

# 基于 PLUS 的耕地驱动因素分析与未来预测

## ——以图们江流域为例

吕晶, 金日, 王镜植, 张鹏, 朱卫红

(延边大学 地理与海洋科学学院, 湿地生态功能与生态安全重点实验室, 吉林 延吉 133000)

**摘要:** [目的] 探究图们江流域耕地时空演化特征及其驱动因素并预测与《吉林省国土空间规划(2021—2035年)》(以下简称《规划》)相关的耕地变化状况, 为图们江流域耕地资源合理规划与利用提供依据和决策支持。[方法] 通过土地利用转移矩阵与重心转移分析其时空演化特征, 耦合马尔可夫模型和 PLUS 模型, 预测不同情景下耕地数量和空间变化。[结果] ①1990 年以来研究区耕地面积呈持续减少趋势但整体处于可控状态, 到 2020 年总量共减少了 440.42 km<sup>2</sup>, 减少的耕地主要转化为林地和建设用地。②耕地的空间分布具有明显的差异性, 主要集中在中下游区域, 并且耕地重心以每年 43.1 m 的速度逐渐向西南偏移。③社会经济因素中的 GDP 值、道路交通和人口等与自然因素中的坡度和降水是影响过去耕地变化的主要驱动因素。④预测结果表明, 两种情景下耕地总量均呈现逐年减少的趋势, 目标导向情景下 2035 年耕地总量比 2020 年将减少 128.57 km<sup>2</sup>, 减少的耕地主要集中在规划的开发区与保护区。[结论] 过去 30 a 随着社会经济的快速发展, 研究区内耕地承载的压力越来越大, 而且当前的状况不利于《规划》目标的实现。为了实现耕地数量、质量与生态三位一体保护与耕地资源的可持续发展, 可以适当开发研究区上游与西部地区的耕地资源, 推动原有农业实现规模化、科技化。此外, 目标导向情景更有利于图们江流域耕地资源的可持续发展, 应当继续实施《规划》目标。

**关键词:** 图们江流域; 耕地变化; PLUS 模型; 驱动因素分析; 未来预测

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)03-0203-10

中图分类号: F323.2, F301.2

**文献参数:** 吕晶, 金日, 王镜植, 等. 基于 PLUS 的耕地驱动因素分析与未来预测[J]. 水土保持通报, 2023, 43(3): 203-212, 224. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20230131.002; Lyu Jing, Jin Ri, Wang Jingzhi, et al. Analysis of driving factors and predictions of arable land area based on PLUS model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(3): 203-212, 224.

## Analysis of Driving Factors and Predictions of Arable Land Area Based on PLUS Model — A Case Study of Tumen River Basin

Lyu Jing, Jin Ri, Wang Jingzhi, Zhang Peng, Zhu Weihong

(Key Laboratory of Wetland Ecological Function and Ecological Security,

School of Geography and Marine Science, Yanbian University, Yanji, Jilin 133000, China)

**Abstract:** [Objective] The spatial and temporal evolutionary characteristics of arable land in the Tumen River basin and the driving factors for changes in arable land area were explored, and changes in arable land area associated with *the Land Spatial Planning of Jilin Province (2021—2035)* were predicted in order to provide a decision support basis for the rational planning and utilization of arable land resources in the Tumen River Basin. [Methods] Spatial and temporal evolution characteristics of arable land were explored through an analysis of a land use shift matrix and a center of gravity shift analysis. Markov and PLUS models were coupled to predict the quantity and spatial changes of cultivated land area under different scenarios. [Results] ① The total area of arable land has been decreasing continuously since 1990, but the overall situation was

收稿日期: 2022-05-09

修回日期: 2022-09-28

资助项目: 国家自然科学基金重点项目“图们江流域湿地退化及其环境效应模拟研究”(41830643); 吉林省教育厅科学研究项目(JJKH20210567KJ); 延边大学科技发展计划(延大科合字(2019)第 2 号)

第一作者: 吕晶(1996—), 男(汉族), 甘肃省定西市人, 硕士研究生, 研究方向为湿地遥感。Email: 1910282369@qq.com。

通信作者: 朱卫红(1972—), 女(朝鲜族), 吉林省延吉市人, 博士, 教授, 主要从事湿地生态学研究。Email: whzhu@ybu.edu.cn。

under control. The total area had decreased by 440.42 km<sup>2</sup> by 2020, with arable land having been mainly transformed into forest land and construction land. ② There were obvious differences in the spatial distribution of arable land, with arable land concentrated in the middle and lower reaches of the river basin. The center of gravity of arable land gradually shifted to the southwest at a rate of 43.1 m per year. ③ Socioeconomic factors (GDP, road traffic, population) and natural factors (slope, precipitation) were the main drivers influencing arable land changes in the past. ④ The total amount of arable land for both scenarios decreased over time. The total area of arable land in 2035 in the goal-oriented scenario will be 128.57 km<sup>2</sup> less than in 2020. The reduction in arable land will be concentrated mainly in the planned development zones and protected areas. [Conclusion] Pressures on arable land in the study area have increased because of rapid socioeconomic development over the past 30 years, and the current trends are not conducive to achieving the land spatial planning goals. In order to protect arable land quantity, quality, and ecology, and to sustainably develop arable land resources, those resources in the upstream and western areas of the study area must be developed appropriately so that the scale and technology of original agriculture can be promoted. Additionally, goal-oriented scenarios are more conducive to the sustainable development of arable land resources in the Tumen River basin, and land spatial planning goals should continue to be implemented.

**Keywords:** Tumen River basin; arable land changes; PLUS model; driving factors analysis; future prediction

随着人类对土地的开发与利用速度加快,使得全球土地利用/覆被变化(LUCC)发生了极大的变化,同时伴随着社会发展而导致土地退化、生态环境恶化、资源短缺等问题已经成为了全球范围内的一个综合性的问题<sup>[1]</sup>。LUCC是自然以及社会经济等在多种时间和空间尺度上综合作用的结果<sup>[2]</sup>,通过对LUCC进行研究,不仅能够深入了解土地利用内部的变化原因与机制,同时还可以通过调整人类对土地の利用方式,促使更加合理地利用土地<sup>[3]</sup>。中国人口众多,土地资源特别是耕地资源相对较少,用仅占世界7%的耕地养活了占世界总人口22%的中国人<sup>[4-6]</sup>,在全国国土规划纲要(2016—2030年)中提出了中国面临的国土资源紧张不断加剧与生态环境压力加大的现状,指出土地开发质量有待提高、土地空间发展格局需要优化<sup>[7]</sup>。因此,探究从过去到未来的LUCC变化动态,对于维持和整合生态系统与可持续发展至关重要。

目前国外对LUCC的研究具有较强的地域性和综合性<sup>[3]</sup>,区域和全球模拟是目前LUCC研究领域中的重点关注内容,即基于土地利用数据,采用各种技术手段对该区域LUCC有影响的各方面因素(自然、社会经济与政策因素)进行综合分析,对该区域未来的土地利用空间格局推演和预测<sup>[8-10]</sup>。国内关于LUCC的研究内容主要包括驱动力研究和区域模型模拟研究两个方面,驱动力研究可以进一步揭示LUCC变化的内部机制和原因。区域LUCC由空间结构的量变和演化组成,所选择的模型必须同时具有量化预测和空间模拟能力<sup>[11]</sup>,现有的定量预测模型

