

DOI: 10.5846/stxb202201170162

吕莹莹, 王智, 夏欣, 袁换欢, 李明诗, 徐网谷. 内蒙古大兴安岭林草交错区耕地景观演变及空间过程. 生态学报, 2023, 43(3): 1209-1218.

Lü Y Y, Wang Z, Xia X, Yuan H H, Li M S, Xu W G. Spatiotemporal evolutions and spatial processes of cultivated land landscape in Daxinganling forest-grass ecotone in the Inner Mongolia. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(3): 1209-1218.

内蒙古大兴安岭林草交错区耕地景观演变及空间过程

吕莹莹¹, 王智¹, 夏欣¹, 袁换欢¹, 李明诗², 徐网谷^{1,*}

¹ 生态环境部南京环境科学研究所, 南京 210042

² 南京林业大学林学院, 南京 210037

摘要: 探究退耕还林(草)和耕地保护双重背景下耕地的动态变化对林草交错区的国土空间规划、生态安全等具有重要意义。研究基于 1990、2000、2010 年和 2018 年 30 m 空间分辨率土地利用数据, 通过土地利用动态度指标及转移矩阵, 定量分析了交错区耕地的时空变化特征。进而, 建立景观变化空间过程模型, 将耕地扩张的空间过程分为填充式、廊道式、蔓延式、飞地式四种类型, 将耕地萎缩的空间过程分为穿孔、破碎化、收缩、消失四种类型。结果表明: (1) 1990—2000、2000—2010、2010—2018 年耕地动态度分别为 8.65%、-0.33% 和 -0.07%, 耕地面积净增加 2974.28 km²。(2) 1990—2018 年草地向耕地转入 2589.23 km², 是耕地增加的主要来源; 1990—2000、2000—2010 年耕地转出的主要途径均为草地, 2010—2018 年人工表面成为耕地转出的主要去向。(3) 1990—2018 年, 耕地扩张过程呈现出“飞地式-廊道式/蔓延式-蔓延式”的演变趋势, 主要表现为由无序扩张的飞地式转变为依靠原有耕地增长的蔓延式, 整个过程符合星点式或斑块式开发转为大规模连片开发的规律; 萎缩过程呈现出“收缩-消失-破碎化”的规律, 破碎化过程的比例在耕地萎缩过程中不断增加, 人工表面导致的耕地破碎化应受到当地政府的重视。

关键词: 林草交错区; 耕地; 时空演变; 景观变化空间过程

Spatiotemporal evolutions and spatial processes of cultivated land landscape in Daxinganling forest-grass ecotone in the Inner Mongolia

LÜ Yingying¹, WANG Zhi¹, XIA Xin¹, YUAN Huanhuan¹, LI Mingshi², XU Wanggu^{1,*}

¹ Nanjing Institute of Environmental Science, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China

² College of Forestry, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

Abstract: Under the background of the Grain for Green Project (GGP) and Cultivated Land Protection, the development process of cultivate land is vital to land spatial planning and ecological security of the forest-grass ecotone. Based on the spatial resolution data of 30 m land use in 1990, 2000, 2010 and 2018, we analyzed the spatial-temporal change of cultivated land in forest-grass ecotone by land use dynamic degree and transition matrix. Then we established the spatially explicit processes of cultivated landscape change process model, and divided expansion of cultivated land into bridge, branch, infilling and outlying, while divided the reduction of cultivated land into perforation, subdivision, shrinkage and attrition components. The results show that: 1) the dynamic degrees of cultivated land in 1990—2000, 2000—2010 and 2010—2018 were 8.65%, -0.33% and -0.07% respectively, and the cultivated land increased by 2974.28 km² during the entire study period. 2) From 1990 to 2018, 2589.23 km² of grassland was transferred to cultivated land, which is the main source of cultivated land increase; The conversion from cultivated land to grassland was the main approach of cultivated land decrease before 2010, while in the later period, the occupation of construction land played a dominant role in cultivated

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务专项 (GYZX210508); 生态环境部生物多样性调查、观测和评估项目 (2019—2023 年); “科技助力经济 2020”重点专项 (SQ2020YFF0426320)

收稿日期: 2022-01-17; **网络出版日期:** 2022-10-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xuwanggu@163.com

land reduction. 3) The overall temporal expansion of cultivated land had a “outlying-bridge / branch-branch” tendency. The tendency was characterized by an early outlying type dominance, which was unordered, followed by its gradual disappearance. Furthermore, branch type relying on the original patch growth increased gradually, and a new dominance established accordingly. The whole process conformed to the law of the transformation of cultivated land from point or patch-type development to large-scale continuous development. The reduction of cultivated land was dominated by shrinkage in the early period, followed by attrition, and subdivision in the last period. Subdivision components increased gradually, the local government should pay attention to the fragmentation of cultivated land caused by construction land.

Key Words: forest-grass ecotone; cultivated land; spatial-temporal variation; landscape change spatial process

大兴安岭森林-草原交错带是我国生态系统结构保存最完整的林草交接区域,也是维护我国东北三省乃至华北地区生态安全的绿色屏障^[1-2]。近几十年来,由于人类活动的加剧和气候变化的影响,交错带的景观格局发生了较大变化,区域内林缘退缩、草地退化、生物多样性降低等生态问题引人关注^[3-4]。开垦耕地被认为是导致上述现象的主要驱动因素之一^[5-6]。虽然退耕还林草工程有一定的成效,但仍有研究认为草地退化、湿地萎缩没有从根本上得到遏制^[7-8]。近年来,城市的扩张造成了耕地的锐减,基本农田保护制度随之建立,在一定程度上成为耕地挤占草地、湿地的政策动力之一^[9]。生态保护和耕地保护之间的矛盾越加突出,耕地成为交错区变化最为剧烈的土地利用类型^[10]。因此,探索大兴安岭交错带耕地景观的动态演变,对于了解退耕还林(草)和耕地保护双重背景下耕地的发展现状及未来走向具有重要意义。

