ}20'41''$ — $26^{\circ}8'11''$ N,与台湾北部隔海相望,对台优势明显。初期规划范围包括马尾区、仓山区、长乐区、福清市的部分区域,共涉及 30 个乡镇街道,规划面积 800 km^2 。新区属典型的亚热带海洋性季风气候,区内自然生态环境条件优越,景观独特,森林覆盖率高,土壤肥沃,湿地资源丰富,海域辽阔,

海岸线绵长,拥有江阴、松下等深水良港以及广阔的潮间滩涂,具有综合开发潜力。福州新区地处长三角与珠三角之间,区位优势优越,不仅是福州大都市发展新的经济增长极,而且在深化对台交流合作方面具有重要的战略地位。福州新区近年来各项建设快速展开,城镇化发展很快,在人类活动强烈的干扰下,土地利用变化显著,对区内生态环境产生深刻影响。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本研究的土地利用数据来源于地理空间数据云 2000 年 Landsat_ETM⁺ 和 2015 年 Landat_OLI 影像,分辨率为 15 m×15 m。应用 ENVI 5.0 对两期影像进行几何校正,并在 ecognition 软件支持下对其进行监督分类。参照全国土地利用分类体系(GB/T21010-2017)并根据研究区域的景观特征,把研究区域的土地利用类型划分为耕地、林地、草地、建设用地、水域、海域、未利用地等 7 类。最后结合人工目视解译,对数据进行查错和修改,并利用 Google Earth 软件进行精度的检验,两期遥感影像解译精度均在 83% 以上,分类精度达到要求,结合研究区实际情况建立了土地利用二级分类体系(表 1)。

表 1 研究区土地利用分类体系

一级地类	二级地类
耕地	水田,旱地
林地	有林地,灌木林地,其他林地
草地	其他草地
建设用地	城镇居住用地,农村居住用地,工矿用地,交通用地
水域	河流水面,水库水面,坑塘水面
海域	滩涂,浅海水域
未利用地	裸地,沙地

2.2 研究方法

2.2.1 土地利用动态变化的空间分析模型 传统的单一土地利用动态模型和综合土地利用动态模型都只考虑了一种土地利用类型转换为另一种土地利用类型的单向变化过程,并没有考虑到由其它土地利用类型转变为该类型的变化过程。因此本研究利用刘盛和等^[16]提出的土地利用变化的空间分析模型,其计算公式为:

$$TRL_i = (LA_{(i,t_2)} - ULA_i) / LA_{(i,t_1)} / (t_2 - t_1) \times 100\% \quad (1)$$

$$IRL_i = (LA_{(i,t_2)} - ULA_i) / LA_{(i,t_1)} / (t_2 - t_1) \times 100\% \quad (2)$$

$$CCL_i = \{ (LA_{(i,t_2)} - ULA_i) + (LA_{(i,t_1)} - ULA_i) \} / LA_{(i,t_1)} / (t_2 - t_1) \times 100\% = TRL_i + IRL_i \quad (3)$$

式中:TRL_{*i*}, IRL_{*i*}, CCL_{*i*}——第 *i* 种土地利用类型在 *t*₁ 至 *t*₂ 期间的转移速率、新增速率和变化速率;

LA_(*i,t*₁), LA_(*i,t*₂)——*t*₁ 和 *t*₂ 时刻的第 *i* 种土地利用类型的面积; ULA_{*i*}——研究期内第 *i* 种土地利用类型未变化部分的面积; *t*₁, *t*₂——研究初期和末期的时间。

根据各土地利用类型面积增加或减少将其划分为扩张型和衰减型,结合各土地利用类型转移速率与新增速率对比,进一步将其划分为高速型、中速型和低速型。综合考虑两种划分方式,对其进行排列组合共可产生 6 种类型,其计算公式与划分方式(表 2)为:

$$M = |T_i - N_i| / \max(T_i, N_i) \quad (4)$$

式中:*M*——土地利用类型的变化类型的定量表示;*T*_{*i*}——第 *i* 种土地利用类型的转移速率; *N*_{*i*}——第 *i* 种土地利用类型的新增速率。