包括单变量灰色模型<sup>[12]</sup>、系统动力学模型<sup>[13]</sup>、逻辑回归模型<sup>[14]</sup>、马尔可夫模型<sup>[15]</sup>和神经网络模型<sup>[16]</sup>。马尔可夫模型基于马尔可夫链理论<sup>[17]</sup>描述随机过程,被广泛用于土地利用模拟预测,但是这些模型挖掘LUCC的潜在驱动因素和使用多种补丁类型的能力较弱<sup>[9]</sup>。斑块生成土地利用变化模拟模型(PLUS)作为新型土地利用模拟模型,相较于目前这些模型模拟精度更为准确<sup>[10]</sup>。PLUS保留了之前未来土地利用模拟的优势模型自适应惯性竞争和轮盘竞争机制,同时进一步完善挖掘空间转换规则,从而更准确地模拟土地利用的空间分布格局<sup>[6]</sup>,因此其结果可以更好地支持规划政策以实现可持续发展。国内外学者利用PLUS对LUCC的研究已经做了不少的研究工作,但针对单独模拟预测耕地的研究还不是很多,且对大比例尺小范围区域的研究相对较少,使得耕地空间格局模拟研究的精度不足,因此不能很好地反映耕地变化的微观动态特征<sup>[3]</sup>。除此之外,中国当前大多土地利用空间格局模拟研究主要集中在东部地区,对东北边疆地区流域尺度的研究相对较少,因此通过构建合理的模型来研究东北边疆地区流域尺度的耕地空间格局有一定的必要性。

图们江流域地处中、朝、俄三国交界地带,是“一带一路”倡议支撑区,东北亚核心腹地,是“东北虎豹国家公园”核心区,也是珍稀濒危鸟类重要栖息地,具有重要的生态意义。流域处于《吉林省国土空间规划(2021—2035年)》(以下简称《规划》)构建“一圈,两屏,三区,四轴带”中的东部山地特色农业片区与东部森林带,承担着粮食生产和生态屏障两大重任,是国家农业生产与生态安全屏障的重要组成部分。但是,

以往对图们江流域耕地方面的研究多集中在一些微观耕地因素和单纯的时空分析与驱动力探究<sup>[18-21]</sup>,还没有关于在《规划》影响下耕地未来空间格局的研究。本文分析了 1995—2020 年图们江流域耕地的时空演变趋势及其驱动因素,耦合马尔可夫量预测模型和 PLUS 模型并依据《规划》设置了自然发展情景(S<sub>1</sub>)和目标导向情景(S<sub>2</sub>)来预测未来 25 a 的图们江流域耕地演变趋势,为图们江流域耕地资源合理规划与利用提供依据和决策支持。

## 1 研究区概况

图们江发源于长白山山脉主峰,干流全长 525 km,总落差 1 297 m。流域面积约为 22 860 km<sup>2</sup>,占吉林省总面积的 11.9%,地处吉林省东部边界地区<sup>[17]</sup>。地处北纬 41°59′47″—44°30′42″,东经 127°27′43″—131°18′33″之间。流域内水系发达,根据区域地貌与河流水情特点,将图们江划分为上中下游(包括 11 个次级流域)。在该区域设立了 5 个国家级自然保护区,8 个省级自然保护区,还分布着东北虎、丹顶鹤等世界濒危物种,是中国重要的生态功能区,也是国家公园体制试点区,是东北亚生态网络中的核心区域。流域内森林覆盖面积高达全州森林面积的 80.8%,是最主要的土地利用类型,其次是耕地。该区域农业较为发达,最早朝鲜族移民在此开垦耕地,有着鲜明的民族特色<sup>[18]</sup>。流域横跨《规划》中的东部山地特色农业片区与东部森林带,承担着粮食生产和生态屏障两大重任,农业生产有较好的开发潜力。本文所研究的区域为图们江流域的中国一侧,属延边州管辖范围。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

本研究中使用的土地利用数据来自武汉大学杨杰等公开的土地利用栅格数据集产品<sup>[22]</sup>,数据空间分辨率为 30 m,所有土地利用类型的检测精度大于 94.3%。驱动因素分为社会经济因素和自然因素,城市道路分为一级、二级、三级与四级 4 个等级,主干道包括了国道,高速,省道,县道等,共选取了 5 个社会经济指标和 6 个气候与环境指标(表 1)。通过 ArcGIS 软件中的距离分析工具获得各项距离因素。

### 2.2 研究方法

(1) 土地利用转移矩阵。土地利用转移矩阵是马尔科夫模型在 LUCC 方面的应用,马尔科夫模型不仅可以定量地表明不同土地利用类型之间的转化情况,还可以揭示不同土地利用类型间的转移速率<sup>[22-23]</sup>。利

用土地利用转移矩阵可以反映出耕地的时空演化过程,同时可以对耕地转移情况进行定量化分析。

表 1 耕地变化驱动因素指标  
Table 1 Drivers of arable land change

类别	描述	年份
社会经济因素	人口密度	1995—2020
	GDP 值	1995—2015
	距城市道路、主干道、乡道、铁路距离	1995—2020
	距政府的距离	2020
	距高铁、火车站的距离	2020
自然因素	土壤	1995—2020
	高程、坡度	2020
	水域、河流	2020
	距水域距离	2020
	年平均温度	2000—2020
	年平均降水	2000—2020

(2) 重心转移分析。分析耕地面积重心变化是研究耕地间变化的一个主要的方面,引用人口地理学中常用的人口重心的计算方法来计算耕地面积重心<sup>[24]</sup>。通过研究研究区内耕地分布重心问题可以得到 1995—2020 年期间研究区内耕地在空间布局上的变化规律,重心转移方向、转移距离可采用重心坐标的变化来表达,重心坐标的计算公式为。

$$X_t = \frac{\sum(C_{ii} \times x_i)}{\sum C_{ii}} Y_t = \frac{\sum(C_{ii} \times y_i)}{\sum C_{ii}} \quad (1)$$

式中: $X_t, Y_t$  分别表示第  $t$  年耕地重心的经纬度坐标; $C_{ii}$  表示第  $t$  年第  $i$  个市耕地的面积; $x_i, y_i$  分别表示第  $i$  个市所在的经纬度坐标。

(3) 驱动因素的选取。驱动因素对土地利用变化起着至关重要的作用,因此,驱动因素的选取直接关系到模型对研究区的土地利用空间格局模拟的精度大小。依据其数据的可获取性、可定量性、时间和空间上的一致性以及考虑到经济、城市发展、政策、法律等因素的影响,选取驱动因素时应当考虑到驱动因子的全面性和综合性<sup>[3]</sup>。本文基于大量关于 PLUS 模型相关研究与前人关于图们江流域土地利用状况的研究,总共选取了 11 个对 LUCC 影响较大的驱动因素(表 1),根据这些驱动因素自身的特点,将其分为自然驱动因素和社会经济驱动因素。通过参考相关文献,可得所选取的驱动因素对土地利用变化的影响较为显著。

(4) 模型验证。Cohen 的 kappa 系数常常用于验证数据一致性<sup>[25]</sup>,kappa 系数是统计学中度量一致性的指标,值在[-1,1]对于评分系统,一致性就是不同打分人平均的一致性;对于分类问题,一致性就是

