农业资源与环境学报 CSCD核心期刊 中文核心期刊 中国科技核心期刊
JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT
欢迎投稿 http://www.aed.org.cn

辽宁省未来土地利用情景模拟及玉米生产潜力预测

蒲罗曼

引用本文:
蒲罗曼. 辽宁省未来土地利用情景模拟及玉米生产潜力预测[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(6): 1174–1184.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0604

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于Markov和GM(1,1)模型的土地利用变化预测
孙仪阳, 李贻学, 姜怀龙, 周迎雪
农业资源与环境学报. 2016, 33(3): 289–296 https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0297

土地利用变化对农业文化遗产系统结构的影响——以浙江省德清县为例
杨晓, 焦雯珺, 闵庆文, 杨伦
农业资源与环境学报. 2022, 39(5): 885–893 https://doi.org/10.13254/j.jare.2022.0410

基于土地利用的北方农牧交错区碳固定和土壤保持时空变化
常虹, 杨武, 石磊, 刘亚红, 邱晓, 伊风艳, 孙海莲
农业资源与环境学报. 2021, 38(3): 484–493 https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0310

黑龙江省春玉米近二十年产量及肥料利用率变化
姬景红, 刘双全, 郑雨, 刘颖, 张明怡, 马星竹, 郝小雨, 陈雪丽
农业资源与环境学报. 2022, 39(6): 1099–1105 https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0684

京津冀潮白河区域2001—2017年耕地利用变化时空特征分析
苏锐清, 曹银贵, 王文旭, 邱敏, 宋蕾
农业资源与环境学报. 2020, 37(4): 574–582 https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0266

关注微信公众号，获得更多资讯信息

蒲罗曼. 辽宁省未来土地利用情景模拟及玉米生产潜力预测[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(6): 1174-1184.
PU L M. Simulation of the future land use scenario and prediction of maize potential yields in Liaoning Province[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(6): 1174-1184.

开放科学 OSID

辽宁省未来土地利用情景模拟及玉米生产潜力预测

蒲罗曼

(海南大学公共管理学院, 海口 570228)

摘 要:为了探究未来耕地变化对粮食生产潜力的影响,进而保障未来粮食安全,本研究利用CA-Markov模型模拟了辽宁省2050年的土地利用情景,并利用全球农业生态区划(GAEZ)模型对2050年的玉米生产潜力进行预测,进而对2020—2050年辽宁省玉米生产潜力的时空变化特征进行预判。预测结果表明,未来30年辽宁省土地利用类型的变化以旱地和林地的减少(分别为29.78万hm^2和25.05万hm^2)以及城乡工矿用地的增加(55.55万hm^2)为主,地类的相互转化主要表现为其他地类向旱地转化,以及旱地和水田向城乡工矿用地的转化。基于2050年的耕地情景,预测辽宁省玉米潜在总产量和平均潜在单产分别为393.38万t和7 830.56 kg·hm^{-2},其中北部和南部地区玉米平均潜在单产大部分在8 000 kg·hm^{-2}以上,远高于西部和东部部分地区。2020—2050年,受耕地变化影响,玉米潜在总产量和平均潜在单产分别减少630.52万t和679.57 kg·hm^{-2},但在空间上大约近一半旱地的平均潜在单产仍有所增加。未来辽宁省应制定更多的生态环境保护政策,防止过度开垦及建设用地扩张现象的发生,进而在保证耕地资源数量和质量的前提下确保未来粮食安全。

关键词:土地利用情景;玉米生产潜力;CA-Markov模型;GAEZ模型;辽宁省
中图分类号:S513 **文献标志码**:A **文章编号**:2095-6819(2022)06-1174-11 **doi**: 10.13254/j.jare.2021.0604

Simulation of the future land use scenario and prediction of maize potential yields in Liaoning Province

PU Luoman
(School of Public Administration, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: The CA-Markov model was employed to simulate the land use scenario in Liaoning Province in 2050 to explore the impact of future cropland change on crop yield potential and ensure future food security. The Global Agro-Ecological Zones (GAEZ) model was used to predict maize yield potential in 2050. Finally, predictions of the spatio-temporal changes in maize yield potential during 2020—2050 were examined. The results were as follows: The predicted area changes of different land use types in Liaoning Province over the next 30 years were mainly caused by a decrease in dryland and woodland (297 800 hm^2 and 250 500 hm^2, respectively), and an increase in built-up land (555 500 hm^2). The interconversion of different land use types was mainly from different land use types to dryland, and from dryland and paddy fields to built-up land. The total maize production potential and average yield potential in Liaoning were 3.93 million tons and 7 830.56 kg·hm^{-2}, respectively, based on the simulated cropland scenario for 2050. The maize yield potential in the northern and southern regions was more than 8 000 kg·hm^{-2}, much higher than that in the western and eastern regions. From 2020 to 2050, the total maize production potential decreased by 6.31 million tons, and the average maize yield potential decreased by 679.57 kg·hm^{-2} due to cropland change. Maize yield potential increased by approximately half of the dryland. Therefore, Liaoning Province should formulate more ecological and environmental protection policies in the future for prevention of excessive reclamation and built-up land expansion to ensure future food security on the premise of ensuring the quantity and quality of cropland.

Keywords: land use scenario; maize potential yields; CA-Markov model; GAEZ model; Liaoning Province

收稿日期:2021-09-08 **录用日期**:2021-11-02
作者简介:蒲罗曼(1993—),女,辽宁朝阳人,博士,讲师,从事土地利用/覆被变化、农业遥感、粮食生产潜力方面的研究。
E-mail:994424@hainanu.edu.cn
基金项目:海南省自然科学基金项目(321QN187);海南大学科研启动基金(kyqd(sk)2135)
Project supported: Hainan Provincial Natural Science Foundation of China(321QN187); Scientific Research Foundation of Hainan University(kyqd(sk)2135)

土地资源是人类生存和发展必不可少的物质基础。21世纪以来,随着中国工业化、城镇化的快速发展及人口的不断增长,人们对土地资源的利用强度不断加大,从而导致一系列社会、生态和环境问题,并伴随着耕地资源的快速变化[1-2]。一方面,耕地资源的数量受到严重威胁。据统计,中国城镇化和工业化每年占用优质耕地资源63万hm^2[3]。另一方面,部分地区虽积极维持耕地"占补平衡",但新增耕地的质量却难以保证。在耕地数量减少和质量下降的双重威胁下,粮食生产能力受到极大影响,加剧了耕地保护、粮食安全与社会经济发展之间的矛盾[4]。目前,中国对粮食产量的需求逐年攀升。虽然近年来我国粮食单位面积产量不断提升,2010—2018年平均增产超过600 kg·hm^{-2},但这在一定程度上是以高投入、高成本和破坏生态环境为代价的[1]。2050年,中国旨在建设成为富强、民主、文明、和谐、美丽的社会主义现代化强国,其中保证粮食安全是重中之重。但如果持续占用优质耕地,并忽略新增耕地质量,将难以保证未来粮食安全。因此,亟需预判未来耕地数量及空间分布,进而预测未来土地利用变化条件下的粮食生产潜力。

