西北林学院学报 2022,37(3):139-148
Journal of Northwest Forestry University

doi:10.3969/j.issn.1001-7461.2022.03.20

基于 Markov-PLUS 模型的柴北缘土地利用变化及模拟分析

王佳楠[1,2],张　志[2*]

(1.青海省青藏高原北部地质过程与矿产资源重点实验室,青海 西宁 810000;
2.中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院,湖北 武汉 430074)

摘　要:以柴达木盆地北缘为研究区域,分析近 30 a 柴北缘土地利用时空变化,可为区域生态环境保护 、土地利用方式优化提出建议。基于 1990、2000、2010、2020 年 4 期 Landsat 影像数据,获取土地利用空间分布数据,借助转移矩阵、重心模型对近 30 a 柴北缘土地利用时空变化及驱动力计算分析,利用 Markov-PLUS 复合模型对 2040 年柴北缘土地利用变化进行预测和模拟。结果表明:1)未利用地、林地、水域是柴北缘的主要用地类型。近 30 a 耕地面积缓慢增加,重心向西南方向移动,建设用地面积增长迅速,林地、草地、水域面积总体呈上升趋势,重心都向西北方向移动,未利用地面积持续下降。2)使用 FLUS 模型与 Markov-PLUS 模型分别预测柴北缘 2020 年土地利用情况并对比分析,Markov-PLUS 模型比 FLUS 模型的模拟准确性更高。3)2040 年多情景模拟结果表明,柴北缘土地利用整体格局一致性较高,城镇发展和耕地保护情景下均会挤占林地、草地,对可持续发展造成威胁,在区域生态安全建设中应加以重视。PLUS 模型与 Markov 模型相结合,实现了对未来土地利用斑块级的精准预测,可为未来提升柴北缘生态退化整治效果、城镇开发边界与生态保护红线的制定与规划等提供科学决策参考。

关键词:柴达木盆地北缘;土地利用;Markov-PLUS 模型;Landsat
中图分类号:S771.8　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1001-7461(2022)03-0139-10

Land Use Change and Simulation Analysis in the Northern Margin of the Qaidam Basin Based on Markov-PLUS Model

WANG Jia-nan[1,2], ZHANG Zhi[2*]

(1. *Key Laboratory of the Northern Qinghai-Tibet Plateau Geological Processes and Mineral Resources, Xining* 81000, *Qinghai, China*;
2. *Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan* 430074, *Hubei, China*)

Abstract: Taking the northern margin of the Qaidam Basin as the study area, the spatio-temporal changes and transformations of land use in the past 30 years were analyzed. Suggestions for regional eco-environmental protection and land use optimization were put forward. Based on the 4-period Landsat images of 1990, 2000, 2010 and 2020, the spatial distribution data of the land use were obtained. Using transfer matrix and barycenter model, the spatial and temporal changes of land use were analyzed and the land use pattern in 2040 was simulated by using the Markov-PLUS model. The results showed that 1) unused land, woodland and water area were the main land use types in the region. In the past 30 years, the area of cultivated land increased slowly, the key areas of different land use types moved to the southwest, the area of construction land increased rapidly, the area of woodland, grassland and water area increased generally, and the key area moved to the northwest. The area of unused land continued to decline. 2) FLUS model and Mark-

收稿日期:2021-10-27　**修回日期**:2021-11-28
基金项目:青海省青藏高原北部地质过程与矿产资源重点实验室专项基金(2019-kz-01);青海省科技厅创新平台建设专项项目(2019-ZJ-T04)。
第一作者:王佳楠。研究方向:资源环境遥感。E-mail:562265952@qq.com
*通信作者**:张　志,教授,硕士生导师。研究方向:遥感地质。E-mail:171560655@qq.com

ov-PLUS model were used to forecast the land use in 2020 and the results were compared. The simulation precision of Markov-PLUS model was higher than that of FLUS model. 3) The results of multi-scenario simulation in 2040 showed that the overall pattern of land use in the region would be highly consistent, and both urban development and cultivated land conservation scenarios would threaten the sustainable development of the region, attention should be paid to the construction of regional ecological security. The combination of PLUS model and the Markov model can realize the accurate prediction of future land use in patch level, it provides scientific decision-making reference for improving the effect of ecological degradation management, planning urban development boundary and ecological protection red line in the future.

Key words: northern margin of the Qaidam basin; land use; Markov-PLUS model; Landsat

土地利用/土地覆盖变化与地区生态环境变化密切相关[1-3]，反映着人类与环境的相互作用关系。改革开放以来，中国工业化和城镇化取得了举世瞩目的成就，但也带来了一系列的问题，这些问题推动了土地利用规划、土地利用评价等相关研究[4-6]。因此，分析区域土地利用的变化模式及其原因，对于区域经济与生态环境可持续发展意义重大。

我国在土地利用变化方面的研究多集中在驱动机制、生态环境效应和模型等方面[7-10]，主要服务于社会与经济建设。近年来，越来越多的研究表明：使用土地利用预测模型对区域未来时空格局发展与演进进行模拟分析，是探究土地利用变化驱动因素的重要方法，也被认为是全球环境变化研究的热点[11-12]。目前国内外主流的土地利用变化模型包括CA-Markov 模型、Logistic 回归模型、CLUE-S 模型、FLUS 模型、系统动力学模型[13-17] 等。PLUS (patch-generating land use simulation)模型是一种新兴的土地利用预测模型[18]，可以较精确地模拟不同年份、不同环境下的土地利用斑块级的变化，并挖掘其驱动因素。但该模型需要土地利用需求以运行模拟，土地利用需求主要由数值模型进行模拟，其中Markov 模型应用最为广泛。由于 Markov 模型在数量预测方面精度较高[19]，将 PLUS 模型与 Markov 模型集成，可以很好地实现对区域土地利用时空变化的模拟。

在干旱区土地利用研究这一热点，不同学者从生境质量评估、土地覆被变化等切入点研究取得了大量成果[20-21]。但是针对土地利用模拟及其变化的驱动因素研究还略显不足，主要由于模型的限制，以往的土地利用模拟研究多集中在农业区、城市群、小流域等高地表覆盖区域[22-24]，对于低植被覆盖干旱区土地利用变化模拟及其驱动机制的分析研究较为薄弱。Markov-PLUS 模型与近年来常用的 FLUS 模型、CA-Markov 模型相比，在保留了 FLUS 模型自适应惯性机制和轮盘竞争机制的基础上进一步改进，采用随机森林算法获取各地类的发展概率，同时弥补了 CA-Markov 模型在探索土地利用转化规则挖掘的不足，以及难以时空动态地模拟林地、草地等自然用地类型斑块级变化的缺点。研究区域的地理位置具有代表性，区内巴音河流域是整个柴达木盆地最为重要的生态农业牧业区，同时德令哈市作为整个海西州的首府，是区域人口与经济中心。近年来区域经济快速发展，第二产业涨势迅猛，工业和农业用水不断挤占生态需水，人地矛盾突出，势必会对生态环境造成一定的影响。为揭示区域土地利用演化规律，探明区域土地利用演化的驱动机制，本研究在分析柴达木盆地北缘近 30 a 土地利用变化规律的基础上采用 Markov-PLUS 模型，在验证模型精度的同时模拟区域 2040 年土地利用格局，以期实现区域可持续发展科学布局，为区域的生态环境保护、资源有效利用和国土空间规划编制提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