模型预测结果和实际分类结果是否一致。kappa 系数的计算是基于混淆矩阵,取值为-1 到 1 之间,通常大于 0。kappa 系数在一致性验证方面存在一定的局限性<sup>[10]</sup>,因此 PLUS 提供了 FoM (figure of merit)。利用 FoM 与 kappa 系数来一起表征 LUCC 模型的准确性是由 Pontius 等<sup>[26]</sup>人提出,FoM 是一个反映单位水平一致性和模式水平相似性的指标。

其计算公式如下:

$$\text{FoM} = B / (A + B + C + D) \quad (2)$$

误差的面积由于观察到变化预测持久性,B 是正确的区域由于观察变化预测变化,C 是错误的面积由于观察变化预测为错误获得类别,和 D 的误差由于观察持久性预测变化。FoM 优于常用的评价模拟变化<sup>[8]</sup>精度的 kappa 系数。

(5) PLUS 模型。是由中国地质大学 HMSCIL

@CUG 实验室开发的土地利用模拟模型<sup>[10]</sup>,可以灵活处理多种类型的土地利用斑块变化,可用于斑块尺度土地利用变化模拟<sup>[9]</sup>。本研究将随机种子的概率被确定为 0.01,以模拟未来类型的土地利用斑块,利用土地利用转移矩阵设置土地流转参数(表 2)。由于驱动因子同土地利用变化间关系的复杂性使得各用地类型的扩张强度较难直接计算,但各用地类型历史过程中的扩张规律却是对各自扩张能力的最好体现,可以用斑块面积的变化量来定量表征各用地类型的扩张强度<sup>[27]</sup>。

$$W_i = \frac{TA_i - TA_{\min}}{TA_{\max} - TA_{\min}} \quad (3)$$

式中: $W_i$  是第  $i$  类土地利用领域权重; $TA_i$  为第  $i$  类土地利用扩张面积; $TA_{\min}$  为各类土地利用最小扩张面积; $TA_{\max}$  为各类土地利用最大扩张面积。

表 2 图们江流域邻域权重(模拟 2020 年)

Table 2 Neighborhood weights in Tumen River basin (simulated date of 2020)

土地利用类型	农田	森林	灌木	草地	水域	荒地	冰雪	建筑用地	湿地
农田	1	1	0	1	1	0	0	1	0
森林	1	1	1	1	1	0	0	1	0
灌木	0	1	1	1	0	0	0	1	0
草地	1	1	1	1	1	1	1	1	0
水域	1	1	0	1	1	1	1	1	0
荒地	0	0	0	0	1	1	1	1	0
冰雪	1	1	0	1	1	1	1	1	0
建筑用地	1	0	0	1	0	0	0	1	0
湿地	1	0	0	0	1	0	1	1	1
邻域权重	1	0.72	0.012	0.26	0.076	0.0007	0.004	0.45	0

自然发展情景按照一切照旧的原则设定,每种土地利用类型都需要按照自然趋势进行设置,目标导向情景是根据《规划》中提出的土地利用总体规划设定的。本研究根据《规划》中的延珲城镇集聚区、东北虎豹国家公园与吉林天佛指山国家级生态保护区以及四轴带中的中蒙俄开发开放与沿图们江鸭绿江开发开放两大轴带将其利用 ArcGIS 做成了相应的开发区与保护区以及未来道路交通的栅格图层,依据 2025 年、2030 年与 2035 年《规划》目标将 CARS 模拟中的发展权重分别设置为 0.65、0.70 与 0.75。

## 3 结果与分析

### 3.1 1995—2020 年耕地时空动态变化

快速的城市化导致建设用地的扩增明显(从 1995 年的 3 362.21 km<sup>2</sup> 到 2020 年的 2 921.79 km<sup>2</sup>), 侵占了周边生态价值土地(即耕地、林地、草地和水域)。图们江流域耕地总面积在 3 000 km<sup>2</sup> 以上,约占区域土地面积的 14%,是图们江流域第二大主要

的土地利用方式。在 1995—2020 年的 5 个时间段内,2000—2005 年期间耕地总量减少最多,2005—2020 年期间虽有波动,但减少幅度呈下降趋势。空间尺度上由于中下游耕地总量较多,耕地变化的主体仍然以中下游为主,上游耕地除 2005—2015 年期间几乎都在呈增加的态势。1995—2020 年期间,研究区耕地空间格局发生了显著的变化(表 3,图 1)。对比 5 个时期耕地变化情况发现,除了 1995—2000 年期间耕地面积有所增加之外,其他时期耕地面积均在减少,耕地重心变动主要向西南偏移为主。1995—2000 年期间上游和中游均增加,下游耕地面积减少,耕地重心向西南以每年 55.42 m 的速度向西南偏移了 277.09 m。2000—2005 年期间中下游减少幅度下降,重心向东南偏移速度减缓。2005—2010 年期间耕地重心向东南偏移,偏移了 81.23 m,偏移速度进一步下降。2010—2015 年期间上中下游均减少,耕地重心偏向西北,而且偏移量较大。2015—2020 年期间上游增加,中下游减少,耕地重心西移明显。

表 3 图们江流域耕地的时空变化情况

Table 3 Spatial and temporal variation of arable land in Tumen River basin

区域	耕地变化量/km <sup>2</sup>				
	1995—2000 年	2000—2005 年	2005—2010 年	2010—2015 年	2015—2020 年
上游	1.80	0.14	-0.84	-14.13	0.12
中游	31.04	-250.34	-65.30	-12.20	-28.53
下游	-30.39	-30.68	12.90	-37.46	-16.48
总计	2.45	-280.88	-53.23	-63.80	-44.89

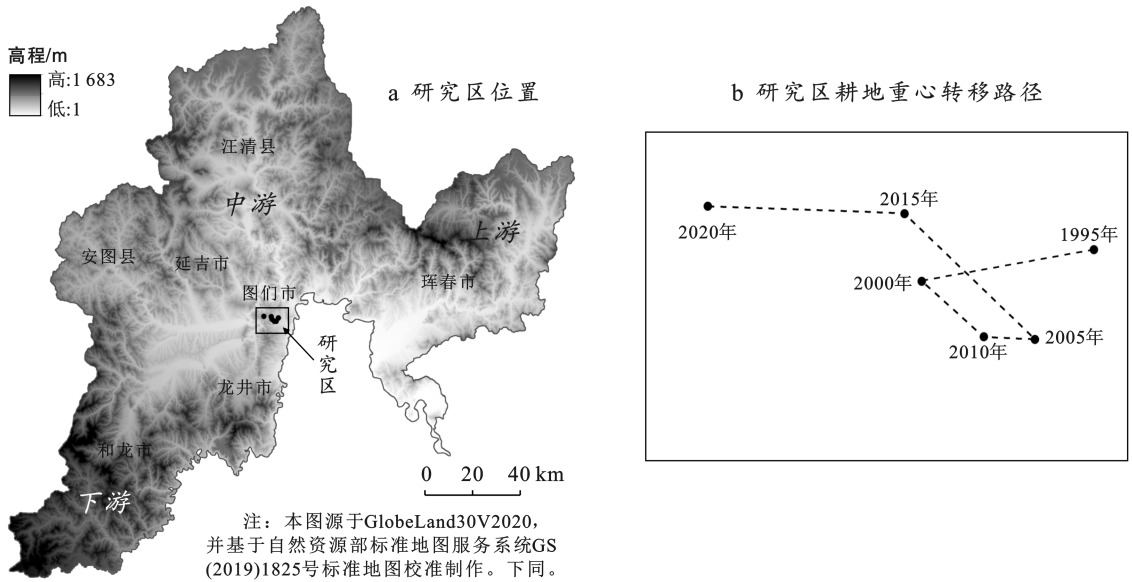


图 1 图们江流域上中下游耕地重心迁移

Fig.1 Migration of center of gravity of arable land in upper and middle reaches of Tumen River basin