近几十年,未来土地利用情景模拟已经成为一项重要研究课题[5]。土地利用模拟模型大致可分为三类:数量预测模型、空间预测模型和数量空间耦合预测模型。数量预测模型主要用于预测未来区域内各土地利用类型的面积,其原理是采用数学方法将数据代入公式中计算结果,如马尔科夫(Markov)模型[6-7]、Logistic模型[8-9]。空间预测模型主要探讨土地利用类型的空间变化规律,如元胞自动机(CA)模型[10-11]和CLUE-S模型[12]。近年来,众多学者将数量和空间预测模型耦合模拟区域内土地利用类型的时空变化,例如将CA和Markov模型组合为CA-Markov模型,不仅可以准确预测未来土地利用类型的数量,也可有效模拟土地利用类型的空间分布,实用性较强[13]。虽然部分学者也应用了其他模型,如FLUS模型[14]和LCM模型[15],但CA-Markov模型的应用最为广泛[16]。

模型的精度验证是确定模型能否进一步应用的必要步骤。目前,验证土地利用模拟模型精度的常用方法是比较模拟的土地利用图和参考土地利用图的土地类型信息[17]。一部分学者通过计算某一土地利用类型的数量误差来进行数量精度验证,而一部分学者则通过计算*Kappa*系数进行空间精度验证[18-19]。然而,PONTIUS等[17]认为上述方法在精度评估中存在无效性和误导性,相比之下,FOM(Figure of Merit)方法更佳。FOM方法是一种"三幅地图比较法",即比较起始时点的"参考图"、结束时点的"参考图"和结束时点的"模拟图",通过叠加和对比分析模拟的土地利用变化图与参考的土地利用变化图来判断模拟变化图中的数量误差和空间分配误差[17,20-21]。因此,本研究创新地采用CA-Markov模型预测未来土地利用情景,并应用FOM方法验证CA-Markov模型的精度。

玉米是辽宁省最主要的粮食作物。本研究在利用FOM方法验证了CA-Markov模型的精度后,模拟辽宁省2050年的土地利用情景,进而预测2020—2050年土地利用变化情况,并利用全球农业生态区划(GAEZ)模型预测了2050年玉米潜在单产和总产量,进而探究2020—2050年玉米潜在单产和总产量的时空变化特征。本研究通过预测未来耕地变化,探究未来粮食生产潜力,旨在为土地管理政策的制定提供决策参考。

1 研究区与数据来源

1.1 研究区概况

研究区辽宁省位于欧亚大陆东岸,处于中国东北地区的最南端,地理坐标为38°43′~43°26′N,118°53′~125°46′E,总面积约14.84万km^2,共包含14个地级市[22](图1)。地势大致为自东西两侧向中部倾斜,呈现马蹄形。该省处于温带大陆性季风气候区,春、夏、秋、冬四季分明,年平均气温为6~11 ℃,年降水量为600~1 100 mm,是整个东北地区降水量最多的省份[23]。全省土地利用类型多样,土地生产潜力较大。耕地和林地是辽宁省主要的土地利用类型,两者的面积占全省土地总面积的65.93%。玉米、水稻、大豆、薯类、谷子和高粱为辽宁省主要的粮食作物,其中玉米最为普遍。通过查阅辽宁省统计年鉴得知,2019年辽宁省玉米的播种面积和总产量分别占所有粮食作物(包括谷类、块茎类和豆类)播种面积和总产量的75.24%和72.31%。

1.2 数据来源与预处理

辽宁省1990、2000和2020年的土地利用数据来源于中国科学院资源环境数据中心土地利用数据库(比例尺为1∶10万)(http://www.resdc.cn/)。该数据库是根据1990年和2000年Landsat TM/ETM遥感影像及2020年Landsat OLI影像经人机交互解译获得。经野外验证,其解释精度>90%,可满足1∶10万制图的精度要求[24-25]。三期土地利用数据首先被分为6个一级土地利用类型,即耕地、林地、草地、水体、城乡工矿

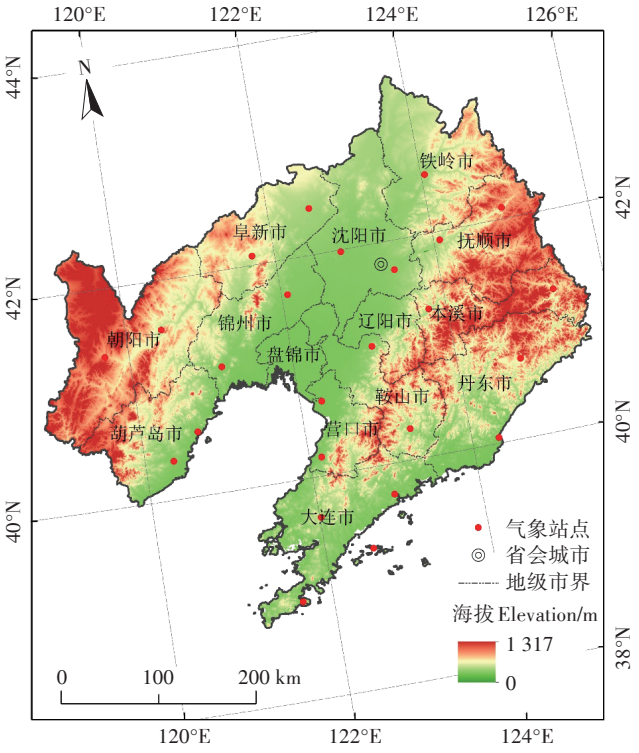


图1 研究区位置图

Figure 1 Location of the study area

用地和未利用地。在此基础上,将耕地进一步划分为水田和旱地,最终分为7个土地利用类型。

气候数据为2020年的7种逐月气候变量,包括平均最高气温、平均最低气温、累积降水量、累积太阳净辐射、平均相对湿度、2 m高度的平均风速和雨天频率(每月降水超过0.2 mm的天数)。上述7种气候变量的原始观测数据来自中国气象数据网(http://www.nmic.cn/)覆盖辽宁省的25个气象站点的逐月观测数据。基于辽宁省DEM,利用ANUSPLIN软件,将原始的气象站点的观测数据插值到10 km空间分辨率的连续栅格表面。

土壤数据来自中国科学院南京土壤研究所提供的1∶100万比例尺的中国土壤数据库,将其处理为空间分辨率为1 km的栅格数据。该土壤数据库包含土壤有机碳含量、pH值、阳离子交换量、土壤质地和土壤持水能力等土壤剖面属性与土壤的空间分布。

地形数据为DEM数据(空间分辨率为90 m),来源于航天飞机雷达地形测绘使命(Shuttle Radar Topography Mission,SRTM)的C波段数据,并进一步被处理为坡度和坡向数据。

人口密度和GDP数据来自中国科学院资源环境数据中心(http://www.resdc.cn/)。距公路和铁路的距离数据来源于公路和铁路的空间分布数据(http://www.resdc.cn/),并经IDRISI Selva V.17软件处理而成。城市和农村居民点的空间分布数据来源于辽宁省2000年和2020年的土地利用数据,并进一步处理为距城市和乡村的距离数据。