柴达木盆地北缘位于青海省中北部，青藏高原北部边缘(36°36′－37°27′N，96°38′－99°24′E)，总面积 1 万 km^2，海拔 2 700～4 600 m，行政区划包括德令哈市、乌兰县、柯鲁柯镇、尕海镇等 7 镇 1 乡(图 1)。区内有巴音河流域从祁连山南坡穿过宗务隆山，先后经过蓄集乡、德令哈市、尕海镇，最后流向柯鲁柯湖。柴北缘年平均降水量 177 mm，6－9 月降雨较多，平均降水量超过 108 mm。全年蒸发量达 2 439.4 mm，为降水量的 16.4 倍。年平均气温 3.6 ℃。年日照时间在 3 000 h 以上。随着人口的增加，工业化和城镇化的加快，区域生态环境安全面临极大的挑战。

1.2 数据

数据主要包括行政区划、遥感影像等基础数据及驱动因子数据。本研究遥感数据为 1990、2000、2010 年及 2020 年 4 期 Landsat 影像。在 ENVI 5.5 中对原始影像进行辐射定标、大气校正、镶嵌、裁剪等预处理工作。4 期影像色调均匀、云覆盖低

于 5%。根据第 3 次全国土地调查的分类体系结合实地调查,将土地利用类型分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 类。利用随机森林算法进行监督分类得到 4 期土地利用结果,进一步结合野外考察及高分辨率影像对结果进行修正,用总体精度和 Kappa 系数对处理结果进行验证,分类精度均在 95%以上(表 1)。构建预测模型时综合考虑柴北缘社会经济、交通区位、地形地貌和气候要素,共选取 11 项作为驱动因子及保护区数据作为限制因子,在 Arcgis 中将其栅格化后统一重采样至 30 m 分辨率。相关数据具体情况见表 2。

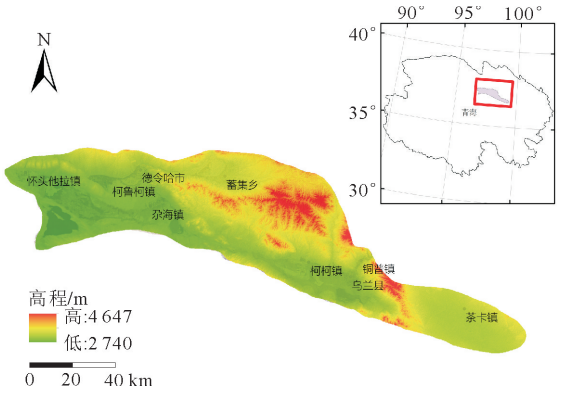


图 1　研究区地理位置

Fig. 1　Location of the research are

表 1　土地利用分类精度

Table 1　Accuracy of land use classification

年份	总体精度 OA(%)	Kappa 系数
1990	97.54	0.96
2000	98.74	0.97
2010	98.44	0.97
2020	99.22	0.98

1.3　研究方法

1.3.1　*土地利用重心迁移模型*　土地利用重心迁移模型[25]可以揭示土地类型时空变化过程,直观地反映地类变化的方向,其表达式为

$$X_t=\frac{\sum_{i=1}^{n}X_iA_{ti}}{\sum_{i=1}^{n}A_{ti}},Y_t=\frac{\sum_{i=1}^{n}Y_iA_{ti}}{\sum_{i=1}^{n}A_{ti}} \tag{1}$$

式中:X_t、Y_t 表示 t 年某地类重心的横纵坐标;A_{ti} 表示第 t 年第 i 个图斑的面积。

1.3.2　*转移矩阵及动态度*　土地利用转移矩阵用来直观地表示各种土地类型的转移方向[26],从而更好地理解各地类的时空变化过程。其表达式为

$$S_{ij}=\begin{pmatrix}s_{11} & \cdots & s_{1n}\\ \vdots & \ddots & \vdots\\ s_{n1} & \cdots & s_{nn}\end{pmatrix} \tag{2}$$

式中:S_{ij} 是研究期内 i 土地类型转化成 j 类土地类型的面积,n 为土地利用的总数。

土地利用动态度[27]是计算某种地类单位时间内变化幅度的指标,可以表示土地利用变化速率。其表达式为

$$K=\frac{U_2-U_1}{U_1T}\times 100\% \tag{3}$$

式中:K 为土地利用动态度;T 为研究时段长;U_1、U_2 分别为某土地类型变化前与变化后的面积。

表 2　数据类型及来源

Table 2　Information of data

类型	名称	来源
基础数据	研究区行政边界	中科院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn)
	遥感影像(1990、2000、2010、2020)	美国地质调查局(https://www.usgs.gov/)
	土地利用数据(1990、2000、2010、2020)	由遥感影像监督分类获得
驱动因子数据	人口	全球变化研究数据出版系统(http://www.geodoi.ac.cn)
	GDP	
	到公路距离	OpenStreetMap (https://www.openstreetmap.org/)
	到铁路距离	
	到车站距离	
	到政府驻地距离	
	到水域距离	
	Dem	SRTM30
	坡度	
	年均气温	WorldClim v2.0(http://www.worldclim.org/)
	年均降水量	
限制因子数据	柯鲁柯湖-托素湖保护区边界	中国自然保护区资源共享平台(http://www.papc.cn)

1.3.3　*用地需求规模预测*　采用 Markov 模型对研究区未来各用地类型的需求规模进行预测[28]。Markov 模型在土地利用变化研究中假设第 $t+1$ 时相土地利用格局只受 t 时相的影响,从而进行模拟预测。具体过程如下表示:

$$S_{t+1}=\boldsymbol{P}_{ij}\times S_t \tag{4}$$

式中:S_t 和 S_{t+1} 分别表示 t 时相和 $t+1$ 时相土地的状态,t 为年;$\boldsymbol{P}_{ij}$ 是状态转移概率矩阵,表示 i 用地类型转移为 j 用地类型的概率。

1.3.4　*土地利用格局预测*　PLUS 模型是基于土地扩展分析策略(LEAS)的规则挖掘框架和多类型随机斑块种子(CARS)的 CA 模型所构建的[29],与其他模型相比,LEAS 简化了土地利用变化的分析,同时保持了支持多种类型、复杂土地利用变化的能力,可以更好地模拟林草等自然用地斑块级的变化,

准确度更高。

1)基于土地扩展分析策略的规则挖掘框架

LEAS将2个时期的土地利用数据进行叠加，从土地利用数据的后期数据中提取具有变化状态的单元格，代表每个土地利用类型的变化区域。采用双决策随机森林分类算法将各土地利用类型转换规则的挖掘转化为1个二元分类问题(获得各土地利用类型的变化概率和惯性概率)，以此挖掘其变化与多种驱动因素之间的关系。表达式为：

$$P^{d}_{i,k(x)} = -P^{d}_{i,k(x)} = \frac{\sum_{n=1}^{M} I(h_n(\boldsymbol{x}) = d)}{M} \quad (5)$$