3.2 耕地转移矩阵

近 30 a 来研究区内耕地流转变显著(表 4), 1995—2000 年年期间耕地转出了 194.01 km<sup>2</sup>, 绝大部分转入了建设用地和林地。耕地的转入量为 196.76 km<sup>2</sup>, 主要来源于林地和草地, 林地转入量占 94.2%, 转出量与转入量基本持平, 耕地面积并未出现大面积增减。

2000—2005 年期间耕地转出量与转入量的差值

达到最大值, 耕地转出量为 359.60 km<sup>2</sup>, 转入量为 78.72 km<sup>2</sup>, 耕地开始大面积减少, 而且减少幅度在 25 a 这段时间内最显著(图 2)。2005—2010 年期间耕地向其他地类共转出了 211.89 km<sup>2</sup>, 其中有 17% 转入了建设用地, 有 75% 转入了林地。2010—2015 年期间耕地减少幅度开始下降, 2015—2020 年期间减少幅度进一步减少, 减少的耕地主要转化为林地(52%)和建设用地(28%), 转入量主要来自林地和草地。

表 4 图们江流域 1995—2020 年耕地转入与转出情况

Table 4 Arable land transfer in Tumen River basin from 1995 to 2020

转化方向	类型	耕地变化量/km <sup>2</sup>				
		1995—2000 年	2000—2005 年	2005—2010 年	2010—2015 年	2015—2020 年
转出	耕地—森林	141.10	310.27	158.60	125.63	91.77
	耕地—草地	11.26	12.69	9.35	20.15	32.23
	耕地—水域	7.73	5.27	7.86	8.53	3.12
	耕地—荒地	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00
	耕地—建设用地	33.93	31.36	36.08	56.12	48.55
不变	耕地—耕地	3167.76	3004.92	2871.75	2819.81	2790.68
转入	森林—耕地	185.41	67.79	145.46	137.96	120.11
	草地—耕地	8.74	7.43	10.60	6.24	7.85
	水域—耕地	2.33	3.33	2.16	2.21	2.67
	荒地—耕地	0.10	0.02	0.10	0.06	0.04
	湿地—耕地	0.17	0.08	0.14	0.07	0.04

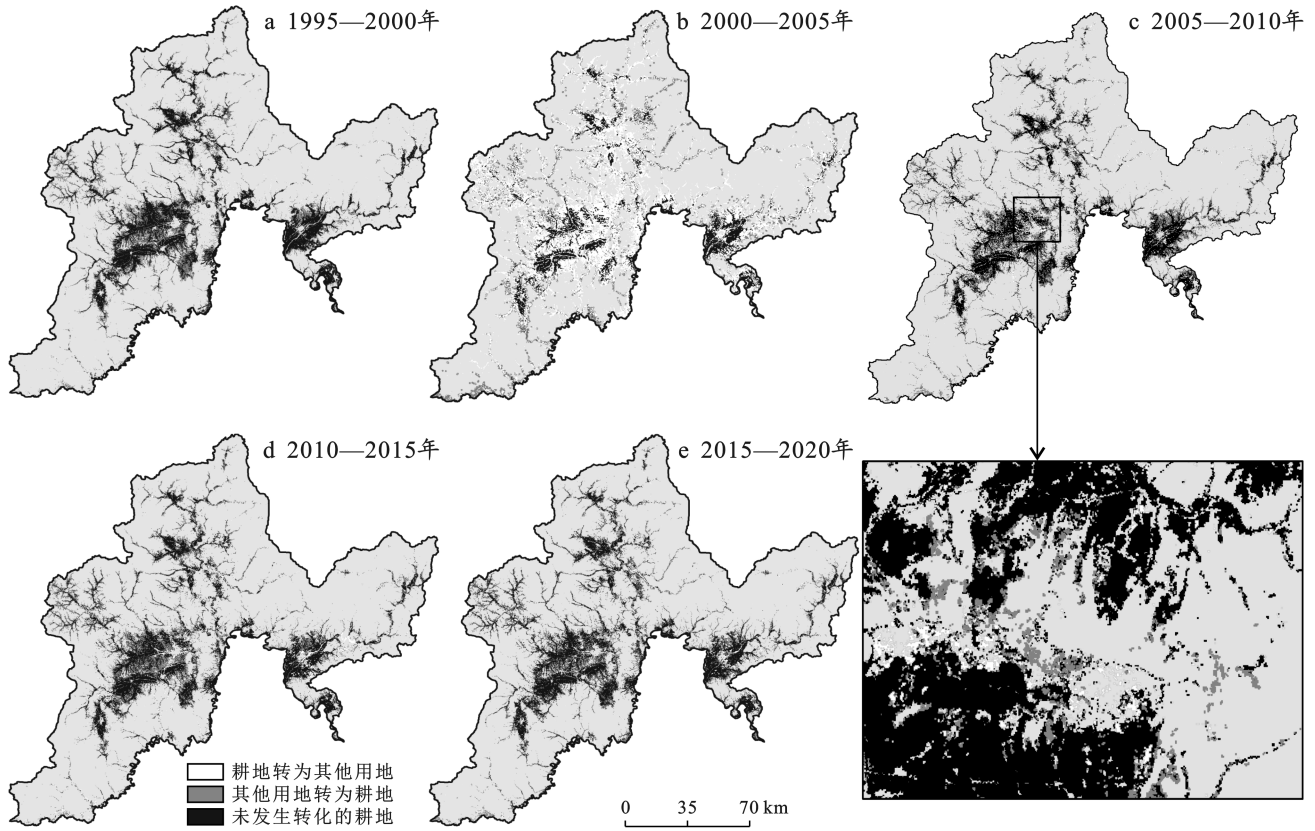


图 2 图们江流域耕地转化特征

Fig.2 Map of arable land transfer in Tumen River basin

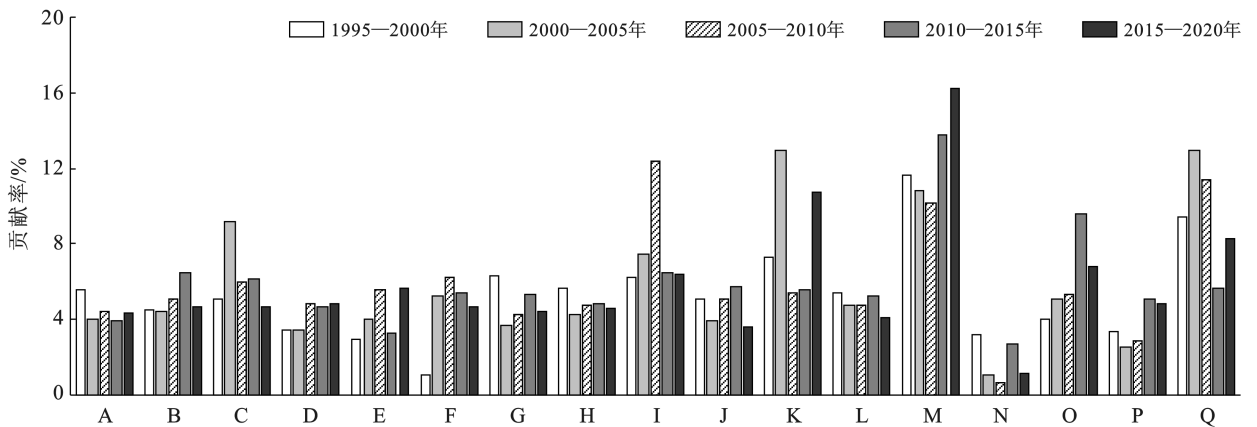
时间尺度上,1995—2000 年期间转化的耕地主要集中在中下游(图 2),2000—2005 年期间减少的耕地主要集中在中下游的和龙、延吉、珲春等中心城市周边,但上游耕地面积仍然在增加,转为耕地的土地利用类型中森林和草地占据主要部分。