早期的耕地研究主要集中在景观数量的变化^[11]、空间分布^[12]、模拟预测以及变化驱动机制^[13]等方面。随着 GIS 空间分析技术和景观生态学的发展应用,耕地景观格局的动态变化成为诸多学者的研究方向^[14-15]。传统空间形态的表征主要是通过多时相景观指数等简单数值的比对,这是对真实过程的一种简化,难以反应真实的空间过程信息^[16-17]。多年来,部分学者利用景观扩张指数识别景观的空间扩张模式,有效地扩展了景观动态变化过程的研究方法和手段。刘小平等^[18]利用景观扩张指数将景观扩张的空间过程划分为填充式、边缘式和飞地式,并认为其他扩张模式都可以看作这三种基本模式的变种或者混合体;武鹏飞等^[19]利用多阶景观扩张指数将景观的空间扩张模式划分为邻接扩张式和外部扩张。但这些指数需要人为设定缓冲阈值,景观变化斑块面积、形状差异会影响指数数值,缓冲阈值的设定较为困难且极具争议^[20-22]。近年来,一种景观破碎化过程模型^[23]被提出,该模型基于 Forman 景观变化理论,通过 ArcGIS 空间分析中的八邻域算法,识别出景观破碎化的四种空间过程,即穿孔、破碎化、缩小和消失,为直观表达景观空间变化过程提供了有力的工具。显然,上述过程是针对景观萎缩而言。目前该模型主要被应用于森林破碎化、森林丧失领域^[24-25],在耕地景观上的应用尚未见报道,其计算方法是否适用于景观扩张也亟需研究。

景观萎缩和扩张都是重要的景观变化过程,无论是景观扩张指数还是景观破碎化模型,现有的研究多针对景观类型转移的单向变化过程,不利于全面认识景观格局的演变过程。而人为主导的耕地景观具有明显的双向变化特征,既有以解决粮食安全为目的的耕地扩张,也有城市发展、生态工程带来的耕地萎缩。为此,本文基于 1990、2000、2010 和 2018 年四期 30 米空间分辨率的土地利用数据,分析大兴安岭林草交错区耕地的变化特征和变化途径,并尝试构建景观变化空间过程模型,既识别耕地的扩张过程,又可刻画耕地景观的萎缩过程,以期丰富和充实景观变化过程研究成果,同时为林草交错区国土空间规划提供参考。

1 研究区概况

大兴安岭林草交错带属于大兴安岭林区向呼伦贝尔草原区的过渡地带,行政区域涉及呼伦贝尔市的额尔古纳市、根河市、牙克石市、陈巴尔虎旗、海拉尔区、鄂温克自治旗和新巴尔虎左旗共 7 个旗市(图 1)。全区地势为东北方向高,西南方向低,属浅山丘陵地带。气候类型为温带大陆季风气候,冬季寒冷漫长、夏季短促,年平均气温 2.4℃,多年平均降雨量 358mm。大兴安岭林草交错带典型草原和温带森林两种植被类型共存,其

重要植被类型为:寒温带针叶林、温带针阔混交林、夏绿阔叶林等森林植被,以及林缘草甸、草甸草原、典型草原、低地草场、沙地草场等草原植被^[26]。

由于交错带的耕地主要集中分布于林草分界线两侧,研究根据土地覆被情况将林草分界线两侧分别缓冲 100 km 作为耕地变化的研究区域,即交错区,基本覆盖了整个林草交错带 98% 以上的耕地。

2 数据来源及研究方法

2.1 数据来源及预处理

研究数据主要包括遥感影像数据和实地调查数据。遥感影像数据为覆盖整个研究区的 1990、2000 和 2010 年的 Landsat5 TM 图像以及 2018 年的 Landsat8 OLI 图像,共 48 景。所有数据均是来自 USGS 官方网站 (<https://glovis.usgs.gov/>) 提供的地表反射率数据。为保证分类精度,选择研究区夏季无云或少云的影像数据。其中 2010 年少量影像云量较多,采用对应位置上 2009 或 2011 年同时期影像进行替代。

参考《中华人民共和国土地覆被地图集》中对 30 米空间分辨率土地覆被数据的分类标准^[27],采用面向对象的决策树分类方法^[28]将大兴安岭林草交错带土地利用分为林地、草地、耕地、湿地、人工表面和未利用地六类(图 2)。利用 2009 年国土二调数据、91 卫图系统里相应年份高空间分辨率图、实地调查等数据进行验证。1990、2000、2010、2018 年的总体分类精度分别为 93.40%、93.50%、93.40% 和 90.40%,Kappa 系数分别为 0.9184、0.9198、0.9156 和 0.8816,分类结果精度较高,满足后续分析需求。