式中：$P^{d}_{i,k(x)}$是k地类在i单元的发展概率；d的值为0或1，值为1表示还有其他土地利用类型改为土地利用类型k，而0表示其他过渡；$\boldsymbol{x}$是由多个驱动因子组成的向量；i是决策树的指示函数；$h_{n(x)}$是向量x的第n个决策树的预测类型；M是决策树的总数。

2)多类型随机斑块种子的CA模型总体转换概率$OP^{d=1,t}_{i,k}$公式是

$$OP^{d=1,t}_{i,k} = P^{d}_{i,k(x)} \times \Omega^{t}_{i,k} \times D^{t}_{k} \quad (6)$$

式中：$\Omega^{t}_{i,k}$表示未来k类土地利用需求的影响，后者是一个自适应驱动系数，取决于迭代t处的当前土地数量与土地利用的目标需求k之间的差距；D^{t}_{k}表示单元i的邻域效应，后者是下一个邻域内k类土地利用成分的覆盖比例。其中，邻域因子参数介于[0,1]，用地扩展能力与领域因子成正比；按各用地类型扩张占比计算，各类用地邻域因子参数见表3。

表3 邻域因子参数

Table 3 Neighborhood factor parameter

用地类型	耕地	林地	草地	建设用地	水域	未利用地
领域因子参数	0.02	0.002	0.004	0.15	0.33	0.5

采用基于阈值下降的类型随机斑块播种机制，通过总体概率的计算过程实现。这种机制通过统计模拟算法在依据土地邻域效应，在每种地类的生长概率曲面上产生变化的“种子”，种子可能产生一个新的土地利用类型，并生长成新的斑块，这些斑块由一组具有相同土地利用类型的细胞组成。并用竞争过程的阈值递减规则控制多个土地利用斑块的产生。

1.3.5 土地利用模拟多情景设置 总结相关政策、规划文本统筹的土地利用管理导向，并结合前人成果，本研究设置了4种不同土地利用变化情景用于预测模拟。趋势发展情景：根据现有发展趋势外推，参数不作调整；城镇发展情景：耕地、林地、草地转为建设用地的面积增加，建设用地转为其余地类的面积减少，模拟结果建设用地的预测量增多；耕地保护情景：林地、草地、未利用地转为耕地的面积增加，耕地转为这些用地类型的面积减少，模拟结果耕地的预测量增多；生态保护情景：适当增加未利用地、耕地向林地、草地、水域的转移，减少林地、草地、水域向其他地类的转移，提高模拟年份林地、草地、水域的预测量。4种情景的转换成本矩阵见表4，其中a～f依次表示6种土地利用类型；0表示不能转化；1表示允许转化。

表4 转移成本矩阵

Table 4 Cost matrix of conversion

	趋势发展情景						城镇发展情景						耕地保护情景						生态保护情景					
	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f
a	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
b	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0
c	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0
d	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0
e	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
f	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

1.3.6 模拟精度验证 将2010年的土地利用结果输入Markov-PLUS模型运行得到2020年土地利用情形，采用FOM值对模拟结果进行验证，并与FLUS模型(基于人工神经网络的CA模型)进行比较。FLUS模型已被广泛用于不同尺度(区域、大陆和全球)的不同地区的模拟，并能获得比其他传统模型如CLUE-S、ANN-CA和Logistic-CA更高的模拟精度。将目视解译实际土地利用数据(2020)与随机森林(RF)分类结果以及2个模型的模拟结果进行了比较。图2中的a、b、c、d分别代表以上4种情况。可明显观察到Markov-PLUS的运行结果与目视解译土地利用结果相似度较高，模拟效果较好(FOM=0.236 6)。因b(2)、c(2)、d(2)显示随机森林分类结果和2个模型模拟结果的局部放大图。结

果表明,Markov-PLUS 的模拟结果得到的错误斑块较小且均匀地散布在整个研究区域,FLUS 则有许多明显和较大的错误斑块,此光伏发电设施均没有得到准确预测。Markov-PLUS 模型与 FLUS 模型的 FOM 值进行了比较(0.236 6 vs 0.167 4),说明 Markov-PLUS 模型在土地利用预测方面优于传统模型。得到的 Kappa 系数为 0.861,总体精度为 0.855,由此可知 Markov-PLUS 模型模拟精度较高,在本研究区适用性较好。

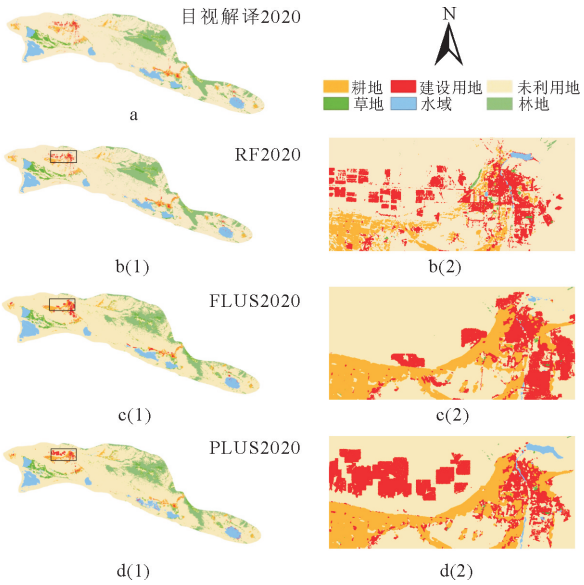


图 2　Markov-PLUS 模型与 FLUS 模型模拟结果对比

Fig. 2　Comparison of results between Markov-PLUS model and FLUS model

2　结果与分析

2.1　柴达木盆地北缘土地利用数量变化分析

根据 1990、2000、2010、2020 年 4 期土地利用数据,得到土地利用面积及动态度变化情况。由图 3、图 4 知,面积由大到小为未利用地>林地>水域>草地>耕地>建设用地,变化面积为未利用地>林地>建设用地>草地>耕地>水域。其中草地和水域面积先减少后增加,且增速逐渐加快;林地面积总体上波动增加,各项环境保护措施及政策在研究区全面开展,初见成效;耕地面积先增加后减少,建设用地变化速度最快,保持较为快速的增长;未利用土地主要为沙地及盐碱地,其面积在不断减少。总体来说,在城镇化水平不断提高,人口数量不断增加,经济不断发展的背景下,柴北缘也在积极响应生态文明建设,林草水面积总体呈增加趋势,耕地面积近十年来呈下降趋势,未利用地的开发更合理更高效。

2.2　柴达木盆地北缘土地利用结构变化分析

由表 5 可知,1990－2000 年,草地和林地向未利用地转化较多,分别转化了 40.36、200.95 km^2,在此期间,草地退化较为严重,主要原因是气候变暖及农牧业技术的驱动导致的开垦;2000－2010 年,未利用地向林地转化较多,天然林保护工程和防沙治沙政策的落实是其主要原因,其次是建设用地由未利用地转化 25.58 km^2,转化比例时期面积的 74.9%;2010－2020年,建设用地持续增加,其主要