2000—2005 年期间耕地被大量侵占导致耕地大面积减少,2005 年之后其他用地转为耕地的面积逐渐增加。空间尺度上,上中下游增加的幅度不

一致,增加最显著的是图们江中游,其次是下游与上游。

### 3.3 耕地扩增的驱动因素

本研究分析了研究区内耕地在 1995—2000, 2000—2005, 2005—2010, 2010—2015, 2015—2020 年 5 个阶段的驱动因素的变化。如图 3 所示,坡度、降水、距主要道路距离、GDP 值、高程以及人口等是解释能力较强的驱动因素。



注:图中横坐标代表了各个驱动因素,从 A 到 Q 依次代表距高铁/火车站距离、距铁路距离、距水域距离、距政府距离、距城市一级道路距离、距城市二级道路距离、距城市三级道路距离、距城市四级道路距离、距主要道路距离、GDP 值、降水、人口、坡度、土壤、气温、风速和高程。

图 3 图们江流域耕地面积增长的驱动因素贡献度

Fig.3 Contribution of drivers of arable land area growth in Tumen River basin

图们江流域耕地各时期驱动因素的解释能力不同(图3),整体上坡度、降水、距离主要道路距离与距河流域距离等是解释能力较强的驱动因素。1995—2000年期间贡献率最高的驱动因素是坡度(12.9%),其次是降水(7.3%)和GDP(5.1%),接下来的4个时期坡度的贡献率分别是10.8%,11.1%,13.8%与14.2%。坡度和高程这两个地形因素在5个时期内都占有很高的贡献率,通过叠加耕地增加区域和研究区坡度栅格数据分析表明,新增加的耕地主要集中在坡度在 $0^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 的区域内。此外,降水也是导致耕地变化的主要因素之一,在2000—2005年期间是促使耕地面积增加的第一驱动因素,而在其他时期也是仅次于地形因素的第二驱动因素,新增耕地

主要集中在研究区西部等降水较多的区域内。2005—2010年期间距城市四级道路距离贡献度达到最大,受交通的影响复垦耕地主要集中在交通便利的城市郊区与主干道旁。2010—2015年期间耕地扩增的主要驱动因素是高程和坡度等地形因素,这段时期增加的耕地主要在高程在200~500 m的范围内。2015—2020年期间耕地扩增的主要驱动因素是高程和坡度等地形因素,这段时期增加的耕地主要在坡度在 $5^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 之间的地区。

### 3.4 模型验证与情景模拟

验证结果表明,kappa系数为0.9213,说明两张图像高度一致(图4)。FoM值为0.2375,高于Liu等<sup>[24]</sup>获得的FoM值(0.1962),模拟结果是可信的。

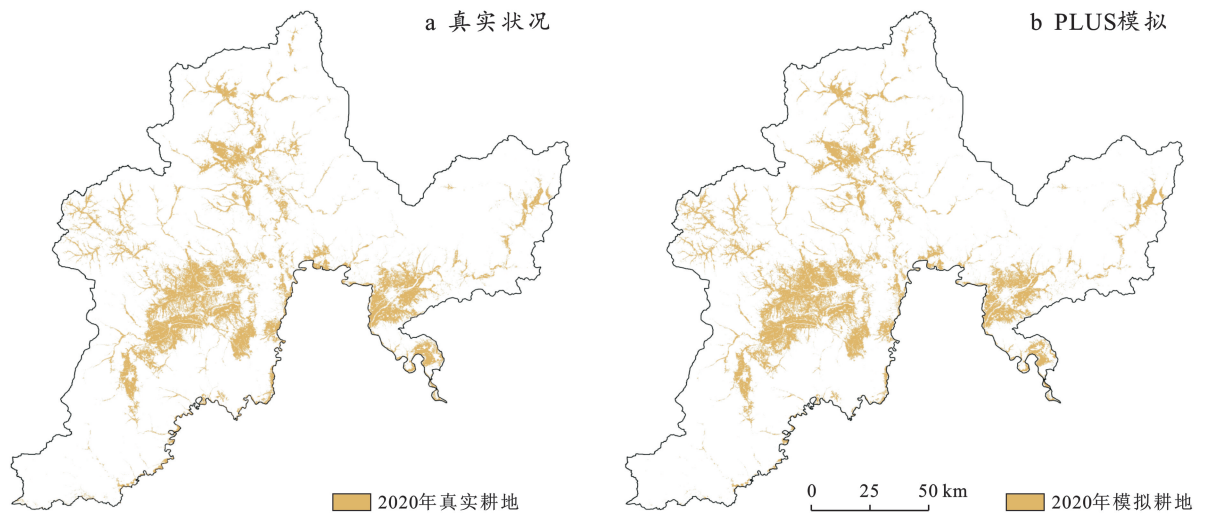


图4 图们江流域2020年耕地状况模拟精度验证

Fig.4 Simulation accuracy verification of arable land in Tumen River basin in 2020

模拟结果表明,耕地在 $S_1$ 和 $S_2$ 两种情景下发展趋势一致(均呈现逐年减少趋势)但耕地时空分布具有较大的差异(图5)。在时间演变方面,两种情景下耕地总量仍然呈现逐年减少的趋势,但减少幅度略有差异, $S_1$ 情景下图们江流域的耕地面积预计将从2020年的2921.30 km<sup>2</sup>逐渐减少到2035年的2811.62 km<sup>2</sup>, $S_2$ 情景下将减少到2792.73 km<sup>2</sup>。从减少的幅度来看, $S_1$ 情景符合从2005年开始幅度一直在减少的趋势, $S_2$ 情景下这种减少趋势更加明显。在空间演变方面,耕地主体还是集中在中下游地区。两种情景下减少的耕地主要集中在中游的城市聚集区和下游保护区内,但是 $S_2$ 情景下这种区域性减少情况相较于 $S_1$ 情景更加明显。