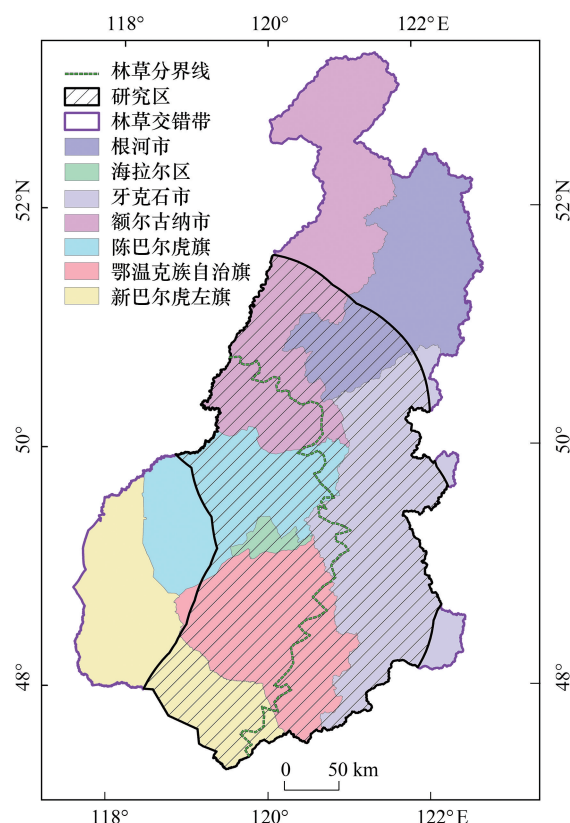


图 1 研究区行政区划图

Fig.1 Administrative divisions of the study area

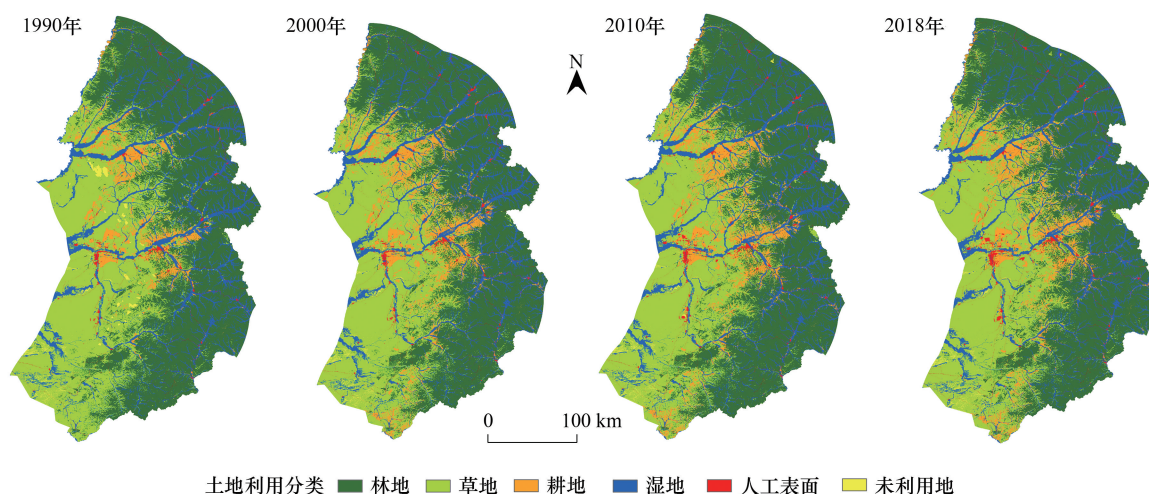


图 2 研究区土地利用分类图

Fig.2 Landuse classification maps

2.2 耕地时空演变特征分析

耕地变化的动态特征主要通过动态变化度、趋势和状态来表征,这可以直观地反应出各研究时段耕地的

变化情况^[29]。同时,引入耕地变化的转移矩阵,对耕地与其他土地类型之间相互的转换情况进行分析,进而对耕地利用变化内在的过程与趋势进行分析。

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

$$P = \frac{\Delta U_{in} - \Delta U_{out}}{\Delta U_{in} + \Delta U_{out}} \quad (2)$$

式中, K 表示动态变化度, U_a 表示研究初期耕地面积, U_b 表示研究末期耕地面积, T 表示研究时长,当 T 时段进行设定为年时, K 值为研究区耕地年变化率。 P 表示趋势和状态指数 K :动态变化度 Dynamic degrees; P :趋势与状态指数 Trend and state index;下同。 ΔU_{in} 指其他类型的土地转换为耕地的面积总和, ΔU_{out} 指耕地转换为其他类型的土地面积之和。

2.3 景观变化的空间过程

2.3.1 景观变化空间过程的类型

本文对耕地景观变化空间过程描述时,以 Forman 景观变化理论为基础,将耕地萎缩的空间过程分为穿孔、破碎化、收缩和消失四个类型^[30],将耕地扩张的空间过程分为填充式、廊道式、蔓延式和飞地式四种类型。其中,穿孔(填充式)是指萎缩(扩张)耕地斑块被一个原始耕地斑块完全包围;破碎化(廊道式)是指萎缩(扩张)耕地斑块与两个或两个以上的原始耕地斑块相接;收缩(蔓延式)是指萎缩(扩张)耕地斑块仅仅与一个原始耕地斑块相接;消失(飞地式)则是指萎缩(扩张)耕地斑块周边没有与任何原始耕地斑块相连接,处于完全孤立的状态(图3)。

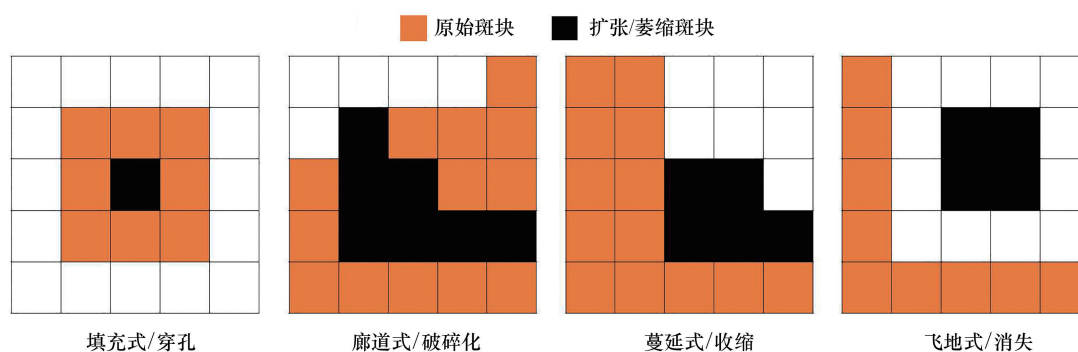


图3 景观变化空间过程类型

Fig.3 Diagram of landscape spatial change processes

2.3.2 景观变化空间过程模型

整个分析模型在 ArcGIS model builder 中实现,参考景观破碎化模型理论,构建景观变化过程模型,刻画耕地景观的扩张和萎缩过程(图4)。

首先分别对萎缩、扩张耕地像元及原始耕地像元通过八邻域法进行聚合,得到变化(萎缩/扩张)耕地斑块及景观变化(萎缩/扩张)图层1。其中,值1代表变化像元, ≥ 2 的各值分别代表不同的原始耕地斑块,图层背景值则设置为0。模型的核心包括2个重要的步骤^[23]:

第一步是将变化耕地斑块分为两组(穿孔/填充式和消失/飞地式类型为一组,破碎化/廊道式和收缩/蔓延式为一组)。首先,用焦点分析工具对景观变化图层1中变化耕地斑块计算其八邻域内不同值的个数。然后统计每一个变化耕地斑块区域内的最大值。由此得到景观变化空间过程分类图I,其中值为2的斑块为穿孔/填充式或消失/飞地式,值大于等于3的斑块为破碎化/廊道式或收缩/蔓延式类型。

第二步是进一步将变化耕地斑块分为两组(穿孔/填充式和收缩/蔓延式类型为一组,破碎化/廊道式和消失/飞地式为一组)。如图4所示,分别对两个景观变化图层进行焦点最大值和最小值分析,若某像元的焦