此外,由于2021年辽宁省统计年鉴尚未发布,2020年的灌溉面积数据、粮食播种面积和产量数据暂用2019年的数据代替。上述数据均来自2020年辽宁省统计年鉴,并以辽宁省的地级市为统计单元。

2 研究方法

2.1 未来土地利用情景模拟

模拟未来的土地利用情景是计算已知一段时期的土地利用变化,并将其外推至未来土地利用变化的过程[26]。本研究采用CA-Markov模型模拟未来的土地利用情景。

Markov模型是一种传统的基于马尔可夫随机过程系统进行预测的理论方法[27],常被用于预测具有非后效性的地理事件。在土地利用变化研究中,Markov模型通过建立转移概率矩阵分析土地利用随时间变化的概率,并根据前一时期的转移概率矩阵预测后一段时间内土地利用类型的数量。因此,t+1时刻的土地利用类型的状态取决于t时刻的土地利用类型的状态,t+1时刻的土地利用类型状态可以通过以下公式[28]计算:

$$S_{t+1} = P_{ij} \times S_t \tag{1}$$

式中:S_{t+1}和S_t分别为土地利用类型在t+1和t时刻的状态;P_{ij}为土地利用类型i和j之间的转移概率矩阵;P_{ij}的计算公式[28]如下:

$$P_{ij} = \frac{A_{ij}}{\sum_{j=1}^{n} A_{ij}} \times 100\% \tag{2}$$

式中:A_{ij}为土地利用类型i转化为j的面积或比例;n为土地利用类型的数量。

CA模型是一个时间、空间和状态均离散的复杂动态模型。该模型的基本要素主要包括元胞空间和元胞大小、状态集合、状态转换规则和邻域范围等。CA模型可以用以下公式[28]表示:

$$S_{t+1} = f(S_t, N) \tag{3}$$

式中:N是元胞场;f是空间内元胞状态的转化规则。

CA-Markov模型融合了Markov模型的理论和CA模型的理论,是基于简单决策规则模拟复杂空间过程的有效工具,可以更好地模拟土地利用的数量和空间变化。

土地利用情景模拟过程可在美国克拉克大学开发的IDRISI Selva V.17软件中进行。首先通过辽宁省1990年和2000年的土地利用数据,计算1990—2000年土地利用类型的转移概率矩阵,模拟辽宁省2020年的土地利用情景。然后,将模拟的2020年土地利用情景与解译的2020年土地利用数据进行比较,采用FOM方法验证CA-Markov模型的精度。最后,模拟预测辽宁省2050年的土地利用情景。由于土地利用变化受多种自然和人文因素的影响,因此在进行CA-Markov模拟过程时,采用多标准评价(Multi-Criteria Evaluation,MCE)方法,将9种驱动因子(高程、坡度、坡向、距高速公路距离、距铁路距离、人口密度、GDP、距城市距离、距乡村距离)组合在一起,生成适宜性图集。两次模拟过程分别应用2000年人口密度和GDP数据,以及2020年人口密度和GDP数据。此外,分别将2000和2020年水域的空间分布作为两次土地利用模拟的限制因子。土地利用情景模拟的流程如图2所示。

在模拟2050年辽宁省的土地利用情景之后,分析2020—2050年的土地利用类型的转移概率矩阵,探讨各土地利用类型的相互转化特征。

2.2 CA-Markov模型精度验证

本研究采用FOM方法对CA-Markov模型进行精度验证。首先,将2000年和2020年解译的土地利用图叠加得到参考土地利用变化图。然后,将2000年解译的土地利用图和2020年模拟的土地利用情景叠加得到模拟土地利用变化图。最后,通过比较两种土地利用变化图,计算5个指标,包括未命中(M)、命中(H)、错误命中(W)、空成功(N)和错误警报(F)。M表示模拟的地类不变但实际却变化所引起的误差的面积比例;H为模拟的地类变化且模拟正确的面积比例;W表示模拟的地类虽变化但模拟错误的面积比例;N表示模拟的地类不变且实际也不变的面积比例;F表示模拟的地类变化但实际未变所引起的误差所占的面积比例[29-30]。基于以上5种指标,进一步计算参考变化(RC)、模拟变化(SC)、数量误差(EQ)、空间分配误差(EA)、总误差(TE)、模型优值(FOM)等一系列验证指标。公式如下:

$$M + H + F + W + N = 100\% \tag{4}$$

$$RC = M + H \tag{5}$$

$$SC = H + F \tag{6}$$

$$EQ = |SC - RC| = |F - M| \tag{7}$$

$$EA = 2 \times \mathrm{Min}(F, M) \tag{8}$$

$$TE = EQ + EA \tag{9}$$

$$FOM = \frac{H}{H + W + M + F} \times 100\% \tag{10}$$

式中:EQ是指模型在数量上模拟不精确所引起的误差;EA是由于空间分配导致的误差;FOM的范围为0到100%,0表示参考变化和模拟变化完全无重叠,100%表示参考变化和模拟变化完全重叠。

只凭FOM指标无法详细说明“未命中”“命中”“错误命中”“空成功”以及“错误警报”,即无法得知参考及模拟变化图的不一致性更多地来自数量还是空间误差,因此其他指标的计算也不容忽视。本研究通

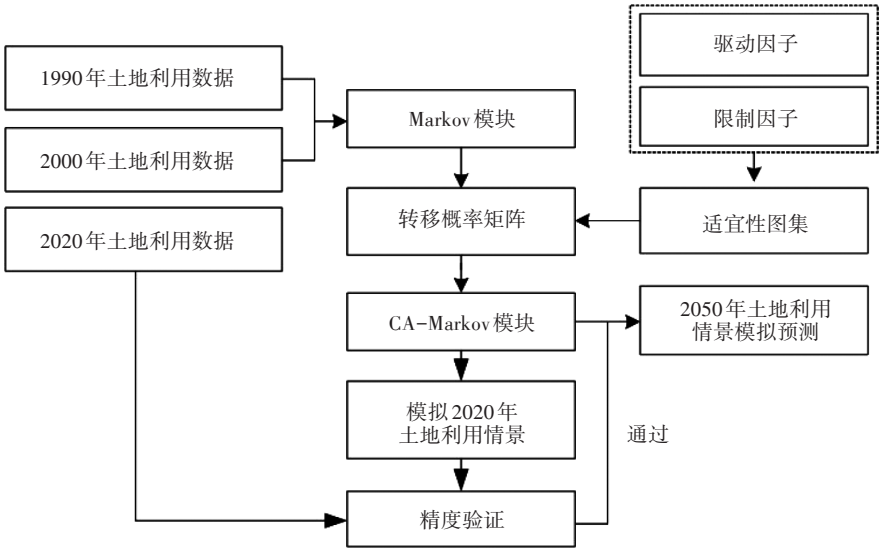


图2 土地利用情景模拟流程图

Figure 2 Flowchart of land use scenario simulation

过叠加2000—2020年辽宁省参考和模拟的土地利用变化图，分别计算*H*、*W*、*M*、*F*、*N*、*RC*、*SC*、*EQ*、*EA*、*TE*、*FOM*，以验证CA-Markov模型的精度。