表 2 土地利用变化类型划分

衰减型			扩张型		
低速	中速	高速	低速	中速	高速
(0~0.5)	(0.5~0.8)	(0.8~1)	(0~0.5)	(0.5~0.8)	(0.8~1)

2.2.2 CA-Markov 模型

(1) CA 模型主要由空间、元胞、邻域和转化规则 4 个要素组成。在传统的土地利用 CA 模型中,时间、空间和状态被认为是离散的^[17]。每个栅格都代表着一个元胞,每个元胞都代表着各自特定的状态即土地利用类型,并且每一个元胞的状态都会随着邻域状态和转化规则的变化而变化,CA 模型可表达为:

$$S(t+1) = f[S(t), N] \quad (5)$$

式中:*S*——元胞空间即元胞有限、离散状态的集合;*f*——元胞状态的转换规则函数; *N*——每个元胞的邻域; *t*+1, *t*——两个不同的时刻。

(2) 马尔科夫预测是一种具有“无后效应”的随机过程,即状态转移概率仅与转移时的状态、转移步数、转移后的状态有关,而与转移前的时刻无关。由于土地利用变化也具有类似马尔科夫过程的性质,因此被广泛应用于预测土地利用的动态变化^[18]。其模拟土地利用变化的计算公式为:

$$S(t+1) = P_{ij} \times S(t) \quad (6)$$

式中:*S*(*t*+1), *S*(*t*)——*t*+1 时刻和 *t* 时刻的土地利用系统的状态; *P*_{*ij*}——状态转移概率矩阵。

(3) CA-Markov 模型可以有机结合 Markov 模型长时间序列模拟预测的优势和 CA 模型在模拟空间变化的优势,可以较好地数量和空间上对土地利用变化的时空格局进行模拟和预测^[19]。在 IDRISI 软件的支持下,利用转移概率矩阵和转换适宜性图集实现模型的运算,并构建 5×5 的滤波器。CA 滤波器通过确定元胞的邻域创建具有显著空间意义的权重因子,使其作用于元胞从而确定其状态的改变。以

2000 年为基期年,迭代次数设为 15 次,得到 2015 年模拟的土地利用格局,并对其进行 Kappa 系数检验。最后再以 2015 年为基期年,迭代次数设为 15 次,最终得到 2030 年模拟的土地利用格局。

2.2.3 InVEST 生境质量模型 InVEST 生境质量模型中定义生境为“通过给定的有机体为生命体提供资源和生存及繁育条件的空间^[20]”。该模型是通过建立威胁源与生境质量之间的联系,综合考虑威胁的相对影响(权重)、生境栅格与威胁之间的距离、栅格受法律保护的等级以及每一种生境类型对每一种威胁的相对敏感性等因素,计算威胁源对生境质量的负面影响,得到研究区域的生境退化程度与生境质量。具体计算过程为:

$$D_{xy} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{Y_r} \left[\frac{\omega_r}{\sum_{r=1}^R \omega_r} \right] r_y i_{rxy} \beta_x S_{jr} \quad (7)$$

式中: R ——威胁因子; y ——威胁因子 r 栅格图层的栅格数; Y_r ——威胁因子所占栅格数; ω_r ——威胁因子权重; r_y ——栅格 y 的威胁因子值(0 或 1); i_{rxy} ——栅格 y 的威胁因子值 r_y 对生境栅格 x 的威胁水平; β_x ——栅格 x 的可达性水平取值 0~1;1 表示极易达到, S_{jr} ——生境类型 j 对威胁因子 r 的敏感程度; i_{rxy} 通过下式得到:

$$i_{rxy} = 1 - \left(\frac{d_{xy}}{d_{rmax}} \right) \quad (\text{线性衰减}) \quad (8)$$

$$i_{rxy} = \exp \left[- \left(\frac{2.99}{d_{rmax}} \right) d_{xy} \right] \quad (\text{指数衰减}) \quad (9)$$

