

基于 CA-Markov 模型的阿克苏地区土地利用变化研究及预测

李宇飞, 张永福*, 赵玉, 卜祥 (新疆大学资源与环境科学学院, 新疆大学绿洲生态教育部重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830017)

摘要 [目的]通过分析和预测阿克苏地区 20 年间的土地利用变化和未来土地利用趋势, 总结阿克苏各地类的变化数量、方向和趋势。[方法]以 2000、2010 和 2020 年的 GlobeLand 30 数据为基础, 运用土地利用动态度、土地转移矩阵和土地利用变化图谱分析阿克苏地区 2000—2020 年的土地利用变化; 基于 2020 年的阿克苏地区土地利用现状, 结合 CA-Markov 模型对阿克苏地区土地利用进行预测。[结果]2000—2010 年灌木地、水体和林地动态度较大; 2010—2020 年湿地、人造地表和耕地动态度较大; 裸地和草地在 2000—2020 年持续大面积减少, 耕地、人造地表和水体持续增加。2000—2020 年耕地主要的来源为裸地和草地; 人造地表的来源为耕地; 裸地和草地持续转出为其他地类。2000—2020 年 5 种图谱变化模式中稳定型占绝对优势, 持续变化型和反复变化型则很少。2020—2030 年研究区土地利用基本延续 2010—2020 年土地利用演变趋势, 人造地表大量增加且主要来源为耕地, 裸地、草地和林地进一步减少。[结论]该研究为阿克苏地区土地空间规划制定提供参考。

关键词 土地利用变化; GlobeLand 30; CA-Markov 模型; 预测; 阿克苏地区

中图分类号 F301.24 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2022)21-0074-07

doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2022.21.019



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Research and Prediction of Land Use Change in Aksu Region Based on CA-Markov Model

LI Yu-fei, ZHANG Yong-fu, ZHAO Yu et al (College of Resources and Environmental Sciences, Key Laboratory of Oasis Ecology, Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830017)

Abstract [Objective] By analyzing and predicting the changes in land use and future land use trends in Aksu Region in the past 20 years, summarizing the number, direction and trend of changes in Aksu Region. [Method] Based on the GlobeLand 30 data in 2000, 2010 and 2020, the land use change in Aksu Region from 2000 to 2020 was analyzed by using land use dynamics, land transfer matrix and land use change map. Based on the status of land use in Aksu in 2020, combined with the CA-Markov model, the land use in Aksu Region was predicted. [Result] From 2000 to 2010, the dynamic degree of shrubland, water body and forest was relatively large; from 2010 to 2020, the dynamic degree of wetland, man-made surface and cultivated land was relatively large; bare land and grassland continued to decrease in a large area from 2000 to 2020, arable land, man-made surface and water body continue to increase. From 2000 to 2020, the main sources of arable land were bare land and grassland; the largest source of artificial ground was arable land; bare land and grassland continue to be transferred to other land types. From 2000 to 2020, the stable type had an absolute advantage among the five patterns of atlas change; the continuous and repeated changes were rare. The land use in the study area from 2020 to 2030 basically continued the evolution trend of land use from 2010 to 2020. The man-made surface had increased greatly and the main source was cultivated land, and the bare land, grassland and forest had further reduced. [Conclusion] The study provides reference for the formulation of land and space planning in Aksu area.

Key words Land use change; GlobeLand 30; CA-Markov model; Prediction; Aksu Region

土地利用和覆被变化是全球环境变化和可持续发展的重要组成部分, 在全球物质循环和能量流动中起着关键作用, 因此通过研究土地利用变化的规律, 利用模型拟合并预测区域土地利用变化趋势对于合理开发利用土地资源、促进区域可持续发展具有重要意义^[1-2]。近几十年来全球土地覆被发生了剧烈变化, 人类活动对土地覆被变化的影响成为“人类世”最为显著的特征之一^[3]。

目前研究我国不同尺度、不同时间的土地利用/土地覆被的成果相当丰硕, 如刘纪远等^[4]用人机交互解译 Landsat 8 OLI、GF-2 等遥感卫星图像, 运用土地利用动态度、年变化率指标, 综合分析全国和全国五大区域 2010—2015 年土地利用变化的时空特征; 王小伦等^[5]运用 GlobeLand 30 全球土地覆被数据集, 分析吉林省西部 2000—2020 年土地利用变化, 并用 CA-Markov 模型对 2030 年土地利用进行预测; 陈军等^[6-7]基于 GlobeLand 30 数据分析全球建设用和耕地的变化。土地利用模拟方面也已形成很多有效的模型, 如 Logistic 模型、Markov 模型和 CA 模型等存在一定局限^[8-10]。CA-Markov 模型综合