2.3 玉米生产潜力预测及生产潜力变化分析

农业生态区划（Agro-ecological Zones，AEZ）模型最初由联合国粮农组织（Food and Agriculture Organization，FAO）和国际应用系统研究所（International Institute for Applied Systems Analysis，IIASA）共同开发，目前已发展为全球农业生态区划（GAEZ）模型，被广泛应用于粮食生产潜力预测中[31]。GAEZ模型是一种简单、可靠的作物模型，提供了标准化的作物参数和环境匹配程序。与此同时，GAEZ模型将人为的投入与管理水平分为三个等级，即高投入和管理水平（施肥、除草及机械化水平等达到最佳）、中等投入和管理水平（中等水平的施肥、除草及机械化程度等）以及低投入和管理水平（几乎无施肥、除草和机械化应用等）。不同等级对应不同的收获指数与叶面积指数数值，一般情况下，均会在假定的高投入和管理水平下，根据光合、光温、气候生产潜力和土地生产潜力计算作物生产潜力。耕地的灌溉条件对作物生产潜力也具有较大影响，因此在具体计算时，首先假设全部旱地均为灌溉旱地的作物生产潜力，然后假设全部旱地均为雨养旱地的作物生产潜力，最终通过灌溉耕地的面积百分比数据，获得作物生产潜力。而对于水田而言全部为灌溉耕地，因此只需计算灌溉条件下的作物生产潜力即可。以往研究已详细描述了GAEZ模型的计算过程[32-35]。

本研究首先从模拟2050年辽宁省的土地利用情景中提取出旱地的空间分布，然后利用GAEZ模型对2050年模拟的旱地情景下玉米生产潜力进行预测。虽然气候因素、灌溉面积百分比等因素也是影响玉米生产潜力的重要因素，但由于本研究仅预测未来土地利用变化对玉米生产潜力的影响，因而采用“控制变量”的方法，将气候、土壤、地形和灌溉面积百分比维持2020年的状态不变。

在模型精度模拟方面，以往的研究[32-35]通过建立GAEZ模型模拟的粮食生产潜力与实际产量之间的回归关系，验证了GAEZ模型的准确性，且回归方程的决定系数均大于0.75，表明GAEZ模型具有较好的模拟粮食生产潜力的能力。

最后，分析2020—2050年辽宁省玉米生产潜力的数量和空间变化特征，并以地级市为单位分析玉米潜在总产量和潜在单产的变化。

3 结果与分析

3.1 CA-Markov模型精度验证

利用CA-Markov模型模拟了辽宁省2020年的土

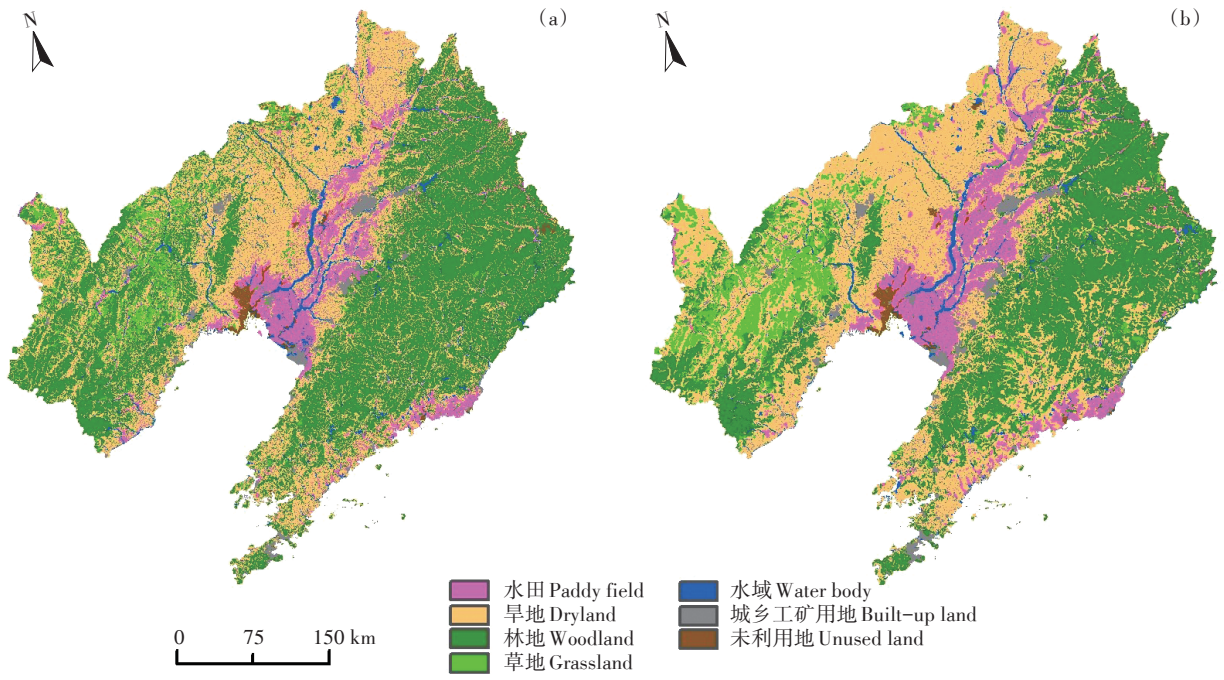


图3 2020年辽宁省模拟的土地利用情景（a）和解译的土地利用图（b）

Figure 3 Simulated land use scenario(a) and interpreted land use map(b) in Liaoning Province in 2020

地利用情景,图3为模拟的2020年土地利用情景及解译的土地利用图。将2000—2020年参考和模拟的土地利用变化图进行叠加,采用FOM方法计算各种指标。*H*、*W*、*M*、*F*和*N*分别为35.45%、7.84%、20.15%、1.64%和34.92%,因此*RC*、*SC*、*EQ*、*EA*和*TE*分别为55.60%、37.09%、18.51%、3.28%和21.79%,*FOM*为54.47%(图4),说明CA-Markov模型的模拟精度尚可。另外,由于*EQ*大于*EA*,表明通过CA-Markov模型模拟的2020年土地利用图与解释的土地利用图的不一致性更多来自数量误差,即Markov算法,而非空间分配误差,即CA模型。

3.2 2020—2050年辽宁省土地利用变化

本研究模拟了2050年辽宁省的土地利用情景,并将其与2020年的土地利用数据进行叠加,预测了2020—2050年各土地利用类型的面积变化(表1)。2020年和2050年,辽宁省的土地利用类型均以林地和旱地为主,分别约占土地总面积的40%和35%。未利用地的面积较小,仅占约1%。

预测结果显示,2020—2050年辽宁省城乡工矿用地的面积和比例分别增加了55.55万hm²和3.84个百分点,旱地和林地面积分别减少了29.78万hm²和25.05万hm²。此外,水田和草地的面积也明显减少,表明未来30年辽宁省土地利用很可能以城乡工矿用地的大幅扩张为主,但同时可能伴随着毁林毁草及优质耕地被占用。