式中: d_{xy} ——栅格 x 与栅格 y 之间的直线距离; d_{rmax} ——威胁因子 r 的最大影响距离。

$$Q_{xy} = H_j \left[1 - \left(\frac{D_{xy}^z}{D_{xy}^z + k^z} \right) \right] \quad (10)$$

式中: H_j ——地类 j 的生境适宜度; D_{xy} ——地类 j 中栅格 x 的生境退化度; k ——半饱和常数,即退化度最大值的 1/2; z ——模型默认参数。

运行生境质量模型需要的主要参数包括威胁因子影响的距离及其权重、生境对各威胁因子的适宜度和敏感性。根据模型推荐的参考值和研究区实际情况,将对自然环境影响程度较大的人工用地(建设用地)和半人工用地(耕地)作为威胁因子,其影响范围和权重按照人类活动对自然环境影响程度,即人工用地 > 半人工用地进行赋值(表 3)。参考 InVEST 模型的实例并结合 Foresman^[21]、肖明^[22]、巩杰^[23]、吴季秋^[24] 等学者的研究,对各生境类型对威胁因子的适宜度与敏感性进行赋值(表 4)。

表 3 威胁因子的最大影响距离及其权重

威胁因子	最大影响距/km	权重	衰减类型
耕地	1	0.1	线性
城镇居住用地	5	0.3	指数
农村居住用地	3	0.2	指数
工矿用地	4	0.15	指数
交通用地	2	0.1	线性
设施农用地	2	0.15	指数

表 4 不同生境类型对不同威胁因子的敏感度

类型	生境适宜度	耕地	城镇居住用地	农村居住用地	工矿用地	交通用地	设施农用地
有林地	1	0.6	0.8	0.8	0.7	0.7	0.2
灌木林地	0.8	0.6	0.6	0.5	0.5	0.6	0.4
其他林地	0.6	0.2	0.3	0.2	0.5	0.2	0.4
其他草地	0.6	0.5	0.6	0.6	0.5	0.6	0.3
河流、浅海水域	0.9	0.2	0.8	0.7	0.8	0.6	0.3
水库、坑塘	0.9	0.6	0.8	0.7	0.7	0.6	0.3
滩涂	0.6	0.5	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2
水田	0.6	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3
旱地	0.4	0.3	0.5	0.4	0.5	0.2	0.2
沙地	0	0	0	0	0	0	0
裸地	0	0	0	0	0	0	0
城镇居住用地	0	0	0	0	0	0	0
农村居住用地	0	0	0	0	0	0	0
工矿用地	0	0	0	0	0	0	0
交通用地	0	0	0	0	0	0	0
设施农用地	0	0	0	0	0	0	0

3 结果与分析

3.1 土地利用动态演变

根据土地利用变化空间分析模型对福州新区

2000—2015 年的土地利用变化程度的测算和变化类型划分的结果(表 5—6)可以看出:① 15 a 间福州新区耕地的转移面积最大,达 7 047.27 hm²,占区域总体转移面积的 37.49%,是其他土地利用类型新增部

分的主要来源。转移速度明显快于其他土地利用类型,接近其新增速度的 3 倍,且耕地的转移速率远大于其新增速率,属于中速衰减型。但是由于耕地的基期面积在所有类型中最大,导致其变化速率以及转移速率并不高。②建设用地的新增速度和速率在所有土地利用类型中都是最快的,其新增面积同样也是最大的,且新增速率远大于转移速率,属于高速扩张型。在研究期内,建设用地的新增面积占区域总体新增面积的 61.52%,可见福州新区在 15 a 内经历了较为剧烈的建设用地扩张。③未利用地是福州新区内变化