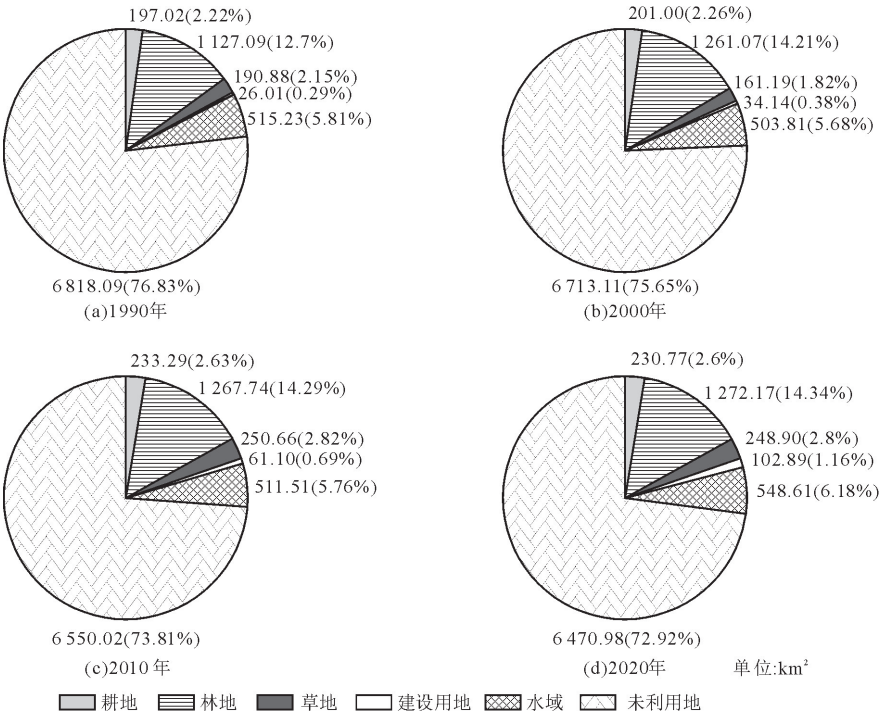


图 3　各类土地面积变化

Fig. 3　The change of land use area

来源是未利用地和耕地，主要是由于研究区人口的不断增加，社会经济高速发展和快速城镇化导致建设用地的压力不断增大，尤其是在近 10 a 中建设大量光伏发电设施。耕地向林地转化面积增加，原因是在该时段研究区实施了退耕还林政策，收效显著。在 3 个时段内，草地与林地与未利用地之间互有转化，除 1990－2000 年期间有部分草地退化外，未利用地转化为草地和林地的方向更为突出。水域的增加面积主要由未利用地和草地转化而来。建设用地转化特征最为明显，整个研究时间段内主要由未利用地和耕地转化而来。总体来说，1990－2000 年研究区草地面积出现下降，生态环境质量倒退；2000－2010 年实施防沙治沙工程收到了一定成效；2010－2020 年林地草地水域面积不断增加，同时建设用地的快速扩张，反映了生态环境保护措施初见成效，生态环境得到治理。

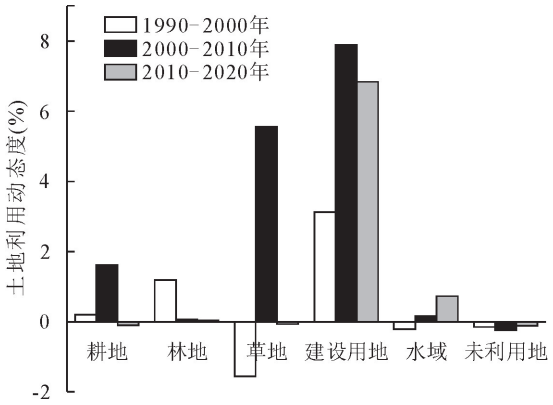


图 4 各类土地利用动态度变化

Fig. 4 Changes in land use dynamics

表 5 土地利用面积转移矩阵

Table 5 Transformation of land use types

km²

时期	耕地	林地	草地	建设用地	水域	未利用地	总计
1990－2000 年							
耕地	141.19	12.73	1.74	3.27	0.02	42.04	201.00
林地	13.32	872.03	47.33	1.12	3.36	323.91	1 261.07
草地	3.30	39.72	95.93	0.04	2.66	19.55	161.19
建设用地	5.57	1.35	0.14	12.64	0.01	14.44	34.14
水域	0.05	0.31	5.38	0.03	477.96	20.08	503.81
未利用地	33.59	200.95	40.36	8.92	31.22	6 398.08	6 713.11
总计	197.02	1 127.09	190.88	26.01	515.23	6 818.09	8 874.32
2000－2010 年							
耕地	148.49	23.07	3.03	6.65	0.02	52.03	233.29
林地	11.56	892.50	49.62	1.10	1.17	311.80	1 267.74
草地	4.57	89.98	80.30	0.68	1.81	73.32	250.66
建设用地	7.09	1.95	0.06	17.11	9.30	25.58	61.10
水域	0.29	7.24	7.73	0.15	432.61	63.49	511.51
未利用地	29.01	246.32	20.45	8.46	58.90	6 186.89	6 550.02
总计	201.00	1 261.07	161.19	34.14	503.81	6 713.11	8 874.32
2010－2020 年							
耕地	123.47	16.26	6.20	6.62	1.13	77.09	230.77
林地	16.16	876.82	84.33	1.86	1.95	291.05	1 272.17
草地	4.85	83.73	102.22	0.51	14.99	42.61	248.90
建设用地	11.11	1.07	1.02	24.37	2.94	62.38	102.89
水域	0.16	0.52	1.09	7.36	457.37	82.10	548.61
未利用地	77.54	289.34	55.79	20.37	33.14	5 994.80	6 470.98
总计	233.29	1 267.74	250.66	61.10	511.51	6 550.02	8 874.32
1990－2020 年							
耕地	102.21	18.52	3.70	4.78	0.79	100.77	230.77
林地	15.44	763.17	43.29	0.98	0.87	448.40	1 272.17
草地	6.75	84.48	93.81	0.26	6.57	57.03	248.90
建设用地	14.14	1.57	0.71	11.62	2.87	71.99	102.89
水域	0.19	1.92	4.62	0.01	477.97	63.90	548.61
未利用地	58.21	257.32	44.76	8.35	26.19	6 076.15	6 470.98
总计	197.02	1 127.09	190.88	26.01	515.23	6 818.09	8 874.32