点最小值和其焦点最大值相等,且在该像元所在斑块内的所有像元焦点最大值都相同,那么该斑块就属于穿孔/填充式或收缩/蔓延式,而剩下的斑块为破碎化/廊道式或消失/飞地式,由此得到景观空间过程分类图 II。最后将两个分类图结合,即可将 8 种空间过程类型区分出来。

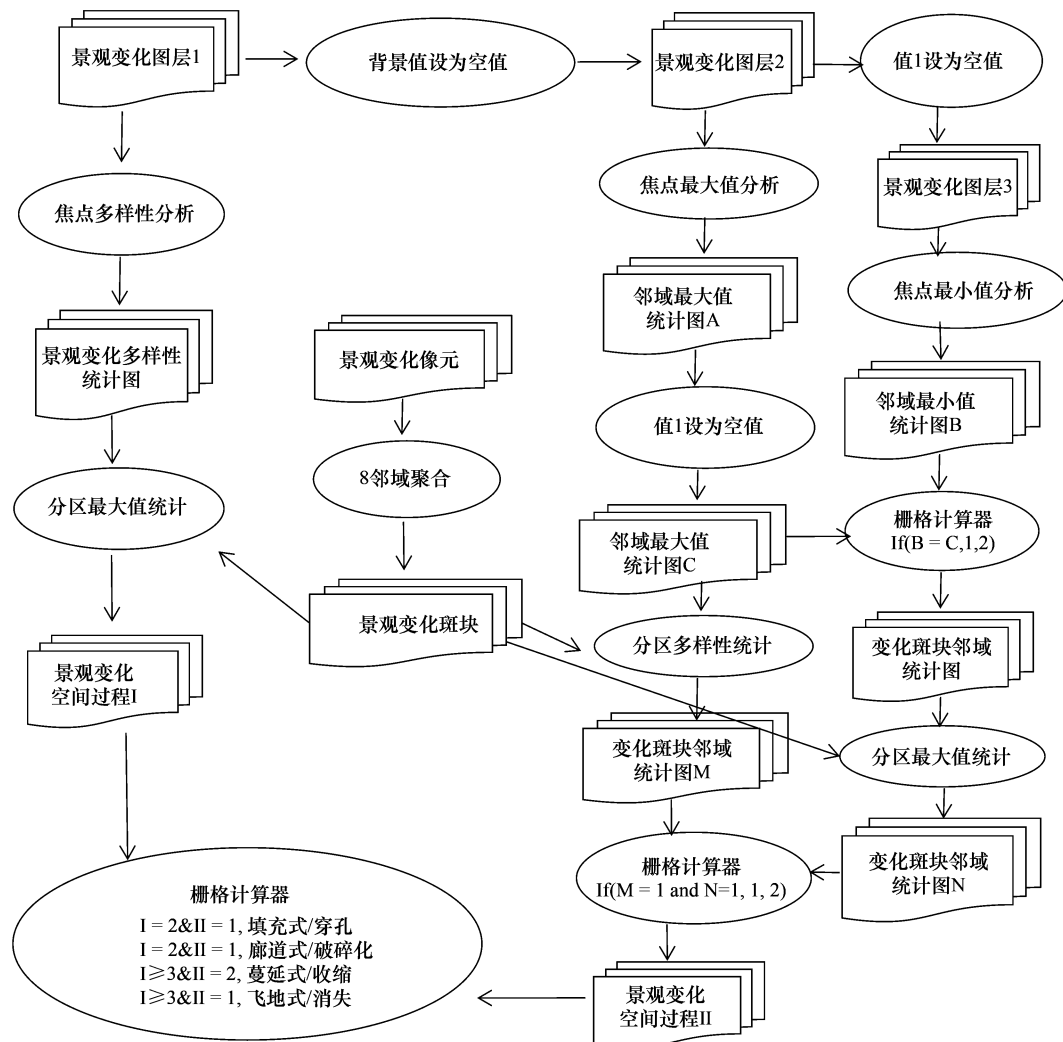


图 4 景观变化空间过程模型

Fig.4 Cultivated land change spatial processes model

当计算景观扩张空间过程时,将景观扩张斑块和景观扩张像元为输入图层;当计算景观萎缩空间过程时,将景观萎缩斑块和景观萎缩像元为输入图层

3 结果与分析

3.1 耕地时空演变特征

1990、2000、2010 和 2018 年交错区耕地面积分别为 3685.64、6873.48、6649.61 km²和 6612.64 km²。耕地主要分布在森林和草原交错过渡区域,耕地的地理位置与人类活动的城镇及周边河流水系紧密相连。额尔古纳市、牙克石市和陈巴尔虎旗的耕地数量较多,三个行政区之和占总耕地面积的 74%以上;海拉尔区、根河市耕地面积相对较小,两者之和仅占 6%左右。

交错区耕地面积总体呈现大幅增加后小幅下降并趋于稳定的规律,净增加耕地面积 2974.28 km²。耕地扩张主要发生在 1990—2000 年这一阶段,净增加速率为 323.43km²/年,耕地动态度为 8.65%。2000—2010 年,耕地面积有所下降,净减少速率为 22.3 km²/a,耕地动态度为-0.33%;2010—2018 年,耕地面积趋于稳定,

净减少速率为 $4.62 \text{ km}^2/\text{a}$, 耕地动态度仅为 -0.07% 。从趋势与变化指数来看, 研究区的耕地在各阶段均处于极度不平衡状态, 以单向转入或转出为主, 尤其是 1990—2000 年, 趋势与变化指数接近于 1。

研究区各旗县耕地变化情况不尽相同(表 1), 新巴尔虎旗的耕地处于持续扩张状态, 且扩张速度最快; 海拉尔区的耕地变化幅度不大, 较为稳定; 其他地区表现为先大幅增加后趋于稳定。1990—2000 年, 各行政区均处于极度不平衡状态, 耕地以单向转入为主, 趋势与变化指数均接近于 1; 2000—2010 年, 根河市、鄂温克族自治旗、海拉尔区以单向转出为主, 仍处于极端不平衡状态, 陈巴尔虎旗、牙克石市、新巴尔虎左旗呈现双向转换, 但仍处于不平衡状态; 2010—2018 年, 陈巴尔虎旗、海拉尔区、根河市的耕地以单向转出为主, 新巴尔虎左旗以单向转入为主, 均处于极度不平衡状态, 其它区域以单向转出为主, 处于不平衡状态。