最为剧烈的地类,其变化比例高达 49.23%,远高于其他土地利用类型。在研究期内,未利用地的转移速率最快且新增速率仅次于建设用地,从而导致其转移面积与新增面积相当,说明新区内对未利用地的使用和闲置程度都较高。④除林地和水域属于中速衰减型外,草地和海域分别均属于低速衰减型,其转移速度和速率一般大于其同期的新增速度与速率,净地面积在减少。其中林地和水域的衰减趋势较为明显,在转移速率为 1.34%和 1.86%的同时新增速率只有 0.37%和 0.64%。

表 5 福州新区 2000—2015 年土地利用动态变化率

土地利用类型	未变化面积/ hm ²	转移部分			新增部分			变化速度/ (hm ² ·a ⁻¹)	变化速率/ (hm ² ·a ⁻¹)
		面积/ hm ²	转移速度/ (hm ² ·a ⁻¹)	转移速率/ (hm ² ·a ⁻¹)	面积/ hm ²	新增速度/ (hm ² ·a ⁻¹)	新增速率/ (hm ² ·a ⁻¹)		
耕地	24 221.37	7 047.27	469.82	1.50	2 227.17	148.48	0.56	618.30	2.06
林地	10 172.79	2 550.53	170.04	1.34	591.42	39.43	0.37	209.46	1.70
草地	567.20	284.81	18.99	2.23	134.13	8.94	1.28	27.93	3.50
建设用地	12 396.02	474.64	31.64	0.25	11 564.45	770.96	3.22	802.61	3.46
水域	13 579.15	5 271.08	351.41	1.86	1 451.97	96.80	0.64	448.20	2.51
海域	13 217.79	1 925.74	128.38	0.85	1 770.78	118.05	0.79	246.43	1.64
未利用地	1 284.02	1 245.31	83.02	3.28	1 059.46	70.63	3.01	153.65	6.30
区域总体	75 438.34	18 799.38	1 253.29	1.33	18 799.38	1 253.29	1.33	2 506.58	1.33

表 6 福州新区 2000—2015 年各类用地变化类型

土地利用类型	耕地	林地	草地	建设用地	水域	海域	未利用地
M 值	0.63	0.72	0.43	0.92	0.66	0.07	0.08
变化类型	中速衰减型	中速衰减型	低速衰减型	高速扩张型	中速衰减型	低速衰减型	低速衰减型

注:M 为土地利用类型的变化类型的定量表示。

3.2 CA-Markov 预测结果

为提高 CA-Markov 模型的预测精度,本研究采用土地利用分类中的二级地类进行模拟预测,运用 IDRISI 模型中的 Crosstab 模块对模拟结果与实际结果进行 Kappa 系数检验。其计算公式为:

$$Kappa = (P_o - P_c) / (P_p - P_c) \quad (11)$$

式中: P_o ——正确模拟的比例; P_p ——理想分类情况下的正确模拟比例; P_c ——随机情况下期望的正确模拟比例。通常,当 $Kappa \geq 0.75$ 时,则说明模拟精

度较高;当 $0.4 \leq Kappa \leq 0.75$ 时,模拟精度一般;当 $Kappa \leq 0.4$ 时,则精度较差。将 2000 年土地利用现状图与模拟结果进行对比,得到模拟结果对比数据(表 7)。由模拟结果可知,968 637 个栅格得到正确模拟,占总栅格数量的 92.51%。2015 年模拟值与实际值的总体 Kappa 系数达到 0.957 2,远大于 0.75,并且各土地利用类型的 Kappa 系数均大于 0.75。表明两者一致性较高,变化相对较小,模拟结果可信。据此,本研究进一步模拟研究区 2030 年土地利用情况。