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

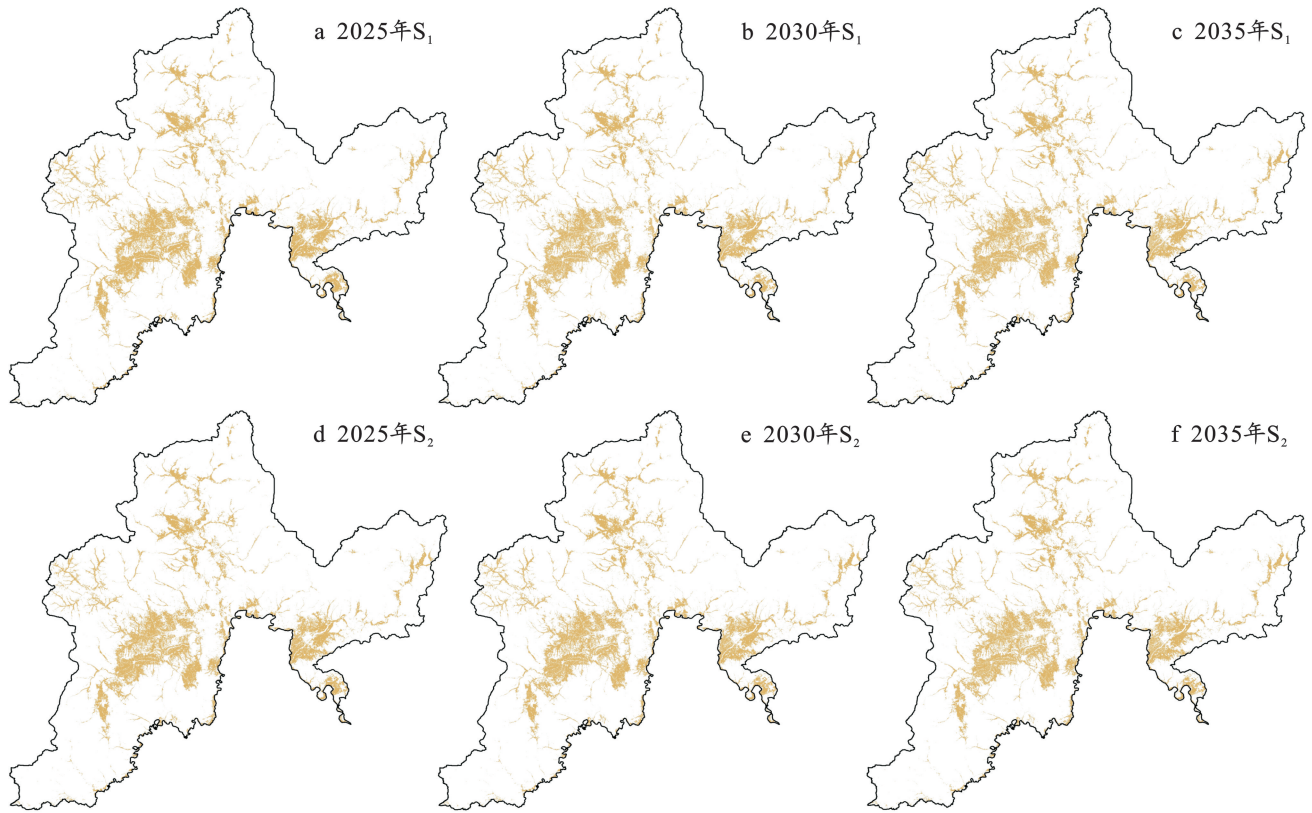
#### 4.1.1 耕地时空变化分析 对土地利用转移矩阵的

分析表明,耕地、林地和建设用地三者之间的转换最为明显(表4)。空间尺度上,研究区上游耕地面积整体呈增加趋势,中下游逐年减少。这是由于中下游区域是城镇密集区,伴随着区域经济发展和人口的增加,城市建设占用的耕地面积不断增长,而上游区域受人为扰动较轻。时间尺度上,1995—2000年期间由于中游和上游耕地面积增加弥补了下游的减少量,所以在这段时间,转出量与转入量基本持平,耕地面积并未出现大面积增减。此外,延边州地区人口的增长直接促进粮食需增长,进而导致大片林地和草地开垦为新耕地,这与相恒星等<sup>[17]</sup>,张冲冲等<sup>[28]</sup>关于图们江流域耕地变化研究结果相似。政策因素在任意时段与研究尺度内都是影响耕地变化的重要因素<sup>[29]</sup>,由于退耕还林政策的落实导致2000—2005年期间耕地开始显著减少。作为全国生态建设试点省份之一的吉林省出台了一系列生态保护政策<sup>[30]</sup>使得林地和草地等面积增加,86%的耕地转变为林地。此外,这

段时期内许多朝鲜族农民开始放弃耕地去大城市或者韩国打工<sup>[19]</sup>,大量耕地荒废导致该时期内耕地数量快速减少,这与张冲冲等<sup>[28]</sup>的研究一致。

2005—2010年出现的中游耕地大面积减少,上下游面积增加现象,可能是由于当地政府为解决土地供需矛盾和问题,加强了对土地利用的统筹协调和

整体控制,耕地减少幅度开始大范围下降。2010—2015年东北虎豹等国家生态区的建立与政府出台的水土保持相关政策<sup>[19]</sup>使得其下游耕地总量减少。2015—2020年期间耕地与林地之间的流转趋于平衡,草地的转化弥补了一部分建设用地的占用,使得耕地减少幅度持续减少,这与罗芳等<sup>[31]</sup>的研究结果相似。



注:  $S_1$  为自然发展情景;  $S_2$  为目标导向发展情景。

图 5 两种发展情景下模拟的耕地状况

Fig.5 Simulated arable land status under two development scenarios

由于当地朝鲜族喜好种植水田<sup>[18]</sup>,该区的农作物结构主要以水稻和大豆为主,但是受日本海回流天气系统的影响,经常发生低温冷害,特别是东部地区更为明显<sup>[32]</sup>。此外,研究区西部地区以森林为主,由森林转化而来的农田土壤养分更丰富,产量更高<sup>[33]</sup>,复垦的耕地多来自林地,所以导致过去 30 a 图们江流域耕地重心向西偏移较为显著。为了确保图们江流域耕地面积的稳定与耕地资源的可持续发展,可以适当开发研究区上游与西部地区的耕地资源以平衡中下游地区耕地的消耗。

4.1.2 耕地变化驱动因素分析 耕地时空格局变化是自然和社会经济因素的综合作用的结果,但政策社会经济因素在任意时段与研究尺度内都是影响耕地变化的重要因素<sup>[29]</sup>。2002 年以后随着退耕还林还草工程全面启动<sup>[30]</sup>,驱使图们江流域大量耕地减少并

转入林地之中。2005 年以后伴随城镇化进程的推进,虽然大多数朝鲜族农民放弃耕地开始外迁,但大多数农民有着“恋土情结”,宁愿土地撂荒也不愿将耕地流转<sup>[33]</sup>,外加国家“十三五”计划,“藏粮于地,藏粮于技”与国土综合政治和耕地数量质量生态“三位一体”多元化综合目标等政策的实施<sup>[34]</sup>,导致之后耕地面积整体上虽处于减少态势,但转入林地的比重下降。为了促进第二产业的发展,吉林省近年来建设了大量的工业园区,研究区内就有延龙图食品医药产业集群等,外加“一带一路”与生态保护区如虎豹公园等的建设占用了大量耕地资源,使得 2015 年之后耕地数量进一步减少。从社会经济方面分析,随着家庭承包责任制的不足开始显现与近年来农药、化肥以及机械化农具等农业生产有关的生产资料价格上涨,使得农户从事农业生产的获利空间较小且存在一定的亏损