表 1 各行政区耕地变化特征

Table 1 Characteristics of cultivated land change in each administrative region

行政区 Administrative regions	1990—2000		2000—2010		2010—2018	
	K/%	P	K/%	P	K/%	P
陈巴尔虎旗	8.42	1.00	-0.06	-0.40	-0.10	-1.00
额尔古纳市	5.12	0.99	-0.09	-0.87	0.00	-0.51
鄂温克族自治旗	30.26	0.96	-1.86	-0.97	0.00	-0.76
根河市	11.23	1.00	-1.26	-1.00	-0.08	-0.94
海拉尔区	1.43	0.97	-0.32	-0.94	-0.68	-1.00
新巴尔虎左旗	1262.20	1.00	0.01	0.35	0.07	1.00
牙克石	6.07	0.99	-0.09	-0.44	-0.07	-0.87
研究区 Study area	8.65	0.99	-0.33	-0.84	-0.07	-0.82

K: 动态变化度 Dynamic degrees; P: 趋势与状态指数 Trend and state index

3.2 耕地转移途径分析

由表 2 可知, 1990—2000 年, 耕地扩张的途径主要是占用草地、林地和湿地等自然景观。在这一时期将草地开垦为耕地是交错区耕地大幅度增加的主导因素, 占比 80.36%。新巴尔虎旗、鄂温克族自治旗、陈巴尔虎旗、额尔古纳市的开垦面积均超过 500 km^2 。林地、湿地转变为耕地主要分布在牙克石市和额尔古纳市。2000—2010、2010—2018 年两个时间段, 耕地主要通过占用湿地和草地进行扩张, 但转入量明显下降。草地转为耕地的区域主要集中在陈巴尔虎旗及鄂温克族自治旗; 湿地转为耕地主要位于牙克石市。

表 2 1990—2018 年不同耕地变化途径面积

Table 2 Area table of different cultivated land conversions from 1990 to 2018

变化类型 Land conversion	1990—2000		2000—2010		2010—2018	
	面积 Area/ km^2	比例 Percent/%	面积 Area/ km^2	比例 Percent/%	面积 Area/ km^2	比例 Percent/%
耕地扩张 Cultivated land expansion						
林地→耕地 Forest→Cultivated land	317.37	9.90	0.06	0.30	0.01	0.24
草地→耕地 Grassland→Cultivated land	2577.11	80.36	8.73	40.51	3.39	83.67
湿地→耕地 Wetland→Cultivated land	269.70	8.41	12.31	57.11	0.65	16.06
人工表面→耕地 Urban→Cultivated land	0.36	0.01	0.03	0.14	0.00	0.02
未利用地→耕地 Unused land→Cultivated land	42.34	1.32	0.42	1.94	0.00	0.00
耕地萎缩 Cultivated land decrease						
耕地→林地 Cultivated land→Forest land	1.16	5.90	2.59	1.06	0.01	0.02
耕地→草地 Cultivated land→Grassland	15.97	81.26	201.24	82.02	0.01	0.03
耕地→湿地 Cultivated land→Wetland	0.82	4.17	9.50	3.87	0.01	0.01
耕地→人工表面 Cultivated land→Urban	1.50	7.61	32.01	13.04	41.00	99.93
耕地→未利用地 Cultivated land→Unused land	0.21	1.06	0.03	0.01	0.00	0.01

1990—2000 年,耕地主要转出为草地,主要分布在鄂温克族自治旗。2000—2010 年,耕地转为草地的面积快速增长,变化趋势与政府积极实行退耕还林还草政策相一致。空间分布主要位于额尔古纳市西南部及鄂温克族自治旗。2000 年以后城市化的快速发展,耕地转为人工表面的面积也较为突出,增加区域集中分布在海拉尔区及其周边,牙克市中南部以及根河市、额尔古纳市、牙克石市三市交界处也有零星分布。2010—2018 年研究区城镇及其基础设施建设持续进行,人工表面侵占耕地成为耕地萎缩的绝对主导因素,占比为 99.93%。

3.3 耕地变化的空间过程

图 5 展示了研究期间交错区耕地变化的空间过程。1990—2018 年交错区耕地扩张由最初的飞地式扩张转变为蔓延式扩张。研究期间,飞地式扩张呈现下降的趋势(图 6),其在 1990—2000 年占新扩张耕地的 57.89%,2000—2010 年占 20.13%,2010—2018 年仅占 0.47%,说明在研究前期,耕地主要以飞地式在林草交错区无序扩张。与之相反,蔓延式扩张则呈现上升的趋势,其在 1990—2000 年占新扩张耕地的 19.58%;2000 年以后,蔓延式成为最主要的扩张类型,2000—2010 年占 40.03%,表明依靠原有耕地增长是耕地扩张过程较为稳定的组成部分,交错区的耕地更加规则,无序扩张的情况减少;2010—2018 年蔓延式占比高达 79.12%,代表此阶段耕地连片化已经形成,耕地扩张主要是作用于斑块边缘。廊道式扩张是通过连接不同的耕地斑块从而形成连片的大斑块,其在交错区的耕地扩张中呈现出先增加后下降的趋势,在 1990—2010 年占比从 22.42% 增长至 37.73%,在 2010—2018 年下降至 17.06%。廊道式在各个阶段均为第二大类型,在交错区耕地扩张过程中一直占据着重要地位。填充式是各阶段占比最少的扩张类型,2000—2010 年占比最大,也仅为 4.11%,但此模式也不容忽略,这意味着一些原被耕地包围的自然景观被完全侵蚀,耕地扩张向本底化发展。