表 7 福州新区 2015 年部分土地利用类型模拟 Kappa 系数

土地利用类型	Kappa 系数	土地利用类型	Kappa 系数	土地利用类型	Kappa 系数
耕地	0.987 6	水域	0.888 9	草地	0.998 3
有林地	0.984 3	滩涂	0.730 7	工矿用地	0.900 0
灌木林地	0.976 7	城镇居住用地	0.949 6	交通用地	0.994 3
其他林地	0.932 9	农村居住用地	0.909 7	未利用地	0.976 2

3.3 生境质量的时空演变特征

基于 CA-Markov 和 InVEST 模型得到研究区 2000, 2015 和 2030 年的生境质量时空分布。生境质量指数在栅格图层中是以 0~1 之间连续变化的值来体现, 其值越接近 1, 则生境质量越好, 越有利于生物多样性的维持。为更好地比较研究区土地利用变化对生境质量的影响, 将 3 期生境质量指数运算结果等距划分为低(0~0.2)、较低(0.2~0.4)、中等(0.4~0.6)、较高(0.6~0.8)和高(0.8~1)5 个级别, 分别统计 3 期各等级生境质量栅格数及其所占百分比(图 1, 表 8)。结果表明: ①在时间上, 研究区 2000—2030 年生境质量明显下降。其中, 2000 年生境质量最好, 中等及以上生境占 62.33%, 且低等级生境仅占 17.50%。至 2015 年, 中等及以上生境占比降至 56.07%, 虽然较低等级生境占比有所上升, 但低等级生境占比显著上升至 29.48%。至 2030 年, 生境质量进一步下降, 低等级生境占比上升至 41.23, 而较低等级生境骤降为 0, 主要向低等级和中等等级生境转移。虽然 2030 年中等及以上生境占比达 58.57%, 较 2015 年有所上升, 但不可忽视的是低等级生境占比增加了 11.94% 和高等级生境占比减少了 6.45%。以上变化表明, 2000—2030 年研究区生境质量明显

退化, 从土地利用及其转移变化来看, 其主要原因为 2000—2030 年建设用地和未利用地等生境适宜度较低的地类面积大大增加, 而研究区内面积最大的耕地和生境适宜度较高的林地以及水体面积大量减少。②在空间上, 研究区生境质量整体体现出由西北向东南逐渐递增的趋势。其中, 北部地区生境退化较为严重, 主要分布在马尾镇和城门镇地区, 上述地区与福州市中心紧密相连, 主要受福州市中心建设用地向外扩张的影响; 其次为琅岐开发区, 其位于闽江入海口处, 2000—2015 年生境退化并不显著, 至 2030 年, 琅岐开发区建设用地环岛扩张趋势明显, 同时影响闽江入海口处生境质量。中部地区以长乐机场向外扩散生境质量逐年降低, 以低等和中等为主。虽然文武砂水库保持着高等级的生境质量, 但由于福州滨海新城东湖 VR 小镇的建设导致其周边生境质量已达到低等级。南部变化较为缓和, 主要以江阴国际集装箱码头为中心向外扩张以及侵占沿海滩涂和浅海水域导致生境质量逐年下降; 江镜镇人工环境侵占相对较少仍然保持着高等级的生境质量; 而高山镇和东瀚镇内分布着众多丘陵, 低生境分布较为零星, 且根据预测结果, 该地区中部分草地及耕地转换为林地, 生境质量有所上升。