图5为2020—2050年辽宁省各土地利用类型的转移概率矩阵热度图。虽然2020—2050年主要以其他地类向旱地转化以及水田和旱地向城乡工矿用地转化为主,但2020年旱地面积较大,旱地流失的比例

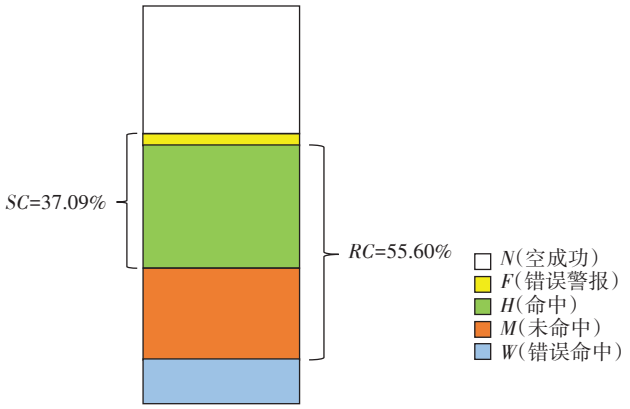
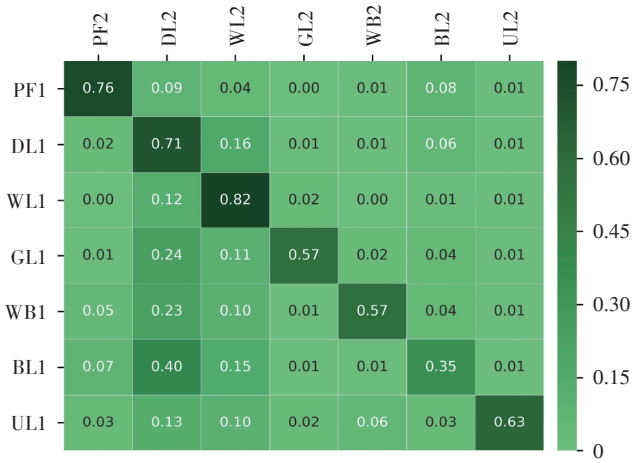


图4 基于FOM方法的2000—2020土地利用变化模拟各指标值

Figure 4 Index values of simulation of land use changes during 2000—2020 based on FOM method



坐标轴中PF代表水田;DL代表旱地;WL代表林地;GL代表草地;WB代表水域;BL代表城乡工矿用地;UL代表未利用地。
数字1代表2020年,2代表2050年
PF is paddy field; DL is dryland; WL is woodland; GL is grassland; WB is water body; BL is built-up land; UL is unused land.
The number 1 represents 2020, and 2 represents 2050

图5 2020—2050年辽宁省各土地利用类型的转移概率矩阵

Figure 5 Transition probability matrix of land use types in Liaoning Province from 2020 to 2050

表1 2020—2050年各土地利用类型的面积及比例变化

Table 1 Area and area proportion changes of various land use types from 2020 to 2050

土地利用类型 Land use type	2020		2050		面积变化/万hm² Change of area /10⁴hm²	面积比例变化/百分点 Change of proportion/ Percent point
	面积/万hm² Area/10⁴hm²	面积比例 Proportion/%	面积/万hm² Area/10⁴hm²	面积比例 Proportion/%		
水田	94.25	6.52	86.78	6.00	−7.47	−0.52
旱地	527.41	36.49	502.36	34.76	−25.05	−1.73
林地	614.44	42.52	584.66	40.46	−29.78	−2.06
草地	46.82	3.24	41.10	2.84	−5.72	−0.40
水域	42.27	2.92	51.62	3.57	9.35	0.65
城乡工矿用地	106.38	7.36	161.93	11.20	55.55	3.84
未利用地	13.63	0.94	16.75	1.16	3.12	0.22

高达29%，因此旱地的面积仍有所减少。未来几十年，辽宁省应制定更多的生态环境保护政策，以防过度毁林毁草现象的发生。此外，经济发展和城市化进程的加快也会导致建设用地的不断扩张，耕地资源保护工作仍然十分紧迫。

3.3 2050年玉米生产潜力预测

利用GAEZ模型以及2.2.2节中提到的7种气候变量、DEM、土壤、灌溉面积百分比数据，将旱地空间分布数据从2050年模拟的土地利用图中提取出来，预测了2050年辽宁省的玉米生产潜力，得到2050年辽宁省玉米平均潜在单产的空间分布（图6）。在整个研究区，玉米的潜在总产量为393.38万t。由于辽宁省的玉米熟制为一年一熟，2050年玉米播种面积即为模拟的2050年旱地面积，为502.36万hm^2，因此玉米的平均潜在单产为7 830.56 $kg·hm^{-2}$。从玉米平均潜在单产的空间分布来看，辽宁省北部和南部地区在8 000 $kg·hm^{-2}$以上，部分地区甚至超过10 000 $kg·hm^{-2}$。而在西部和东部部分地区，平均潜在单产在4 000 $kg·hm^{-2}$以下。由于玉米平均潜在单产与气候及土壤条件息息相关，因此，北部和南部地区玉米平均潜在单产较高主要由于地势起伏度相对较低，土壤保水固肥能力较强，且降雨量及光照等气候条件均较为充足。而西部和东部地区主要由于地形条件的限制，且西部地区受降雨量严重不足影响，玉米平均潜在单产过低。

进一步以地级市为单位进行分析，由图7可以得知，辽宁省14个地级市中，2050年的玉米潜在总产量在450万t以上的市有3个，位于北部和南部地区，分别为铁岭市、沈阳市和大连市，其中铁岭市超过600万t（图7a）。潜在总产量为300万~450万t的市有4个，多位于西部地区。而一半数量的市潜在总产量低

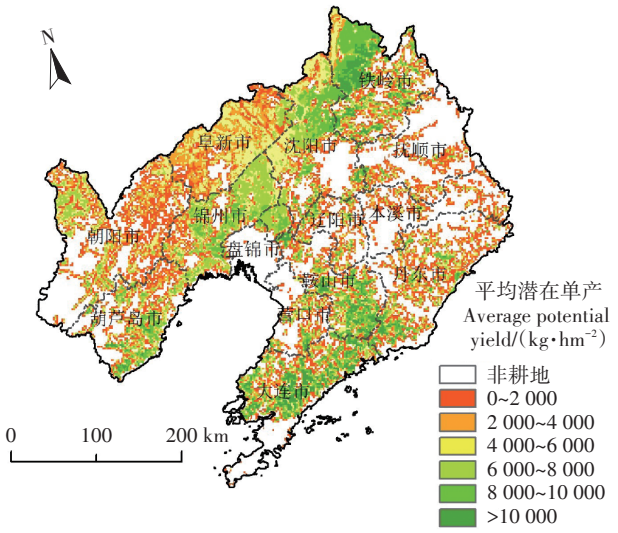


图6 2050年辽宁省玉米平均潜在单产的空间分布

Figure 6 Spatial distribution of maize average potential yields in Liaoning Province in 2050