2.3　柴达木盆地北缘土地利用空间转移分析

由图 5 可知,1990－2020 年,耕地重心向东南方向偏移,从耕地面积变化的数据来看,耕地面积呈现“先增后减再增”的发展规律,研究区内耕地增加,大部分来自西部未利用地的开垦;后来耕地面积的减少可归因于流域上游实行退耕还林还草,部分耕地改林还草,于是耕地的中心向西南方向转移。此后,由于实行耕地保护政策,耕地面积实现正增长,且重心向相反方向移动。林地与草地重心总体向西南的方向偏移,迁移距离分别为 2.06 和 2.37 km,整体迁移方向与耕地相近,更偏向于南部,这与巴音河流域的径流量有较大的关系,研究区气候变暖变湿,上游耕地减少,需水量降低,使草地重心整体向南移动。水域重心向北偏东方向偏移,迁移距离 5.43 km。水域的面积经历了先减少后增加的过程,21 世纪以来,生态环境问题受到了广泛的关注,有关各部门出台了一系列政策来治理流域西部,柯鲁柯湖-托素湖为国家级自然保护区,尕海也已被建设成国家湿地公园,流域水域的面积发生了较大幅度的变化导致其重心向西转移。建设用地重心先向东南方,后向西北方偏移。随着社会经济的发展,海拔较低、地形平缓的德令哈市区城镇化进程迅速,使建设用地整体向西南移动,且幅度较大。2010 年后,区域大力发展光伏发电,已在西北哈尔科山上建立大量设施,所以 2010 年后建设用地重心向西北方向移动。

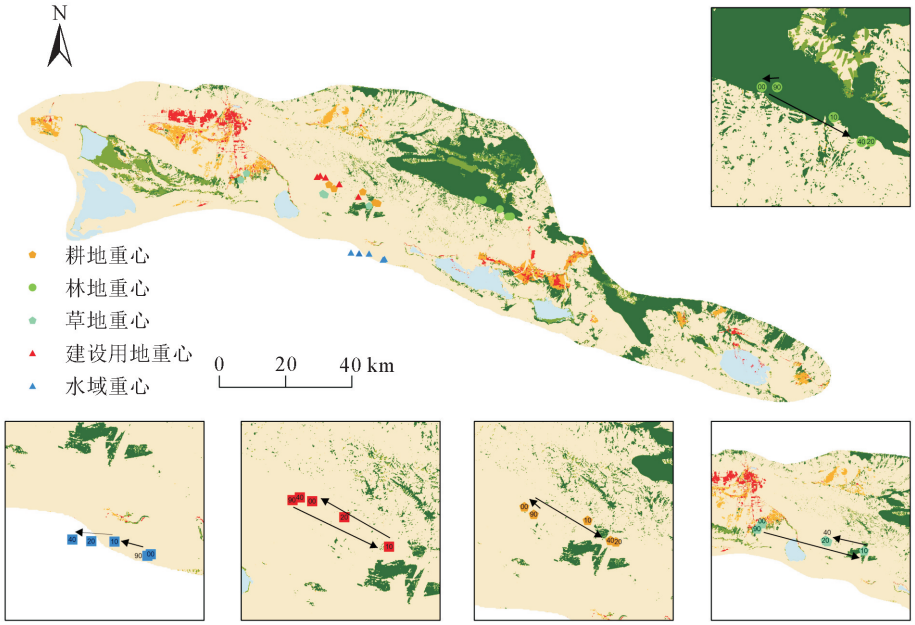


图 5　各地类重心转移

Fig. 5　Center of gravity shift map

2.4　驱动因子贡献度分析

土地利用变化是自然、地理区位和社会经济因子复杂耦合作用过程在空间上的表现。将 1990－2020 年各地类面积变化作为因变量,从自然气候、交通区位和社会经济 3 个方面选取 11 个自变量(表 2)其中:自然气候要素相对稳定,DEM 和坡度控制着高原地区植被与作物的生长,年均气温与降水对西北干旱区土地利用影响较大;通过人均 GDP 与人口数量的变化来衡量区域的宏观发展状况;公路、铁路、车站、政府驻地等交通运输与公共服务的数量与距离将极大影响区域土地利用的变化方向及速率,最终选取以上因子来为区域土地利用变化原因作出部分解释。运用 Markov-PLUS 模型的 LEAS 模块对各类用地的发展概率进行计算,用 α 值来描述驱动因子贡献度的可靠性,最终求得各因子对用地扩张的贡献度($\alpha=0.743$,RMSE$=0.084$)见图 6,其值越大表明该因子对该地类变化的影响越大。

2.4.1　耕地　从图 6 可知,对耕地变化影响最大的是温度,近几年来研究区温度波动上升,气温上升导致大气对水分的需求增加,蒸腾作用增强,进而影响降水量对植被生长状况起到控制作用。与市县政府的距离也极大地影响耕地的分布,政府周围的地区通常是人类最活跃的地区,耕地面积的变化最可能再出现在受人类活动影响较大的地区。

2.4.2　林地　影响林地面积的主要驱动因子是温度,其次是到公路、水域的距离和 DEM。区域林地增加的区域主要集中在海拔较高、靠近水域的地区。温度对林地生长的影响体现在提高植被光合作用,促进有机质分解提高土壤养分的促进作用,也体现在加快蒸散,减少土壤水分的抑制作用。

2.4.3 草地 DEM 对草地增长的影响较大，北部地区海拔在 3 000 m 以上，为高寒草原覆盖最低的地区，西南部地区为草地、林地和耕地过渡区，地势较为平坦，海拔在 2 700 m 左右，草地分布较广。

2.4.4 水域 水域面积受人口因素的影响最大，无论是经济的快速发展、人口数量的改变，都对水域面积的增大起了一定的推动作用，与研究区实际情况相符。

2.4.5 建设用地 影响建设用地增长的主要是人口及其与公路的距离，这说明人口增长是建设用地面积不断扩张最根本驱动因素，城镇化进程不断推进，最终促使居住用地面积不断扩张，且新增建设用地更有可能分布在交通方便的区域。

2.4.6 未利用地 多种驱动因子均对未利用地的变化产生较大影响。未利用地面积下降，这与柴北缘经济的快速发展有较大的关系，同时还与国家推行的造林植草政策息息相关，未利用地向建设用地及草地转化 102 km^2。此外，人口数量与结构的变化也促进了未利用地的开拓，越来越多的建设用地拔地而起，人类对土地的开发利用程度明显提高。