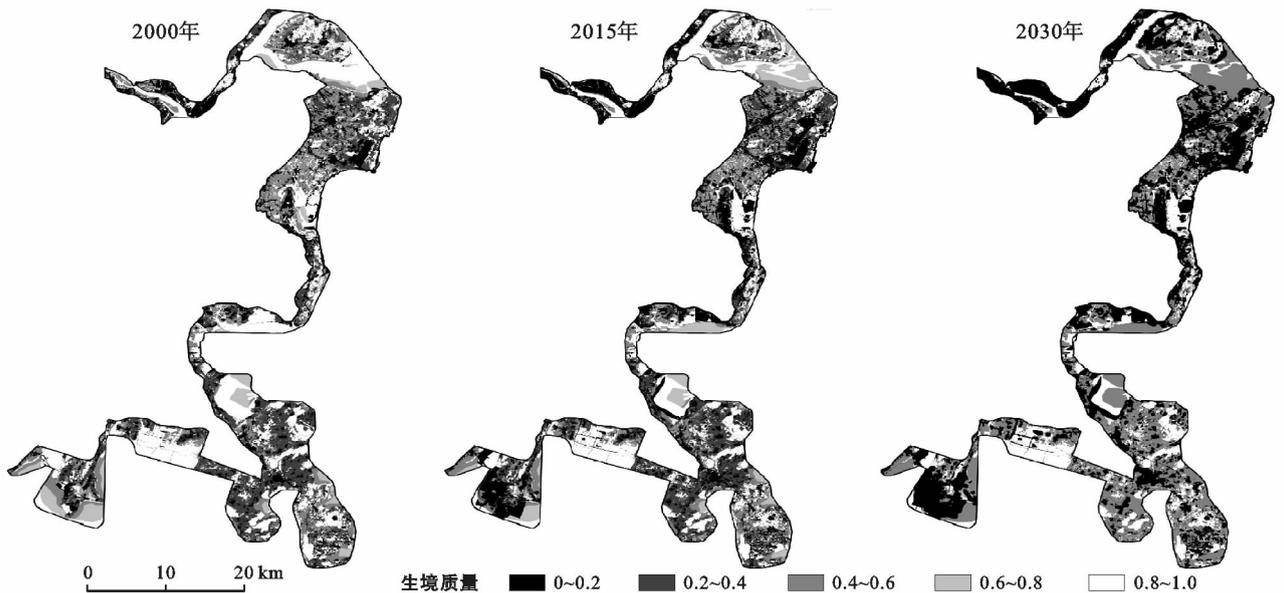


图 1 福州新区生境质量空间分布(2000—2030 年)

表 8 福州新区 2000—2030 年不同等级生境质量比例

等级	生境质量	2000 年		2015 年		2030 年	
		栅格数/ 10^4	所占比例/%	栅格数/ 10^4	所占比例/%	栅格数/ 10^4	所占比例/%
低等	0~0.2	18.327 3	17.50	30.869 8	29.48	43.375 4	41.43
较低等	0.2~0.4	22.046 7	21.06	17.760 4	16.96	0	0
中等	0.4~0.6	25.847 0	24.69	24.710 5	23.60	36.833 9	35.18
较高等	0.6~0.8	0.768 6	0.73	0.653 6	0.62	0.538 3	0.51
高等	0.8~1	37.713 5	36.02	30.708 8	29.33	23.955 5	22.88

3.4 生境质量变化原因分析

从上述分析可以看出,研究区 2000—2030 年生境质量呈明显地下降趋势。从土地利用的角度来看,研究区内主要的变化特征为建设用地的高速扩张以及生境质量较高的林地和水域的大量减少,草地和滩涂等中等生境适宜度的地类也有一定程度的减少。作为研究区生境质量威胁源的建设用地在研究期间急剧增长,特别是以长乐机场周边扩张最为剧烈,不断侵占生境适宜度较高的林地、水域、滩涂和草地,从而导致威胁源的面积不断增加,其影响范围也不断扩张,导致研究区生境质量不断下降。从地形的角度来看,福州新区背山面海,地形较为平坦,最高海拔仅为 384 m,研究区内仅有北部的罗星街道和亭江镇交界处、琅岐开发区,中部的松下镇以及南部的东瀚镇内有少量丘陵地区。就地形而言其建设用地开发难度较小,不加以限制易造成无序扩张的状态,而丘陵地区由于人类活动对其影响较小,因此一直保持着较高的生境质量。从生境质量的空间分布来看,生境质量指数在 0.6 以上的区域主要分布在北部的闽江河口,中部的文武砂水库,南部的江镜镇沿海地区以及东瀚镇的丘陵地区,闽江河口和文武砂水库为福州市重要的湿地区域,特别是闽江口国家湿地公园,自然环境优越,是我国候鸟迁徙重要越冬地,生物多样性丰富,同时政府十分重视对上述区域的生态保护,因此具有较高的生境质量。