风险,因此更倾向于将耕地用于非农化生产来获取收益<sup>[35]</sup>。

耕地的面积随着时间的推移而变化,驱动这种面积变化的因素也在逐渐变化。1995—2000 和 2000—2005 年两个时期内,主要驱动因素由坡度变为降雨和距离河流域的距离等因素。这种变化与已有的相关研究差异较大<sup>[36]</sup>,这是由于研究区属于地域偏僻边境地区,人口比例中朝鲜族占比较高,外迁现象严重<sup>[28]</sup>,城市化发展缓慢,乡村凋敝,因此人口等社会经济因素在研究区内的贡献率偏低。此外,图们江流域是朝鲜族最先移民开垦耕地的地区<sup>[18]</sup>,朝鲜族喜好种植水田,由于农业机械化水平不高,更多依赖地形等自然因素,旱地广泛分布在图们江中游。水田受水源供应和气温等因素限制,主要分布在图们江的主要支流周围<sup>[17]</sup>,因此 1995—2000 年期间扩增的耕地主要分布在坡度较小的盆地、平原和河畔平坦的地区,这与相恒星等<sup>[17]</sup>的研究一致。2000—2005 年期间降雨和距离河流域的距离贡献度最高的驱动因素,2005—2010 年期间主要驱动因素变为距离城市四级道路距离,地形因素。这种耕地变化驱动因素区域性差异,不仅受控于地区地理要素空间异质性,还同区域发展定位、土地利用政策、研究时段等密切相关<sup>[31]</sup>。由于研究区地势西高东低,呈阶梯状分布,有利于海上的湿润气流和河流流向中国内陆,带来充沛的水源,进而促进了耕地的面积的增加,这也是高程和坡度的整体贡献率偏高的原因。总体来看,新增耕地多集中在与城市和交通便利的平原与盆地地区<sup>[17]</sup>,山地地区大面积耕地转为草地和林地,这可能与山地地形起伏较大,居住人口较少,退耕还林还草,耕地撂荒有关<sup>[30]</sup>。

**4.1.3 未来耕地变化分析** 《规划》的影响分析和研究区耕地未来变化的预测,可以为图们江流域统筹和土地资源的合理配置提供科学的建议,为《规划》的后续发展做出贡献。本研究选择 PLUS 模型,设置两个情景预测 2025,2030 与 2035 年的耕地,模拟结果表明,PLUS 模型具有很高的空间模拟能力,与马尔可夫模型相结合,可以显示耕地在时间和空间上的变化。在  $S_1$  下,耕地面积减少幅度较缓。生态保护区内耕地减少较慢,生态保护能力下降,大量耕地被建设用地占用,图们江流域的生态环境将受到破坏,农业生产、城市发展与生态保护的矛盾将更加明显。 $S_2$  下,图们江流域内生态保护区内耕地数量迅速减少,生态环境得到恢复,生态环境得到很好的保护,虽然耕地未达到占补平衡,但其空间格局更加集聚。

这种不同的情景和耕地资源管理策略可以为决

策者提供一个对比鲜明的背景,过去 30 a 随着社会经济的高速发展,研究区内耕地承载的压力越来越大,当前的趋势不利于《规划》目标的实现。模拟结果表明  $S_2$  更有利于图们江流域耕地资源的可持续发展,所以应继续实施《规划》目标,建立与区域种植特色相适应的现代农业园区布局体系,实施“以点带面”,积极建设现代农业示范区,推动区域农业科技化进程,助力农业高质量发展。鉴于一定的农业需求与耕地保护政策,也许开垦森林将会是确保粮食安全<sup>[28]</sup>的最佳途径。图们江流域在过去就是以这种方式实现的,预计这种方式将在可预见的未来继续下去,因此还需要加大耕地保护执法检查与管理力度,健全土地流转机制与耕地保护机制等相关政策,实现耕地数量、质量与生态三位一体保护。

本文的主要限制是使用的 LUCC 数据集不够详细,研究结果在更大的尺度上是否会得到同样的结果仍需验证。除此之外,本文仅从自然环境和社会经济学的角度选择了驱动因素,存在一些局限性和片面性。未来如果采用更多的方法预测应兼顾更多的方面,多模型耦合和量化宏观政策将是未来相关研究的重点。

## 4.2 结论

(1) 1990—2020 年,图们江流域耕地变化显著,整体呈减少趋势但减少幅度逐年下降,过去 30 a 耕地总量共减少了 440.42 km<sup>2</sup>。中下游地区是耕地显著变化区域,耕地重心向西偏移显著,耕地流转主要发生在林地和建设用地之中。

(2) 耕地时空格局变化是自然和社会经济因素的综合作用的结果。在坡度、降水和高程等自然因素的影响限制下,GDP 值、道路交通和人口等因素驱动着耕地不断发生变化。此外农民价值观和退耕还林等政策的推行加速了耕地利用方式的变化,从而导致耕地时空格局发生转变。

(3) 模拟结果表明,PLUS 模型能模拟生成可靠的未来耕地模式。通过两种情景的对比分析,按照目前的发展趋势,《规划》的目标是无法实现的。通过对  $S_2$  情景下耕地的时空演变分析表明《规划》的实施有利于图们江流域耕地资源的可持续发展,为了实现耕地数量、质量与生态三位一体保护耕地资源的可持续发展,应当继续实施《规划》。此外,可以适当开发研究区上游与西部地区的耕地资源,推动原有农业实现规模化、科技化。同时还需加大耕地保护执法检查与管理力度,健全土地流转机制与耕地保护机制等相关政策,引导农民进行土地租赁或复垦撂荒地。