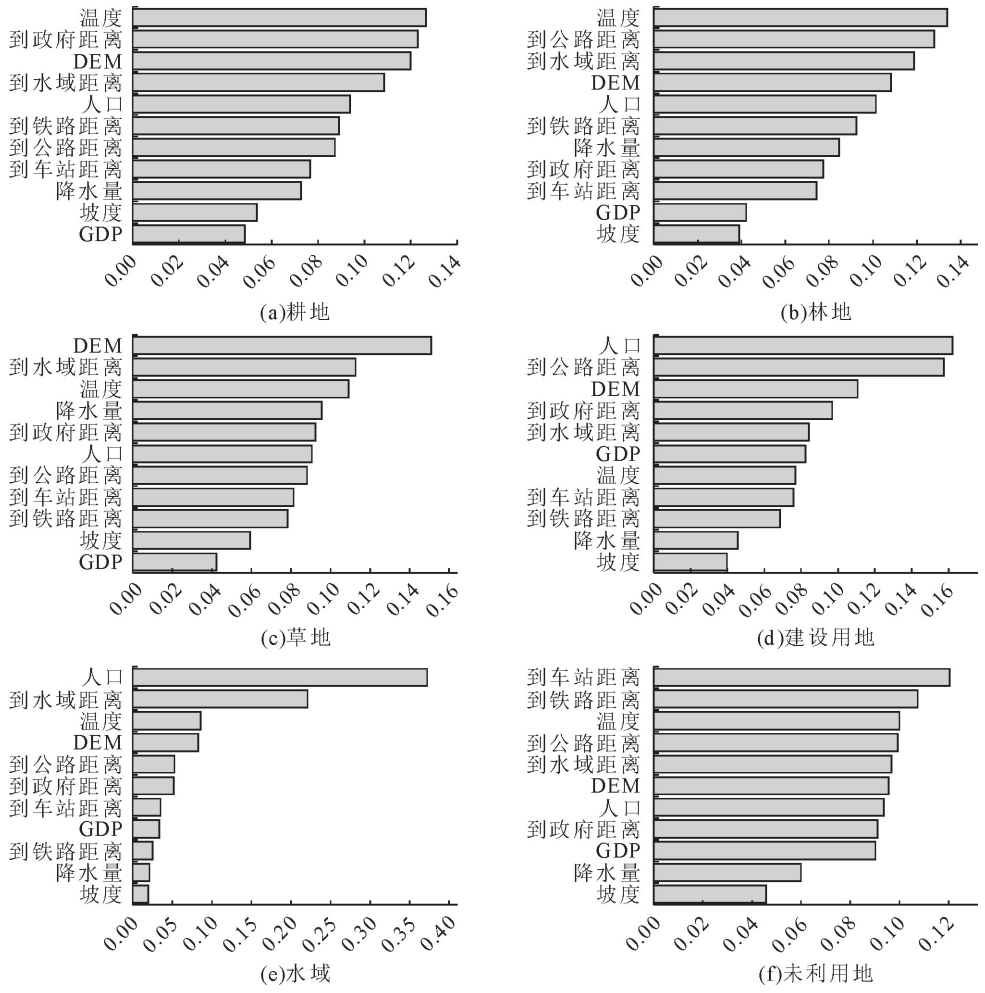


图 6 驱动因子贡献度

Fig. 6 Contribution of driving factor

2.5 柴达木盆地北缘土地利用多情景模拟

根据表 6、图 7 多情景土地利用模拟结果，柴北缘土地利用整体格局一致性较高，但局部变化明显。在自然环境因素不发生突变，社会发展保持现有速度的条件下，通过与之前几个时期的各类用地的变化趋势对比发现，综合土地利用动态度由前一时期的 1.52%下降为 0.14%，说明这个时期柴北缘发展处于稳定时期，各地类波动较小。2020－2040 年耕地面积缓慢增加，土地利用动态度由－0.1%升高为 0.1%。林地较快增加，其增加面积由未利用地转化较多。水域面积增加 22.34 km^2，空间分布于西南部托素湖附近；建设用地面积稳定增加，大多集中在德令哈北部哈尔科山，预计会有更多的发电设施在此建成。城镇发展情景下，建设用地面积增加 84.58 km^2，增幅超过 80%，而城市与工矿用地的发展导致林地与草地减少 56.25 km^2，林、草的退化问题将威胁区域可持续发展；耕地保护情景下，耕地面积增加 37.48 km^2，林地与草地面积减少 17.28

km^2。该情景下耕地较少转为其他用地,区域建设用地的发展便用了部分林地与草地,这些转化主要发生在中部尕海镇附近;生态保护情景下,林地、草地、水域面积共增加 116.4 km^2,林地与草地仅在此情景下正向增长,而耕地出现负增长现象,空间分布于乌兰县周边。

表 6　2040 年不同情景土地利用情况

Table 6　Land use under different scenarios in 2040　　km^2

情景/类型	耕地面积	林地面积	草地面积	建设用地面积	水域面积	未利用地面积
趋势发展情景	235.57	1 271.01	250.47	125.07	620.27	6 371.93
城镇发展情景	233.42	1 243.01	238.05	187.47	611.65	6 360.71
耕地保护情景	268.25	1 258.92	244.87	132.39	585.10	6 384.78
生态保护情景	210.92	1 288.40	269.61	120.22	628.07	6 357.10

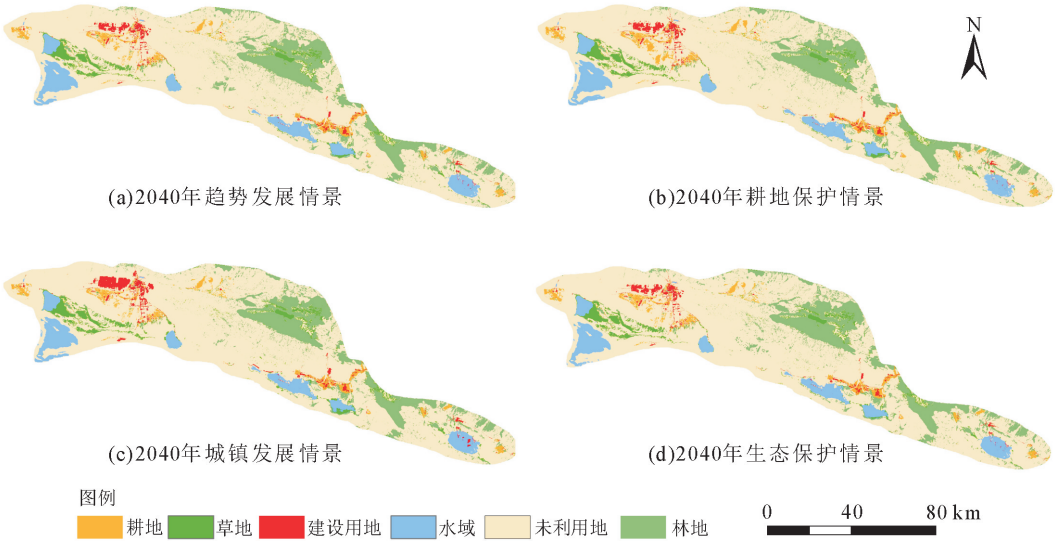


图 7　2040 年土地利用多情景模拟结果

Fig. 7　Land use simulation of multi-scenario in 2040

3　结论与讨论

3.1　结论

研究区未利用地面积逐年减少,由于城镇化的推进建设用地呈增加趋势,耕地与草地的变化趋势相反,退耕还林还草生态工程成效显著。林、草地之间转换频繁,由于区域生态环境脆弱,政府加强对林地的保护,防治林地退化,并积极建设湿地公园与自然保护区。水域与林地面积持续增加。

研究区土地综合动态度逐年上升,各类型土地变化速率差异较大,其中建设用地>草地>耕地>林地>水域>未利用地,建设用地变化速率最大,耕地土地利用动态度出现负数,说明耕地面积减少的速度在增加,在退耕还林还草的同时,也应顺应当地发展,保护耕地。同时,对未利用地的开发应秉持合理的原则。