4 讨论

本文将福州新区未来土地利用变化模拟预测结果与《福州新区总体规划(2015—2030年)》的远景用地布局规划(以下简称“2030年用地规划”)进行对比(图2),分析模拟预测结果与规划之间的差异。结果表明,预测的2030年建设用地在空间分布上与2030年用地规划基本相同,但在面积上存在一定的差距。2030年用地规划显示规划建设用地面积将达 41 398.31 hm²,占研究区总面积高达 43.93%,而本研究预测的建设用地面积为 31 169.21 hm²,二者相差 11.83%,相当于2015年新区内所有林地的面积。按此规划,2015—2030年建设用地增长速度将高达 1 162.52 hm/a,远远大于2000—2015年的建设用地增长速度。同时,研究区北部拥有长乐海蚌省级自然保护区和文武砂水库,生态价值重要,按照2030年用地规划将对其生境造成严重影响。其次,新区内由于各类建设用地的扩张,将导致生境质量明显下降,除河流海域等地类以外,2030年大部分区域生境质量均在中等以下范围。因此,为对新区的生态环境进

行保育,避免生境质量向更严重的情况退化,建议将2030年用地规划中的建设用地边界作为限制建设区边界,将预测结果作为允许建设区边界,提高建设用地的集约利用程度,以期达到经济、社会和生态效益的综合提高,建设生态型新城区。

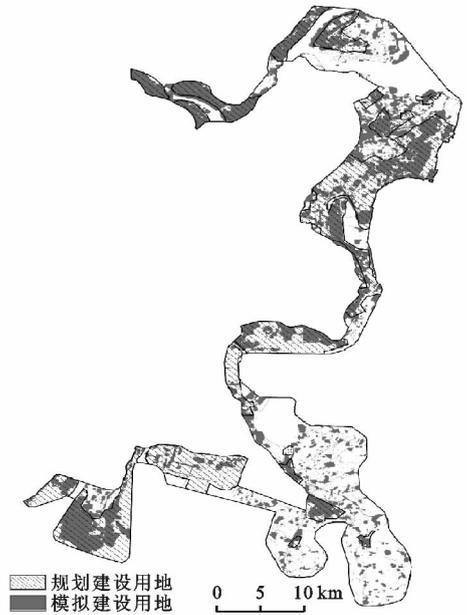


图2 福州新区 2030 年模拟与规划建设用地对比

5 结论

(1) 从土地利用变化空间分析模型和变化类型的划分结果可以看出,研究区耕地、林地和水域与建设用地分别属于中速衰减型和高速扩张型,衰减速度和扩张速度均较大;虽然未利用地面积变化较小,但由于其转移与新增速度和速率相当,导致其变化最为剧烈;草地和海域均属于低速衰减型,衰减速度较低。

(2) 从对模拟精度的检验结果看,研究区各二级地类的 Kappa 系数均超过 0.750 0,且新区总体的 Kappa 系数高达 0.957 2,模拟结果可信度较高。

(3) 2000—2030 年,福州新区由于大量生境质量高的地类转化为生境质量较低的建设用地以及土地利用强度和围垦强度加大,威胁源数量增多,威胁范围更广,导致生境质量退化严重。

[参 考 文 献]

- [1] 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.
- [2] 吕晓,史洋洋,黄贤金,等. 江苏省土地利用变化的图谱特征[J]. 应用生态学报, 2016, 27(4): 1077-1084.
- [3] Mooney H A, Duraiappah A, Larigauderie A. Evolution of natural and social science interactions in global change