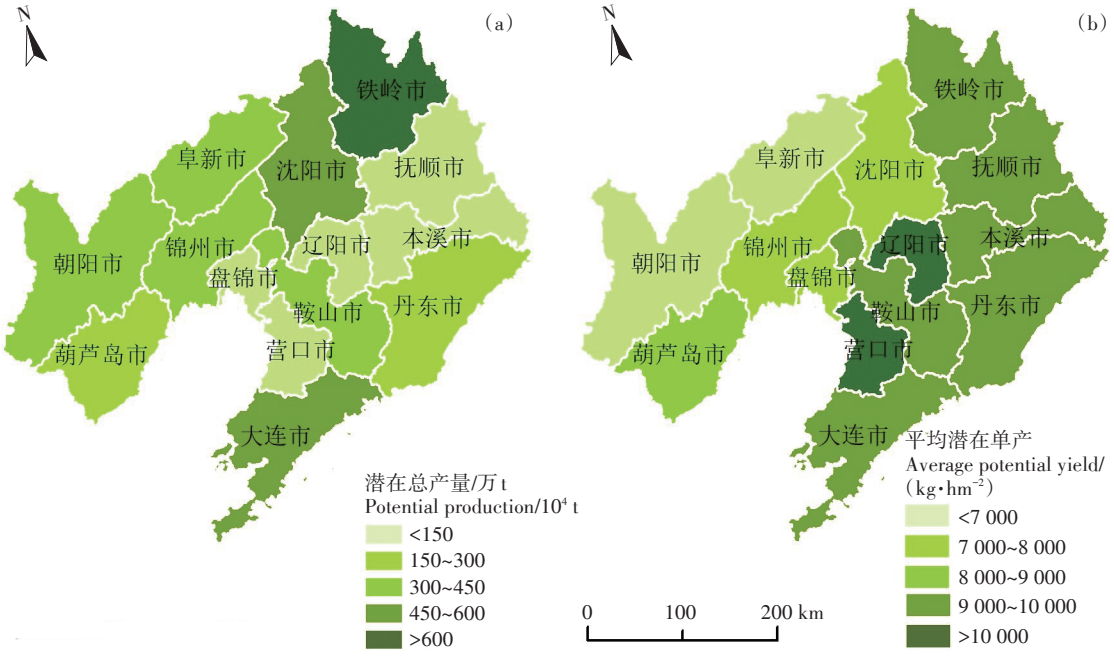


图7 2050年辽宁省各地级市玉米潜在总产量（a）和平均潜在单产（b）

Figure 7 Maize potential production(a) and average potential yields(b) in prefecture-level cities of Liaoning in 2050

于300万t,且多分布在东部地区。这主要是由于北部和南部地区相对东西部地区拥有较为丰富的旱地资源,因此玉米潜在总产量较高,特别是北部地区地势较为平坦,土壤保水固肥能力较强,因此潜在总产量相对更高。而东部地区各市旱地资源相对匮乏,玉米潜在总产量相对较低。

各市玉米平均潜在单产的高低分布与总产量并不相同(图7b)。2050年玉米平均潜在单产在9 000 kg·hm^{-2}以上的市共有8个,主要分布在东部和南部地区,其中辽阳市和营口市的平均潜在单产甚至高于10 000 kg·hm^{-2}。葫芦岛市为8 000~9 000 kg·hm^{-2}。中西部地区的玉米平均潜在单产低于8 000 kg·hm^{-2},其中朝阳市和阜新市低于7 000 kg·hm^{-2}。

3.4 未来30年玉米生产潜力变化

将2020年和2050年辽宁省玉米潜在单产的空间分布进行叠加,得到2020—2050年辽宁省玉米平均潜在单产空间变化(图8)。在耕地变化的影响下,未来30年辽宁省玉米生产潜力的变化十分显著,玉米潜在总产量和平均潜在单产均呈下降趋势,分别减少630.52万t和679.57 kg·hm^{-2}。

从空间上看,虽然整个辽宁省的玉米潜在总产量和平均潜在单产均有所下降,但大约近一半旱地的平均潜在单产仍有所增加,且主要分布在西北和东南部地区。在东南部地区,玉米平均潜在单产甚至增加4 000 kg·hm^{-2}以上。在近1/3的旱地中,玉米平均潜在单产减少不足2 000 kg·hm^{-2},广泛分布在东北部和西南部地区。辽宁省的中部、南部小部分地区及西南部小范围的旱地内,玉米平均潜在单产的减少量超过4 000 kg·hm^{-2}。

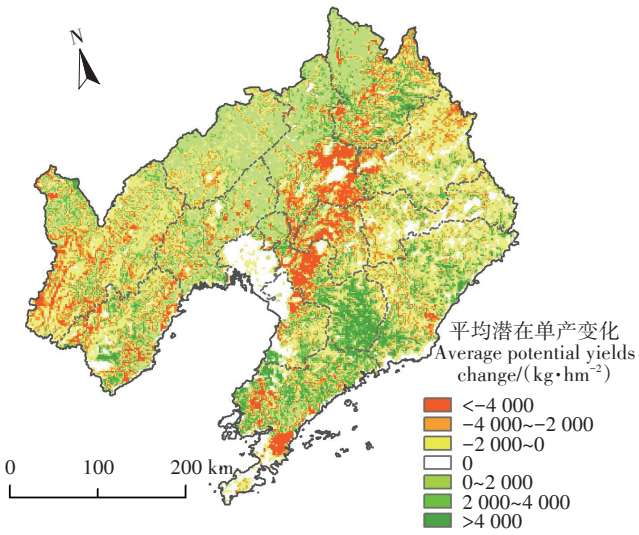


图8 2020—2050年辽宁省玉米平均潜在单产的空间变化

Figure 8 Spatial changes of maize average potential yields in Liaoning Province from 2020 to 2050