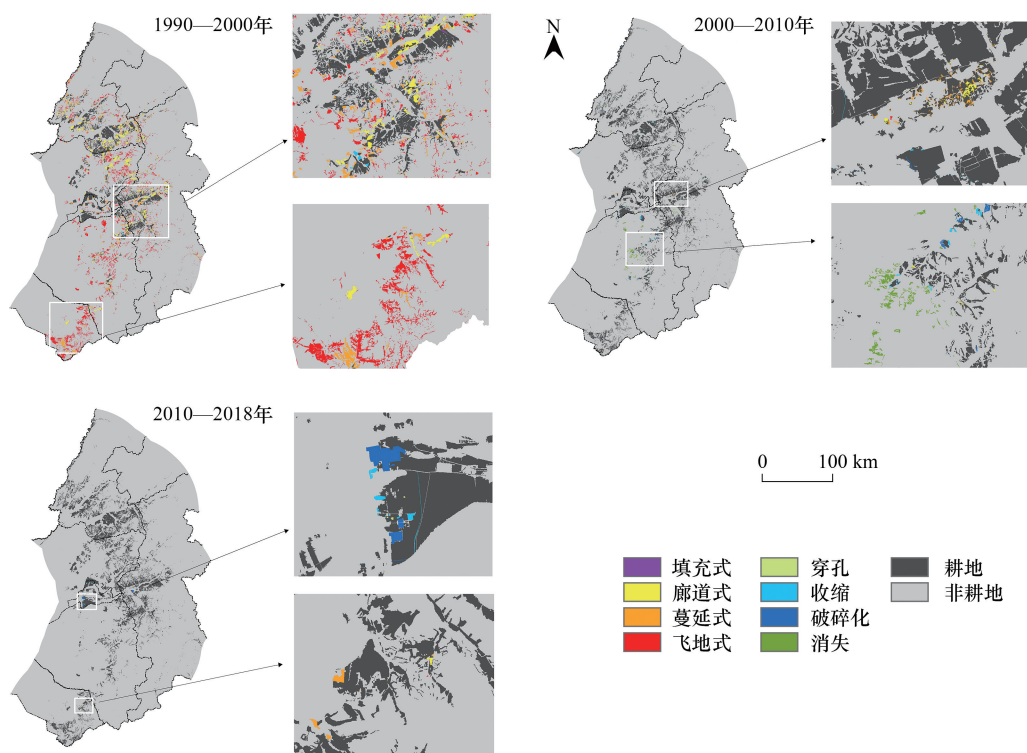


图 5 大兴安岭林草交错区耕地变化空间过程

Fig.5 Cultivated land change spatial processes in Daxinganling forest-grass ecotone during 1990 to 2018

耕地萎缩在不同的发展阶段主导方式有所不同,前期以收缩类型为主,中期是消失类型,后期则转为破碎化类型主导。1990—2018 年,收缩类型呈现出先下降后稳定的趋势;1990—2000 年,收缩类型占耕地减少面

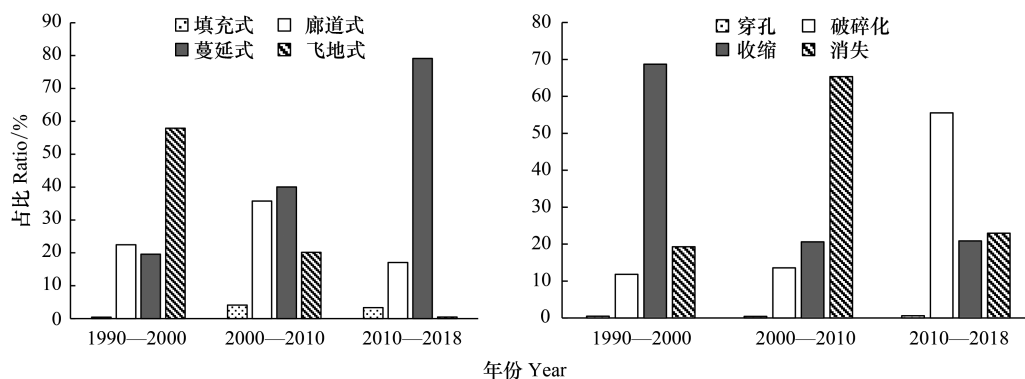


图6 大兴安岭林草交错区耕地扩张和萎缩空间过程面积占比

Fig.6 The area ratio of cultivated land expansion and loss patches experience different spatial process during three time interval

积的 68.71%,说明此阶段耕地减少主要是耕地边缘抛荒,非农活动的边缘侵蚀是耕地萎缩的主要表现形式;2000—2010 年、2010—2018 年收缩类型的占比分别为 20.63%和 20.87%。破碎化类型的占比在耕地萎缩过程中不断增加,从 1990—2000 年的 11.84%增长至 2010—2018 年的 55.54%。这说明后期一些大斑块耕地被分割成小斑块,此阶段耕地主要被人工表面侵占,道路建设分割效应明显,导致破碎化类型成为 2010—2018 年耕地萎缩的主导方式。消失类型在交错区的耕地萎缩中呈现出先增加后下降的趋势,其在 1990—2010 年由 19.31%增长至 65.35%,2010—2018 年下降至 22.96%。2000—2010 年退耕还草工程的实施,耕地斑块整体转换为草地,所以消失斑块出现了峰值,成为此阶段耕地萎缩的主导方式。穿孔在耕地萎缩占比最少的类型,在各阶段的占比均不到 1%,但整体呈现上升趋势,说明此种类型和人工表面侵占耕地密切相关。

从耕地变化过程的空间分布来看,飞地式扩张主要出现在耕地新开垦区域的新巴尔虎左旗和鄂温克族自治旗,蔓延式和廊道式扩张主要分布在额尔古纳市、牙克石市和陈巴尔虎旗等本底耕地较多的区域。研究前期和中期,收缩和消失主导耕地萎缩主要发生在鄂温克族自治旗、牙克石市和额尔古纳市,破碎化主导的后期则主要发生在海拉尔地区。

4 讨论

耕地景观格局是生物自然过程与人类干扰相互作用形成的,是各种复杂的自然和社会条件相互作用的结果^[31]。从农业发展史看,开荒垦殖,扩大耕地面积一直是社会发展的重要构成,耕地的发展是由星点式或斑块式开发转为大规模连片开发,以构造更大尺度的农田斑块或本底^[32]。1990—2018 年交错区耕地以扩张为主,飞地式是 1990—2000 年期间耕地最主要扩张过程,之后以廊道式和蔓延式为主,呈现出“飞地式-廊道/蔓延-蔓延”的扩张趋势,基本符合耕地发展“楔入”、“扩大”、“连片”、“本底化”的演化规律^[33],飞地式扩张的下降说明耕地的发展集中化和规则化的趋势已经完成。虽然很多研究者通过耕地数量、轨迹变化和空间格局特征^[14,34]也可以表征这一规律,但本研究的景观变化空间过程模型直接、定量的表达出了耕地的这一发展进程,并刻画出耕地扩张的形态和过程,这为区域耕地发展评价提供了可靠的数据支撑。