- research programs [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(Suppl1):3665-3672.
- [4] 欧阳志云, 郑华. 生态系统服务的生态学机制研究进展 [J]. 生态学报, 2009, 29(11):6183-6188.
- [5] Seoane J, Judribó J H, García F, et al. Habitat-suitability modelling to assess the effects of land-use change on Dupont's lark *Chersophilus duponti*: A case study in the Layna Important Bird Area [J]. Biological Conservation, 2006, 128(2):241-252.
- [6] Rittenhouse C D, Rissman A R. Forest cover, carbon sequestration, and wildlife habitat: Policy review and modeling of tradeoffs among land-use change scenarios [J]. Environmental Science & Policy, 2012, 21(8):94-105.
- [7] 吴未, 张敏, 许丽萍, 等. 土地利用变化对生境网络的影响: 以苏锡常地区白鹭为例 [J]. 生态学报, 2015, 35(14):4897-4906.
- [8] 褚琳, 黄翀, 刘庆生, 等. 2000—2010 年辽宁省海岸带景观格局与生境质量变化研究 [J]. 资源科学, 2015, 37(10):1962-1972.
- [9] 郑宇, 张蓬涛, 汤峰, 等. 基于 InVEST 模型的昌黎县土地利用变化对生境质量的影响研究 [J]. 中国农业资源与区划, 2018(7):121-128.
- [10] 赵建军, 张洪岩, 乔志和, 等. 基于 CA-Markov 模型的向海湿地土地覆被变化动态模拟研究 [J]. 自然资源学报, 2009, 24(12):2178-2186.
- [11] 吴晶晶, 田永中, 许文轩, 等. 基于 CA-Markov 模型的乌江下游地区土地利用变化情景分析 [J]. 水土保持研究, 2017, 24(4):133-139.
- [12] 柯新利, 边馥苓. 基于 C5.0 决策树算法的元胞自动机土地利用变化模拟模型 [J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(4):403-408.
- [13] 赵冠伟, 龚建周, 谢建华, 等. 基于 CA 模型的城市边缘区土地利用演变模拟: 以广州市花都区为例 [J]. 中国土地科学, 2009, 23(12):56-62.
- [14] 宁龙梅, 王学雷, 胡望斌. 利用马尔科夫过程模拟和预测武汉市湿地景观的动态演变 [J]. 华中师范大学学报: 自然科学版, 2004, 38(2):255-258.
- [15] 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.
- [16] 刘盛和, 何书金. 土地利用动态变化的空间分析测算模型 [J]. 自然资源学报, 2002, 17(5):533-540.
- [17] 王友生, 余新晓, 贺康宁, 等. 基于 CA-Markov 模型的藉河流域土地利用变化动态模拟 [J]. 农业工程学报, 2011, 27(12):330-336, 442.
- [18] 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.
- [19] 程刚, 张祖陆, 吕建树. 基于 CA-Markov 模型的四川流域景观格局分析及动态预测 [J]. 生态学杂志, 2013, 32(4):999-1005.
- [20] Hall L, Krausman P, Morrison M. The habitat concept and a plea for standard terminology [J]. Wildlife Society Bulletin, 1997, 25(1):173-182.
- [21] Foresman K R. Small mammal use of modified culverts on the Lolo South Project of Western Montana [J]. Ecology and Transportation, 2003, 21(5):342-343.
- [22] 肖明. GIS 在流域生态环境质量评价中的应用 [D]. 海南海口: 海南大学, 2011.
- [23] 巩杰, 马学成, 张玲玲, 等. 基于 InVEST 模型的甘肃白龙江流域生境质量时空分异 [J]. 水土保持研究, 2018, 25(3):191-196.
- [24] 吴季秋. 基于 CA-Markov 和 InVEST 模型的海南八门湾海湾生态综合评价 [D]. 海南海口: 海南大学, 2012.