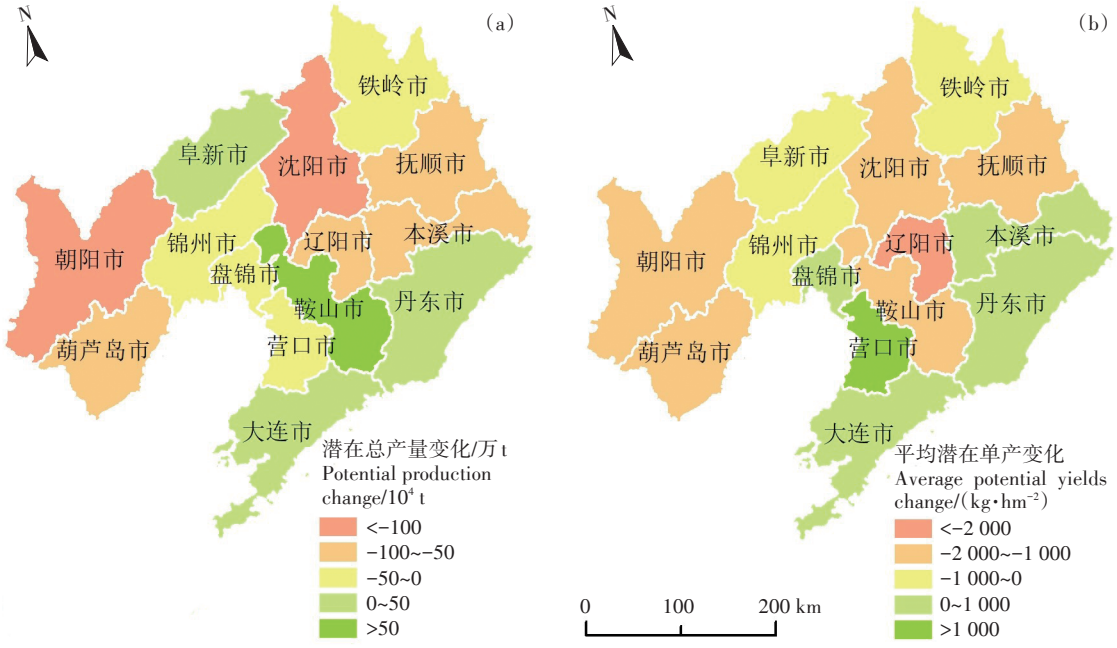


图9 2020—2050年各地级市玉米潜在总产量变化(a)和平均潜在单产变化(b)

Figure 9 Maize potential production change(a) and average potential yields change(b) in prefecture-level cities of Liaoning from 2020 to 2050

图9表示2020—2050年辽宁省14个地级市的玉米潜在总产量和平均潜在单产的变化情况。虽然全省的玉米潜在总产量有所下降，但部分地级市仍有所上升，如东部和南部地区的鞍山市、丹东市和大连市以及西部的阜新市，其中鞍山市的玉米潜在总产量增加超过50万t（图9a）。但在其他10个市内，玉米的潜在总产量均有所减少，且主要分布在辽宁省东北部和西南部地区，其中朝阳市和沈阳市的减少量最大，高达100万t。由于本研究假设2020—2050年的气候和土壤条件维持2020年的状态不变，旱地的变化是玉米潜在总产量变化的唯一原因，因此，2020—2050年玉米潜在总产量的变化主要是因为东北和西南部地区的旱地萎缩以及西部和南部地区的旱地扩张。

玉米平均潜在单产的变化主要是由于2020—2050年各土地利用类型转换过程引起的旱地数量和质量的变化（图9b）。辽宁省只有5个市的玉米平均潜在单产增加，主要分布在东部和南部地区，分别为本溪市、丹东市、盘锦市、营口市和大连市。9个市有所减少，其中阜新市、铁岭市和锦州市的减少量在1 000 kg·hm^{-2}以内，5个市的减少量为1 000~2 000 kg·hm^{-2}，而辽阳市的减少量高于2 000 kg·hm^{-2}。

4 讨论

4.1 FOM方法与*Kappa*系数方法的比较

*Kappa*系数因可以用来检验模拟结果与参考数据的一致性，曾被广泛应用于土地利用变化模拟及遥感影像解译的精度验证。*Kappa*系数的取值范围为[-1，1]。一般而言，当0.75≤*Kappa*≤1时，模拟结果与参考数据的一致性较高；当0.50≤*Kappa*<0.75时，一致性为中等水平；如果*Kappa*<0.5，则一致性较差[18]。

通过比较*Kappa*系数法和FOM方法可以发现，FOM方法更适合验证CA-Markov模型的精度。一方面，CA-Markov模型在模拟土地利用情景时在起始时点会将每个土地利用类型的增益分配在对应斑块周围，模拟得到缠绕性且延长性的斑块，从而使得模拟变化的斑块形状与参考变化的斑块形状不匹配[29]。因此在应用*Kappa*系数法时会导致对空间一致性的错误估计，其试图根据随机性的基线来获得模型精度，可能更适合比较单一土地利用类型的模拟精度，对于检验整幅地图的模拟精度并不适合[30]。而FOM方法通过比较模拟变化图及参考变化图，可十分精确检验模型精度。另一方面，*Kappa*系数方法无法得到模型模拟的误差主要来源于数量误差还是空间分配误差，而FOM方法不仅可以有效评估模拟精度，还可以有效区分数量误差和空间分配误差，实用性更强。

4.2 CA-Markov模型中驱动和限制因素的局限性

由于土地利用变化受多种自然和人文因素的影响，本研究选择包含自然和人文因素的9种驱动因子预测了辽宁省未来的土地利用情景，同时将2020年和2050年水域的空间分布作为限制因子。但这些因子也存在一些局限性：一方面，本研究仅选择了地形、社会经济和距离因素作为驱动因子，未将气候因素作为驱动因子，这是由于一些气候因素，如积温、累积降水量、风速和累积太阳辐射量等，对研究区（辽宁省）土地利用变化的影响尚不明确。另一方面，由于我国颁布禁止占用生态保护用地和破坏“耕地红线”的政策，一些自然保护区和基本农田的空间分布也应被视为限制因子。然而，由于相关数据难以获取，本研究仅将水域的空间分布作为限制因子，因此驱动因子和限制因子选择的不充分可能导致预测结果的不准确。在今后的研究中，应尽可能全面地选择驱动因子和限制因子，从而获得更为精确的土地利用预测结果。

5 结论

（1）2020—2050年辽宁省土地利用以城乡工矿用地的明显扩张（增加55.55万hm^2）以及旱地和林地的急剧减少（分别减少29.78万hm^{2}和25.05万hm^2）为主。各土地利用类型的转化主要表现为其他地类向旱地转化，以及旱地和水田向城乡工矿用地的转化。

（2）2050年辽宁省玉米潜在总产量和平均潜在单产分别为393.38万t和7 830.56 kg·hm^{-2}。辽宁省北部和南部地区玉米平均潜在单产大部分在8 000 kg·hm^{-2}以上，远高于西部和东部部分地区。

（3）未来30年，玉米潜在总产量预计减少630.52万t，平均潜在单产预计减少679.57 kg·hm^{-2}。大约近一半旱地的平均潜在单产有所增加，东南部地区甚至增加了4 000 kg·hm^{-2}以上。而在中部、南部小部分地区及西南部小范围的旱地，玉米平均潜在单产的减少量超过4 000 kg·hm^{-2}。

未来几十年，辽宁省应制定更多的生态环境保护政策，防止过度毁林毁草现象的发生。此外，经济发展和城市化进程的加快不应以牺牲优质耕地为代价，因此耕地保护工作仍然十分紧迫，而保证耕地资源的数量和质量是农作物生产的重要基础。因此，在保证耕地数量的前提下，通过施加有机肥和生物肥、

退耕还林、加强水土保持等措施提高耕地质量将是当务之急。

参考文献:

[1] 赵育恒. 中国耕地利用时空变化及其对粮食生产能力的影响[D]. 杭州:浙江大学, 2020. ZHAO Y H. Spatio-temporal change of cultivated land use in China and its impact on grain production capacity[D]. Hangzhou:Zhejiang University, 2020.

[2] 潘佩佩, 杨桂山, 苏伟忠. 土地利用变化对土地生产力的影响研究进展[J]. 地理科学进展, 2012, 31(5):539-550. PAN P P, YANG G S, SU W Z. Progress on effects of land use change on land productivity [J]. *Progress in Geography*, 2012, 31(5):539-550.