耕地的扩张方式以占用草地、林地、湿地等自然景观为主,所以耕地景观扩张的过程也就是自然景观萎缩的过程,耕地景观填充式、廊道式、蔓延式和飞地式的扩张过程分别对应的是自然景观消失、破碎化、收缩和穿孔的萎缩过程。耕地“飞地式-廊道/蔓延-蔓延”的扩张趋势意味着研究期间交错区自然景观的萎缩呈现“穿孔-破碎化/收缩-收缩”的演变过程。整个过程基本符合 Forman 景观退化的理论规律:穿孔在景观退化前期较为重要,中期进入破碎化和缩小阶段,末期是消失阶段^[35]。耕地的填充式扩张整体比例较小,说明自然景观萎缩未发生大面积的消失过程,萎缩尚未进入末期。值得注意的是,1990—2000 年交错区的耕地景观主要以飞地式的方式进行大规模扩张,这意味着此时期自然景观的萎缩一直以穿孔的方式进行。Forman 认为穿

孔过程多出现于散布模式中,而散布模式被部分学者认为是景观生态学上最差的一种模式,因为这种模式会过早的使自然景观丧失所有的大斑块^[36]。对于以飞地式为主要扩张方式的新巴尔虎左旗和鄂温克族自治旗,不仅应作为下一步退耕工程的主要区域,其自然景观的生态功能变化亟需深入研究。本文对景观空间过程的刻画,为景观生态功能与景观变化空间过程的研究提供了数据支撑。

与扩张相比,研究区耕地的萎缩进程较为缓慢。耕地的萎缩过程从收缩开始,而不是穿孔,究其原因,耕地作为人工景观,其变化受人为政策和人为活动影响较大。通过叠加耕地的转出途径和空间过程图可以看出,1990—2000 年的耕地萎缩以是耕地边缘的收缩为主;2000—2010 年以消失为主导的耕地萎缩和“退耕还草”政策关系密切^[6,28];2010—2018 年的破碎化过程与人工表面侵占耕地的趋势相一致。不同的人工干扰方式可能会导致不同耕地过程的出现,明确各干扰因素主要通过何种过程作用于景观斑块应是接下来的研究方向。这可以为耕地保护和土地规划提供强有力的指导,如海拉尔周边区域人工表面占用耕地等问题较为突出,耕地萎缩以主要破碎化方式进行,应受到重点关注。

景观变化空间过程模型主要是通过原景观斑块和变化斑块的空间关系定量表达景观的变化空间过程,该模型基于 ArcGIS 八邻域算法,定义像元之间的连通性,不需要人为设定缓冲阈值,不受斑块面积和几何形状影响,可用于多种景观类型。与其他学者常用的景观扩张指数比^[17—20,37],该模型还可以识别出廊道式这一特殊扩张过程。从研究结果可以看出,廊道式扩张在各个阶段均占有重要比例,该类型虽然可以看作是蔓延式扩张的一个变种,但在某些方面,如森林恢复中的防火、防风林带、建设用地扩张中的道路连通以及生态廊道建立方面具有一定的研究价值。景观变化空间过程模型也有一定的局限性,在实际的应用中,数据基本来源于遥感影像的解译,数据格式呈现栅格结构,斑块的最小面积取决于遥感影像的分辨率,这使得变化面积较小的斑块信息不易被捕捉。此外,影像解译数据的误分会导致景观变化空间过程的误分,所以遥感影像的分类精度对景观变化空间过程的准确性有很大影响。

5 结论

本研究以大兴安岭林草交错区为研究对象,利用耕地变化动态度、趋势和状态和景观变化空间过程模型,对 1990—2018 年的耕地时空演变和变化空间过程进行量化分析,主要得出结论如下:

(1) 1990—2018 年,耕地扩张是大兴安岭林草交错区耕地景观演变的主要趋势,耕地面积呈现出先大幅增加后小幅下降并趋于稳定的发展历程。研究区的耕地在各阶段均处于极度不平衡状态,以单向转入或转出为主,其中新巴尔虎左旗在研究各阶段均以单向转入为主。

(2) 开垦草地是耕地扩张的主要途径,广泛分布于所有行政区内,其中新巴尔虎旗和鄂温克自治旗的耕地扩张速度尤为显著。2000 年之前,耕地以飞地式无序扩张,2000 年之后,向廊道式和蔓延式扩张转变。退耕还草工程的实施和人工表面的增加是耕地减少的主要原因,前者主要发生在鄂温克族自治旗,主要以消失方式进行;后者则主要发生在海拉尔等城市发展较快的区域,以破碎化方式为主导。

(3) 景观变化空间过程模型能够有效的刻画出耕地变化的空间过程,为准确的认识耕地变化空间过程提供了一条科学、快速的量化途径。但是,此模型高度依赖影像分辨率和土地利用的分类精度,影像分辨率和地类精度的提高可以帮助进一步深入探讨景观变化空间过程,更详细的揭示耕地景观格局的空间变化特征。

参考文献 (References):

- [1] 甘爽,肖玉,徐洁,王洋洋,余付勤,谢高地. 呼伦贝尔草原草甸生态功能区建设效益评价. 生态学报, 2019, 39(16): 5874-5884.
- [2] 李旭亮,杨礼箫,田伟,胥学峰,贺缠生. 中国北方农牧交错带土地利用/覆盖变化研究综述. 应用生态学报, 2018, 29(10): 3487-3495.
- [3] Li A, Wu J G, Huang J H. Distinguishing between human-induced and climate-driven vegetation changes: a critical application of RESTREND in Inner Mongolia. Landscape Ecology, 2012, 27(7): 969-982.
- [4] 刘琼玉,程全国,魏建兵,顾广贺. 大兴安岭地区生态系统完整性动态评价. 应用生态学报, 2019, 30(9): 3119-3125.
- [5] 刘立成,卢欣石,吕世海,林栋. 呼伦贝尔森林-草原交错区景观持续性分析. 草业科学, 2008, 25(3): 119-124.