将 Markov 模型与 PLUS 模型耦合,构建了一个可用于模拟土地利用斑块级变化并分析土地利用动态潜在驱动因子的斑块生成土地利用模拟(Markov-PLUS)模型。分别使用 FLUS 模型与 Markov-PLUS 模型模拟柴北缘 2020 年土地利用格局,并与 2020 年实际结果进行比较,证实了 Markov-PLUS 模型比 FLUS 模型模拟效果更好,准确性更高。

2040 年的土地利用多情景模拟结果显示,城镇发展情景下,建设用地大幅增加,但会挤占大量林、草地;草地面积基本保持稳定;耕地保护情景下,耕地从减少变为增加趋势,而建设用地的扩张依然会使林、草地减少;林地与草地仅在生态保护情景下正向增长。趋势发展情景下建设用地保持增加的趋势,但建设用地增加速率降低,林地与水域显著增加,反映了未来流域及湖泊湿地系统的保护成效。

3.2　讨论

将 Markov 链、CA 模型与基于土地扩张分析策略的规则挖掘框架紧密联系在一起,共同构成 Markov-PLUS 模型,模型的训练过程可以直接提供驱动力的定量信息。利用 Markov-PLUS 模型模拟了柴北缘的土地利用变化状况,考虑到土地利用变化的驱动因素可能随着时间而变化,从 PLUS 模型中获得的变化规则比以往研究中发现的分布规则更

有价值和灵活性，因为本研究中的变化规则具有时间性，这使得变化规则能够描述一定时间内土地利用变化的性质。这一优势可以帮助决策者理解驱动因素（例如铁路、公路的修建）如何影响短期土地利用变化。此外，与FLUS模型对比，模拟结果获得了更高的精度。因此可以认为Markov-PLUS模型在土地利用预测模拟中可获得更可靠的模拟结果。与其他模型相比虽然在模拟精度与驱动因素挖掘方面优势明显，但试验仍存在缺点。因为部分数据难以获得导致影响因子未能考虑得面面俱到，只涉及了自然、经济、交通区位等因子，对当地未来规划的考虑较为欠缺。后续应收集区域规划政策定量表达后放入驱动因素挖掘框架，使模拟结果更具科学性。利用土地利用重心迁移模型对各地类重心的变化分析表明，人类对区域土地不利影响日益增加，建议相关部门对林地退化区进行深入研究，优选适生植被保护区域水土资源，应加大对废弃工矿用地以及实施搬迁后废弃的村庄整理复垦的力度，保护基本农田，积极建设自然保护区、湿地公园，统筹推进区域山水田林湖草沙的综合治理。

参考文献：

[1] 刘纪远，邵全琴，延晓冬，等. 土地利用变化对全球气候影响的研究进展与方法初探[J]. 地球科学进展，2011，26(10)：1015-1022.

[2] LIU J Y，KUANG W H，ZHANG Z X，*et al*. Spatiotemporal characteristics，patterns，and causes of land-use changes in China since the late 1980s[J]. Journal of Geographical Sciences，2014，24(2)：195-210.

[3] AMUTI T，LUO G. Analysis of land cover change and its driving forces in a desert oasis landscape of southern Xinjiang，China[J]. Solid Earth，2014，5(2)：1071-1085.

[4] 龙花楼，张英男，屠爽爽. 论土地整治与乡村振兴[J]. 地理学报，2018，73(10)：1837-1849.

[5] 田俊峰，王彬燕，王士君. 东北三省城市土地利用效益评价及耦合协调关系研究[J]. 地理科学，2019，39(2)：305-315.

[6] 毛靓，贾京默. 黑龙江县域农林用地景观格局变化特征[J]. 森林工程，2022，38(2)：44-53.
MAO L，JIA J M. Study on the change characteristics of landscape pattern of agricultural and forestry land at County area in Heilongjiang[J]. Forest Engineering，2022，38(2)：44-53. (in Chinese)

[7] 张金茜，巩杰，柳冬青. 地理探测器方法下甘肃白龙江流域景观破碎化与驱动因子分析[J]. 地理科学，2018，38(8)：1370-1378.

[8] 陈新云，王甜，李宝健. 北京市西北部生态涵养区未来土地利用及生态系统服务变化情景模拟[J]. 西北林学院学报，2021，36(1)：86-95.
CHEN X Y，WANG T，LI B J. Simulation of the future land use and ecosystems services in the ecological conservation area in northwestern Beijing[J]. Journal of Geo-information Science，2021，36(1)：86-95. (in Chinese)

[9] 席梅竹，赵中秋，吴攀升，等. 基于改进CA-Markov模型的滹沱河流域山区段土地利用变化模拟及预测[J]. 西北林学院学报，2021，36(4)：150-158.
XI M Z，ZHAO Z Q，WU P S，*et al*. Changes and predictions of land use in mountain section of the Hutuo river basin based on improved CA-Markov model[J]. Journal of Northwest Forestry University，2021，36(4)：150-158. (in Chinese)

[10] 王克奇，彭熙雯，张怡卓，等. 基于改进U-Net的高光谱农林植被分类方法[J]. 森林工程，2022，38(1)：58-66.
WANG K Q，PENG X W，ZHANG Y Z，*et al*. A hyperspectral classification method for agroforestry vegetation based on improved U-net[J]. Forest Engineering，2022，38(1)：58-66. (in Chinese)

[11] LIANG X，GUAN Q F，CLARKE K C，*et al*. Mixed-cell cellular automata：a new approach for simulating the spatio-temporal dynamics of mixed land use structures[J]. Landscape and Urban Planning，2021，205：103960.

[12] XING W R，QIAN Y H，GUAN X F，*et al*. A novel cellular automata model integrated with deep learning for dynamic spatio-temporal land use change simulation[J]. Computers and Geosciences，2020，137：104430.

[13] 马梓策，于红博，张巧凤，等. 基于CA-Markov模型的锡林河流域土地利用变化及预测分析[J]. 西北林学院学报，2020，35(2)：169-177.
MA Z C，YU H B，ZHANG Q F，*et al*. Land use change and forecast analysis in the Xilin River basin based on CA-Markov model[J]. Journal of Northwest Forestry University，2020，35(2)：169-177. (in Chinese)

[14] 姜楠，贾宝全，宋宜昊. 基于Logistic回归模型的北京市耕地变化驱动力分析[J]. 干旱区研究，2017，34(6)：1402-1409.

[15] 李晓蕾，魏建新，徐丽萍，等. 基于CLUE-S模型的博斯腾湖流域土地利用变化情景模拟[J]. 石河子大学学报：自然科学版，2019，37(3)：345-352.

[16] FENG D R，BAO W K，FU M C，*et al*. Current and future land use characters of a national central city in eco-fragile region—a case study in Xi'an City based on FLUS model[J]. Land，2021，10(3)：1-25.