[3] 史婧然, 孔祥斌, 相慧. 耕地资源生产潜力研究进展及其启示[J]. 中国农业大学学报, 2013, 18(3):198-202. SHI J R, KONG X B, XIANG H. Progress and enlightenment on potential productivity of China′s arable land[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2013, 18(3):198-202.

[4] SONG W, PIJANOWSKI B. The effects of China′s cultivated land balance program on potential land productivity at a national scale[J]. *Applied Geography*, 2014(46):158-170.

[5] VERBURG P H, SCHOT P P, DIJST M J, et al. Land use change modelling: Current practice and research priorities[J]. *GeoJournal*, 2004, 61(4):309-324.

[6] 吴琼, 王如松, 李宏卿, 等. 土地利用/景观生态学研究中的马尔可夫链统计性质分析[J]. 应用生态学报, 2006(3):3434-3437. WU Q, WANG R S, LI H Q, et al. Statistical properties of Markov chain in land use and land scape study[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006(3):3434-3437.

[7] ABDELKADER A, SAAD A, ABDULLA A, et al. Land use change at the historical tourist attractions of Umm Qais, Jordan:GIS and Markov chain analyses[J]. *International Journal of Historical Archaeology*, 2019, 23:235-259.

[8] GOBIN A, CAMPLING P, FEYEN J. Logistic modelling to derive agricultural land use determinants:A case study from southeastern Nigeria [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2002, 89:213-228.

[9] WANG N H, BROWN D G, AN L, et al. Comparative performance of logistic regression and survival analysis for detecting spatial predictors of land-use change[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2013, 27(10):1960-1982.

[10] BATTY M, XIE Y, SUN Z. Modeling urban dynamics through GIS-based cellular automata[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 1999, 23:205-233.

[11] NUNO N, ANTONIO P. Cellular automata and urban studies:A literature survey[J]. *Architecture*, 2007, 1:368-399.

[12] HAN H, YANG C, SONG J. Scenario simulation and the prediction of land use and land cover change in Beijing, China[J]. *Sustainability*, 2015, 7:4260-4279.

[13] MONDAL M, SHARMA N, GARG P, et al. Statistical independence test and validation of CA-Markov land use land cover(LULC) prediction results[J]. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 2016, 19:259-272.

[14] 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. LI G Z. Land use change and simulation in Shenzhen based on FLUS model[D]. Wuhan:Wuhan University, 2018.

[15] 苏艳琴, 赖日文, 罗文玮, 等. 基于LCM模型的晋江市土地利用变化与预测分析[J]. 林业资源管理, 2018(1):96-102. SU Y Q, LAI R W, LUO W W, et al. Analysis and prediction of land use changes in Jinjiang City based on LCM model[J]. *Forest Resources Management*, 2018(1):96-102.

[16] HAMAD R, BALZTER H, KOLO K. Predicting land use/land cover changes using a CA-Markov model under two different scenarios[J]. *Sustainability*, 2018, 10:3421.

[17] PONTIUS J R G, MILLONES M. Death to Kappa:Birth of quantity disagreement and allocation disagreement for accuracy assessment[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 32(15):4407-4429.

[18] 张俊平, 李净. 基于CA-Markov模型的甘州区土地利用变化预测分析[J]. 中国农学通报, 2017, 33(4):105-110. ZHANG J P, LI J. Prediction and analysis of land use change based on CA-Markov model in Ganzhou District[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(4):105-110.

[19] 王丽蓉, 王利, 刘万波, 等. 基于CA-Markov模型的大连开发区土地利用动态变化[J]. 资源开发与市场, 2019, 35(11):1347-1350. WANG L R, WANG L, LIU W B, et al. Dynamic change of land use in Dalian development zone based on CA-Markov model[J]. *Resource Development & Market*, 2019, 35(11):1347-1350.

[20] HAO C, PONTIUS J R G. Diagnostic tools to evaluate a spatial land change projection along a gradient of an explanatory variable[J]. *Landscape Ecology*, 2010, 25(9):1319-1331.

[21] HAO C, PONTIUS J R G. Sensitivity of a land change model to pixel resolution and precision of the independent variable[J]. *Environmental Modeling & Assessment*, 2011, 16(1):37-52.

[22] CURRIE P J, CHEN P J. Anatomy of *Sinosauropteryx prima* from Liaoning, northeastern China[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 2001, 38(12):1705-1727.

[23] HU Y, MENG J, LI C, et al. New basal eutherian mammal from the Early Cretaceous Jehol biota, Liaoning, China[J]. *Proceedings of the Biological Sciences*, 2010, 277(1679):229-236.

[24] LIU J, LIU M, DENG X, et al. The land use and land cover change database and its relative studies in China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2002, 12(3):275-282.

[25] LIU J, LIU M, TIAN H, et al. Spatial and temporal patterns of China′s cropland during 1990—2000:An analysis based on Landsat TM data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 98(4):442-456.

[26] EASTMAN J R. Guide to GIS and image processing[M]. Worcester:Clark Labs, 1999:7.

[27] 姜广辉, 张凤荣, 孔祥斌. 北京山区农村居民点整理用地转换方向模拟[J]. 农业工程学报, 2009, 25(2):214-221. JIANG G H, ZHANG F R, KONG X B. Determining conversion direction of the rural residential land consolidation in Beijing mountainous areas[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009,

25(2):214-221.

[28] 侯西勇, 常斌, 于信芳. 基于CA-Markov的河西走廊土地利用变化研究[J]. 农业工程学报, 2004(5):286-291. HOU X Y, CHANG B, YU X F. Land use change in Hexi corridor based on CA-Markov methods[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2004(5):286-291.

[29] VARGA O G, PONTIUS R G, SINGH S K, et al. Intensity analysis and the Figure of Merit′s components for assessment of a Cellular automata-Markov simulation model[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 101:933-942.

[30] 杨园园. 吉林省镇赉县历史时期土地利用空间重建研究[D]. 长春:吉林大学, 2015. YANG Y Y. Study on spatial reconstruction of historical land use in Zhenlai County, Jilin Province, China[D]. Changchun:Jilin University, 2015.

[31] FISCHER G, SHAH M, VAN VELTHUIZEN H, et al. Global agro-ecological zones assessment[M]//VER HEYE W H. Land use, land cover and soil science. Oxford:UNESCO-EOLSS Publishers, 2000.

[32] LIU L, XU X L, LIU J Y, et al. Impact of farmland changes on production potential in China during 1990—2010[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2015, 25:19-34.

[33] PU L M, ZHANG S W, YANG J C, et al. Spatio-temporal dynamics of maize potential yield and yield gaps in northeast China from 1990 to 2015[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(7):1211.

[34] PU L M, ZHANG S W, LI F, et al. Impact of farmland change on soybean production potential in recent 40 years:A case study in western Jilin, China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(7):1522.

[35] LI F, ZHANG S W, XU X L, et al. The response of grain potential productivity to land use change:A case study in western Jilin, China[J]. *Sustainability*, 2015, 7:14729-14744.