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] Hasan S S. Impact of land use change on ecosystem services: A review [J]. *Environmental Development*, 2020, 34:100527.
- [2] Chang Yue, Hou Kang, Li Xuxiang, et al. Review of land use and land cover change research progress [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, 113:012087.
- [3] 吕苗苗. 基于 CLUE-S 模型的土地利用空间格局情景模拟研究: 以西安市户县为例[D]. 陕西 西安: 长安大学, 2016.
- [4] 李喆, 吴柏清, 何政伟, 等. 泸定县耕地保有量预测及其对策研究[J]. *安徽农业科学*, 2007, 35(22): 6698-6700.
- [5] Yan Yan, Zhao Jingzhu, Deng Hongbing, et al. Predicting China's cultivated land resources and supporting capacity in the twenty-first century [J]. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2006, 13(3): 229-241.
- [6] Wang Li, Cui Ximin, Yuan De, et al. CLUE-S model-based simulation of land use dynamic variation in Yangzhou urban [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 347/348/349/350: 3247-3251.
- [7] 杨园园. 贵州土地利用综合效益时空格局演化及预测研究[D]. 贵州 贵阳: 贵州财经大学, 2020.
- [8] Li Chaodong, Yang Mingyi, Li Zhanbin, et al. How will Rwandan land use/land cover change under high population pressure and changing climate? [J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(12): 5376.
- [9] Bao Shengwang, Yang Fan. Spatio-temporal dynamic of the land use/cover change and scenario simulation in the southeast coastal shelterbelt system construction project region of China [J]. *Sustainability*, 2022, 14(14): 8952.
- [10] Liang Xun, Guan Qingfeng, Clarke K C, et al. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2021, 85: 101569.
- [11] Gomes E, Banos A, Abrantes P, et al. Future land use changes in a peri-urban context: Local stakeholder views [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 718: 137381.
- [12] Ye Li. An enhanced multivariable dynamic time-delay discrete grey forecasting model for predicting China's carbon emissions [J]. *Energy*, 2022, 249: 123681.
- [13] Esgalhadó C, Guimaraes M H, Lardon S, et al. Mediterranean land system dynamics and their underlying drivers: Stakeholder perception from multiple case studies [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2021, 213: 104134.
- [14] Hu Xiaoning, Luo Han, Guo Mancai, et al. Ecological technology evaluation model and its application based on logistic regression [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 136: 108641.
- [15] Sylvester J. The cover time of a (multiple) Markov chain with rational transition probabilities is rational [J]. *Statistics & Probability Letters*, 2022, 187: 109534.
- [16] Basse R M. Land use changes modelling using advanced methods: Cellular automata and artificial neural networks. The spatial and explicit representation of land cover dynamics at the cross-border region scale [J]. *Applied Geography*, 2014, 53: 160-171.
- [17] 相恒星, 王一航, 张敬瑶, 等. 1990—2015 年图们江流域耕地时空变化遥感分析[J]. *长沙大学学报*, 2017, 31(5): 8-13.
- [18] Liu Yuyan, Jin Ri, Zhu Weihong. Conversion of natural wetland to farmland in the Tumen River basin: Human and environmental factors [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(17): 3498.
- [19] 金华. 图们江下游地区坡耕地水土流失现状及其保护措施[D]. 吉林 延吉: 延边大学, 2004.
- [20] 李明玉. 图们江下游地区耕地土壤资源评价[D]. 吉林 延吉: 延边大学, 2000.
- [21] Xiang Hengxing, Jia Mingming, Wang Zongming, et al. Impacts of land cover changes on ecosystem carbon stocks over the transboundary Tumen River basin in northeast Asia [J]. *Chinese Geographical Science*, 2018, 28(6): 973-985.
- [22] Yang Jie, Huang Xin. 30 m annual land cover and its dynamics in China from 1990 to 2019 [J]. *Earth Syst. Sci. Data Discuss.*, 2021, 2021: 1-29.
- [23] Liu Fang, Qin Tianling, Girma A, et al. Dynamics of land-use and vegetation change using NDVI and transfer matrix: A case study of the Huaihe River basin [J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2018, 28(1): 213-223.
- [24] Rukundo E, Liu Shiliang, Dong Yuhong, et al. Spatio-temporal dynamics of critical ecosystem services in response to agricultural expansion in Rwanda, East Africa [J]. *Ecological Indicators*, 2018, 89: 696-705.
- [25] 李琛, 高彬嫫, 吴映梅, 等. 基于 PLUS 模型的山区城镇景观生态风险动态模拟[J]. *浙江农林大学学报*, 2022, 39(01): 84-94.
- [26] Cohen J. Weighted kappa: Nominal scale agreement with provision for scaled disagreement or partial credit [J]. *Psychological Bulletin*, 1968, 70(4): 213-220.
- [27] 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.

- 景观生态风险动态模拟[J].浙江农林大学学报,2022,39(1):84-94.
- [21] 尉芳,刘京,夏利恒,等.基于 LUCC 的陕西渭北旱塬区景观生态风险评价[J].中国环境科学,2022,42(4):1963-1974.
- [22] 张韦萍,石培基,赵武生,等.黄河上游兰州—西宁城市群资源环境承载力时空分异及障碍因子诊断[J].应用生态学报,2022,33(9):2501-2510.
- [23] Chen Lin, Zhou Bin, Man Weidong, et al. Landsat-based monitoring of the heat effects of urbanization directions and types in Hangzhou City from 2000 to 2020 [J]. Remote Sensing, 2021,13(21):4268.
- [24] Han Ze, Song Wei, Deng Xiangzheng. Responses of ecosystem service to land use change in Qinghai Province [J]. Energies, 2016,9:1-16.
- [25] 余新晓,张晓明,牛丽丽,等.黄土高原流域土地利用/覆被动态演变及驱动力分析[J].农业工程学报,2009,25(7):219-225.
- [26] 刘希朝,李效顺,蒋冬梅.基于土地利用变化的黄河流域景观格局及生态风险评估[J].农业工程学报,2021,37(4):265-274.
- [27] 崔杨林,高祥,董斌,等.县域景观生态风险评价[J].浙江农林大学学报,2021,38(3):541-551.
- [28] 王敏,胡守庚,张绪冰,等.干旱区绿洲城镇景观生态风险时空变化分析:以张掖绿洲乡镇为例[J].生态学报,2022,42(14):5812-5824.
- [29] Yang Yanping, Chen Jianjun, Lan Yanping, et al. Landscape pattern and ecological risk assessment in Guangxi based on land use change [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022,19(3):1595.
- [30] 张学斌,石培基,罗君,等.基于景观格局的干旱内陆河流域生态风险分析:以石羊河流域为例[J].自然资源学报,2014,29(3):410-419.
- [31] 孙丽蓉,周冬梅,岑国璋,等.基于地理探测器模型的疏勒河流域景观生态风险评价及驱动因素分析[J].干旱区地理,2021,44(5):1384-1395.
- [32] 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.
- [33] 谢高地,肖玉,甄霖,等.我国粮食生产的生态服务价值研究[J].中国生态农业学报,2005,13(3):10-13.
- [34] 谢高地,甄霖,鲁春霞,等.一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J].自然资源学报,2008,23(5):911-919.
- [35] 谢高地,张彩霞,张雷明,等.基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J].自然资源学报,2015,30(8):1243-1254.
- [36] 朱润苗,陈松林.1980—2020 年福建省景观生态风险与生态系统服务价值的空间关系[J].应用生态学报,2022,33(6):1599-1607.
- [37] 靳甜甜,张云霞,朱月华,等.黄土高原林区生态系统服务价值与景观生态风险时空变化及其关联性:以子午岭区为例[J].应用生态学报,2021,32(5):1623-1632.
- [38] Wang Pengquan, Li Runjie, Liu Dejun, et al. Dynamic characteristics and responses of ecosystem services under land use/land cover change scenarios in the Huangshui River basin, China [J]. Ecological Indicators, 2022, 144:109539.

(上接第 212 页)

- [28] 张冲冲,南颖,吉喆.图们江中游中朝土地利用/覆盖及变化比较研究[J].延边大学学报(自然科学版),2011,37(4):360-365.
- [29] Conway T M. The impact of class resolution in land use change models [J]. Computers, Environment and Urban Systems,2009,33(4):269-277.
- [30] 朱闯.2001—2017 年中国耕地时空变化特征及其驱动因素研究[D].天津:天津工业大学,2020.
- [31] 罗芳,潘安,陈忠升,等.四川省宜宾市 1980—2018 年耕地时空格局变化及其驱动因素[J].水土保持通报,2021,41(6):336-344.
- [32] 沈惠淑,田允哲,赵国柱,等.图们江下游气候资源与农业发展战略[J].延边大学学报(自然科学版),1999,25(1):59-63.
- [33] 郭贝贝,方叶林,周寅康.农户尺度的耕地撂荒影响因素及空间分异[J].资源科学,2020,42(4):696-709.
- [34] 郭丽英,张华,Di Liping,等.我国农用地资源态势分析与对策建议:基于国家农业资源台账[J].中国农业资源与区划,2017,38(12):14-20.
- [35] 许健玮.吉林省耕地非农化驱动因素研究[D].吉林长春:吉林大学,2020.
- [36] Wang Xue, Li Xiubin. China's agricultural land use change and its underlying drivers: A literature review [J]. Journal of Geographical Sciences, 2021, 31(8): 1222-1242.