- [6] 王治良, 路春燕. 呼伦贝尔草原区土地利用及景观格局变化特征分析. 干旱区资源与环境, 2015, 29(12): 91-97.
- [7] 李晶, 刘乾龙, 刘鹏宇. 1998-2018 年呼伦贝尔市植被覆盖度时空变化及驱动力分析. 生态学报, 2022, 42(1): 220-235.
- [8] 耿晓庆, 胡兆民, 赵霞, 沈海花, 方精云. 内蒙古呼伦贝尔草原湖泊变化研究. 干旱区地理, 2021, 44(2): 400-408.
- [9] 朱晓昱, 王宗明, 徐大伟, 沈贝贝, 丁蕾, 邵长亮, 王旭, 陈宝瑞, 辛晓平. 呼伦贝尔草原生态功能区土地利用变化及驱动力分析. 中国农业资源与区划, 2020, 41(4): 74-82.
- [10] 张德平. 内蒙古呼伦贝尔市土地利用现状及变化分析. 中国土地科学, 2011, 25(11): 43-48.
- [11] Yang G, Xue L Q, He X L, Wang C, Long A H. Change in land use and evapotranspiration in the Manas River Basin, China with long-term water-saving measures. Scientific Reports, 2017, 7(1): 17874.
- [12] 朱磊, 杨爱民, 夏鑫鑫, 武红旗. 基于空间自相关的 1975-2015 年玛纳斯河流域耕地时空特征变化分析. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(6): 887-899.
- [13] Wang H, Stephenson S R, Qu S J. Modeling spatially non-stationary land use/cover change in the lower Connecticut River Basin by combining geographically weighted logistic regression and the CA-Markov model. International Journal of Geographical Information Science, 2019, 33(7): 1313-1334.
- [14] Su S L, Ma X Y, Xiao R. Agricultural landscape pattern changes in response to urbanization at ecoregional scale. Ecological Indicators, 2014, 40: 10-18.
- [15] Sun B, Zhou Q M. Expressing the spatio-temporal pattern of farmland change in arid lands using landscape metrics. Journal of Arid Environments, 2016, 124: 118-127.
- [16] Wu J G, Hobbs R. Key issues and research priorities in landscape ecology: an idiosyncratic synthesis. Landscape Ecology, 2002, 17(4): 355-365.
- [17] 刘稼丰, 焦利民, 董婷, 许刚, 张博恩, 杨璐迪. 一种新的城市景观扩张过程测度方法: 多阶邻接度指数. 地理科学, 2018, 38(11): 1741-1749.
- [18] 刘小平, 黎夏, 陈逸敏, 秦雁, 李少英, 陈明辉. 景观扩张指数及其在城市扩展分析中的应用. 地理学报, 2009, 64(12): 1430-1438.
- [19] 张丽芳, 方创琳, 高倩. 天山北坡城市群城市景观时空扩张过程及多情景模拟. 生态学报, 2021, 41(4): 1267-1279.
- [20] 武鹏飞, 周德民, 宫辉力. 一种新的景观扩张指数的定义与实现. 生态学报, 2012, 32(13): 4270-4277.
- [21] 张安琪, 夏畅, 林坚, 楚建群. 景观演化特征指数及其应用. 地理科学进展, 2018, 37(6): 811-822.
- [22] Jiao L M, Mao L F, Liu Y L. Multi-order landscape expansion index: characterizing urban expansion dynamics. Landscape and Urban Planning, 2015, 137: 30-39.
- [23] Li S J, Yang B. Introducing a new method for assessing spatially explicit processes of landscape fragmentation. Ecological Indicators, 2015, 56: 116-124.
- [24] Ren X Y, Lv Y Y, Li M S. Evaluating differences in forest fragmentation and restoration between western natural forests and southeastern plantation forests in the United States. Journal of Environmental Management, 2017, 188: 268-277.
- [25] Yang S, Mountraki G. Forest dynamics in the U.S. indicate disproportionate attrition in western forests, rural areas and public lands. PLoS One, 2017, 12(2): e0171383.
- [26] 吕世海, 刘立成, 高吉喜. 呼伦贝尔森林-草原交错区景观格局动态分析及预测. 环境科学研究, 2008, 21(4): 63-68.
- [27] 中华人民共和国土地覆被地图集编辑委员会. 中华人民共和国土地覆被地图集(1:1000000). 北京: 中国地图出版社, 2017.
- [28] 冒许鹏, 刁娇娇, 范佳辉, 吕莹莹, 徐网谷, 王智, 李明诗. 内蒙古大兴安岭林草交错带景观动态分析. 生态学报, 2021, 41(21): 8623-8634.
- [29] 王思远, 刘纪远, 张增祥, 周全斌, 赵晓丽. 中国土地利用时空特征分析. 地理学报, 2001, 56(6): 631-639.
- [30] 任芯雨, 吕莹莹, 巫颖伟, 李明诗, 李卫正. 人工林与天然林破碎化过程差异对比——以美国华盛顿州和密西西比州为例. 生态学报, 2017, 37(2): 474-484.
- [31] Müller D, Leitão P J, Sikor T. Comparing the determinants of cropland abandonment in Albania and Romania using boosted regression trees. Agricultural Systems, 2013, 117: 66-77.
- [32] Matson P A, Parton W J, Power A G, Swift M J. Agricultural intensification and ecosystem properties. Science, 1997, 277(5325): 504-509.
- [33] 付梅臣, 胡振琪, 吴淦国. 农田景观格局演变规律分析. 农业工程学报, 2005, 21(6): 54-58.
- [34] 赵锐锋, 王福红, 张丽华, 李鸿伟. 黑河中游地区耕地景观演变及社会经济驱动力分析. 地理科学, 2017, 37(6): 920-928.
- [35] Forman R T T. Some general principles of landscape and regional ecology. Landscape Ecology, 1995, 10(3): 133-142.
- [36] 肖笃宁, 李秀珍, 高峻, 常禹, 张娜, 李团胜. 景观生态学. 北京: 科学出版社, 2003: 1-224.
- [37] Liu X P, Li X, Chen Y M, Tan Z Z, Li S Y, Ai B. A new landscape index for quantifying urban expansion using multi-temporal remotely sensed data. Landscape Ecology, 2010, 25(5): 671-682.