[17] 张晓荣，李爱农，南希，等. 基于FLUS模型和SD模型耦合的中巴经济走廊土地利用变化多情景模拟[J]. 地球信息科学学报，2020，22(12)：2393-2409.
ZHANG X R，LI A N，NAN X，*et al*. Multi-scenario simulation of land use change along China-Pakistan economic corridor through coupling FLUS model with SD model[J]. Journal of Geo-information Science，2020，22(12)：2393-2409. (in Chinese)

[18] LIANG X，GUAN Q F，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.

[19] 杨国清，刘耀林，吴志峰. 基于CA-Markov模型的土地利用格局变化研究[J]. 武汉大学学报：信息科学版，2007，32(5)：414-418.

（下转第179页）

汇调控途径[J]. 生态学报,2016,36(9):2552-2559.
ZHANG J,TONG L G,LI Z H,*et al*. Changes of organic carbon sink increment and management in Uxin Banner,Inner Mongolia,China[J]. Acta Ecologica Sinica,2016,36(9):2552-2559. (in Chinese)

[17] 吴晓旭,邹学勇,王仁德,等. 内蒙古乌审旗土地沙漠化退化过程研究[J]. 水土保持研究,2009,16(1):136-140.
WU X X,ZOU X Y,WANG R D,*et al*. Research on desertification of Uxinqi in Inner Mongolia[J]. Soil and Water Conservation Research,2009,16(1):136-140. (in Chinese)

[18] 胡永宁,秦艳,王林和,等. 1960-2009 年毛乌素沙地腹地气候变化的多重时间尺度分析——以乌审旗为例[J]. 干旱区资源与环境,2013,27(2):124-130.
HU Y N,QIN Y,WANG L H,*et al*. The multi-time scale analysis on climate change in hinterland of Mu Us sandy land from 1960 to 2009[J]. Resources and Environment in Arid Areas,2013,27(2):124-130. (in Chinese)

[19] 范磊,侯光才,陶正平. 毛乌素沙漠萨拉乌苏组地下水特征与植被分布关系[J]. 水土保持学报,2018,32(4):151-157.
FAN L,HOU G C,TAO Z P. Characteristics of groundwater and its relation with vegetation distribution in sara Wu Su formation of Mu Us desert[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2018,32(4):151-157. (in Chinese)

[20] 王涛,吴薇,薛娴,等. 近 50 年来中国北方沙漠化土地的时空变化[J]. 地理学报,2004,59(2):203-212.
WANG T,WU W,XUE X,*et al*. Spatial-temporal changes of sandy desertified land during last 5 decades in northern China[J]. Acta Geologica Sinica,2004,59(2):203-212. (in Chinese)

[21] 刘纪远. 国家资源环境遥感宏观调查与动态监测研[J]. 遥感学报,1997(3):225-230.
LIU J Y. Study on national resources,environment survey and dynamic monitoring using remote sensing[J]. Journal of Remote Sensing,1997(3):225-230. (in Chinese)

[22] 乔斌,祝存兄,曹晓云,等. 格网尺度下青海玛多县土地利用及生态系统服务价值空间自相关分析[J]. 应用生态学报,2020,31(5):1660-1672.
QIAO B,ZHU C X,CAO X Y,*et al*. Spatial autocorrelation analysis of land use and ecosystem service value in Maduo County,Qinghai Province,China at the grid scale [J]. Acta Applied Ecologica Sinica,2020,31(5):1660-1672. (in Chinese)

[23] 浩飞龙,王士君,冯章献,等. 基于 POI 数据的长春市商业空间格局及行业分布[J]. 地理研究,2018,37(2):366-378.
HAO F L,WANG S J,FENG Z X,*et al*. Spatial pattern and its industrial distribution of commercial space in Changchun based on POI data[J]. Geography Research,2018,37(2):366-378. (in Chinese)

[24] 吴喜慧,李卫忠. 基于 QuickBird 遥感影像的土地利用变化及驱动力研究[J]. 西北林学院学报,2010,25(6):216-221.
WU X H,LI W Z. Change of the land use and motivations based on image[J]. Journal of Northwest Forestry University,2010,25 (6):216-221. (in Chinese)

[25] 庄大方,刘纪远. 中国土地利用程度的区域分异模型研究[J]. 自然资源学报,1997(2):10-16.
ZHUANG D F,LIU J Y. Study on the regional differentiation of land use degree in China [J]. Journal of Natural Resources,1997(2):10-16. (in Chinese)

[26] Ord J K,GETIS A. Local spatial autocorrelation statistics:distributional issues and an application[J]. Geographical Analysis,1995,27(4):286-306.

[27] 张玉娟,曲建光,王强,等. 结合均匀度理论和 Moran's *I* 指数、广义 *G* 指数的景观格局全局自相关分析[J]. 测绘通报,2018(11):36-39.

[28] 段翰晨,王涛,薛娴,等. 科尔沁沙地沙漠化时空演变及其景观格局——以内蒙古自治区奈曼旗为例[J]. 地理学报,2012,67(7):917-928.

(上接第 148 页)

[20] 孙晨,贡璐,马勇刚,等. 塔里木河上游典型绿洲土地利用时空格局分析[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2020,48(7):113-122.
SUN C,GONG L,MA Y G,*et al*. Temporal and spatial pattern analysis of land use in typical oasis in the upper reaches of Tarim River[J]. Journal of Northwest A&F university:Nat. Sci. Ed. ,2020,48(7):113-122. (in Chinese)

[21] 李桢,刘淼,薛振山,等. 基于 CLUE-S 模型的三江平原景观格局变化及模拟[J]. 应用生态学报,2018,29(6):1805-1812.

[22] 朱磊,夏鑫鑫,杨爱民,等. 玛纳斯河流域绿洲区耕地扩张的 CA-Markov 模型参数敏感性分析[J]. 干旱区研究,2020,37(5):1327-1336.

[23] 李孝永,匡文慧. 京津冀 1980－2015 年城市土地利用变化时空轨迹及未来情景模拟[J]. 经济地理,2019,39(3):187-194,200.

[24] 卞子浩,马小雪,龚来存,等. 不同非空间模拟方法下 CLUE-S 模型土地利用预测——以秦淮河流域为例[J]. 地理科学,2017,37(2):252-258.

[25] 赵珍珍,冯建迪. 1980－2016 年科尔沁沙地土地利用重心的时空迁移特征[J]. 水土保持通报,2019,39(4):7.

[26] 刘瑞,朱道林. 基于转移矩阵的土地利用变化信息挖掘方法探讨[J]. 资源科学,2010,32(8):1544-1550.

[27] 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(5):533-540.

[28] 王小伦,刘雁,张玉,等. 基于 CA-Markov 模型的吉林省西部土地利用/覆被变化研究及预测[J]. 科学技术与工程,2021,21(19):7942-7948.
WANG X L,LIU Y,ZHANG Y,*et al*. Exploration and prediction of land use/cover change in western Jilin Province based on CA-Markov model[J]. Science Technology and Engineering,2021,21(19):7942-7948. (in Chinese)

[29] 罗芳,潘安,陈忠升,等. 四川省宜宾市耕地时空格局变化及驱动力分析[J]. 水土保持通报,2021,41(6):1-9.