CA 模型模拟复杂空间动态变化的能力和 Markov 模型长期预测的优点, 不仅提高土地利用变化预测精度, 又较好地模拟土地利用格局的空间过程^[11-13]。

阿克苏各县市多集中分布于干旱区绿洲, 不仅面临生态环境如干旱缺水、土地盐碱化、沙尘天气多、草场退化等问题, 随着阿克苏地区人类活动的加剧, 同样面临建设用地需求增大而占用优质耕地、低效土地利用等问题。脆弱的生态环境与用地需求增长的矛盾日益突出, 各级人民政府作为土地管理部门, 为实现区域可持续发展, 贯彻五大发展理念, 积极寻找对策, 如划定三条红线、退耕还林还草还林等, 制定科学合理的国土空间规划来促进生态文明建设。笔者以 2000、2010 和 2020 年的 GlobeLand 30 数据为基础, 运用土地利用动态度、土地转移矩阵和土地利用变化图谱分析阿克苏地区 2000—2020 年土地利用变化, 并预测未来 2020—2030 年土地利用变化的趋势, 以期对阿克苏地区土地空间规划提供参考, 对该地区土地资源的开发和利用有积极作用。

1 资料与方法

1.1 研究区概况 阿克苏地区位于新疆维吾尔自治区西南部, 包括阿克苏地区的“七县二市”及兵团第一师阿拉尔市, 地处天山南麓、塔里木盆地北缘, 总面积约 13.14 万 km², 地理坐标为 78°01′~84°05′E, 39°27′~42°38′N。阿克苏地区为

作者简介 李宇飞(1996—), 男, 山西榆次人, 硕士研究生, 研究方向: 地图学与地理信息系统。* 通信作者, 副教授, 硕士, 硕士生导师, 从事国土资源评价研究。

收稿日期 2021-12-28

暖温带大陆干旱性气候,气候干燥,蒸发量大,降水稀少,北部为众多山峰;中部为山麓砾质扇形地、冲积平原区、戈壁、绿洲相间;南部是塔克拉玛干沙漠^[14]。2019 年末,阿克苏地

区常住总人口为 309.04 万。阿克苏地区城市多集中分布于绿洲及流域,是连接库尔勒、喀什、伊宁的枢纽,地理位置十分重要。研究区如图 1 所示。

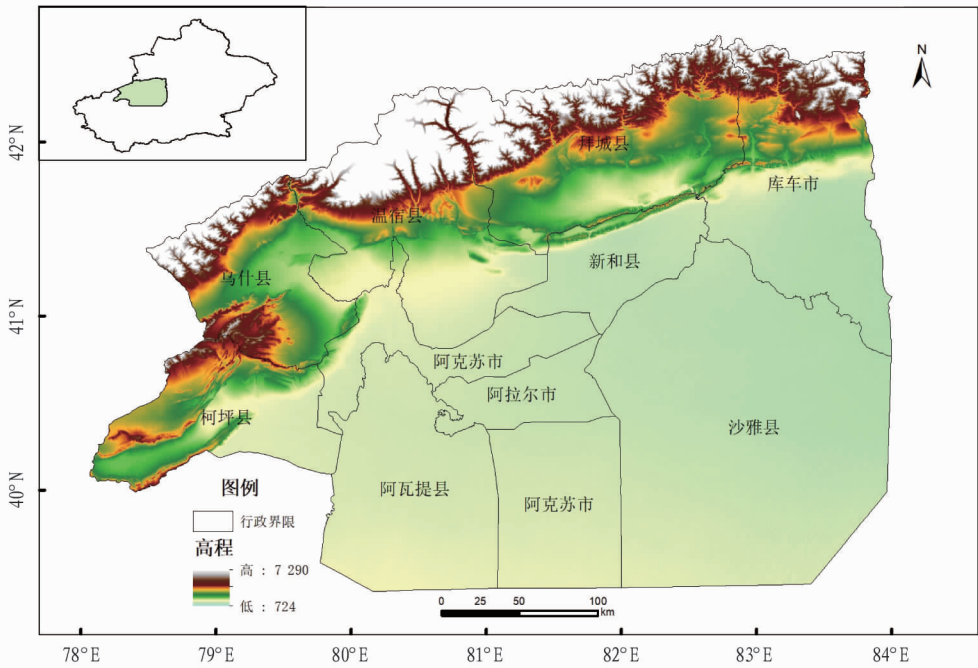


图 1 研究区示意图
Fig.1 Schematic diagram of the study area

1.2 数据来源及预处理 地表覆盖数据来源于 30 m 全球地表覆盖数据 GlobeLand 30 (<http://www.globallandcover.com>)。GlobeLand 30 数据共包括 10 个一级类型,分别是耕地、林地、草地、灌木地、湿地、水体、苔原、人造地表、裸地、冰川。由于阿克苏地区不涉及苔原,故下文没有苔原统计数据。该研究采用 2000、2010 和 2020 年的 GlobeLand 30 产品数据 2000LC030、2010LC030 和 2020LC030;阿克苏地区永久基本农田、沟渠和道路数据来源于各县市自然资源局;DEM 数据来源于地理空间数据云 (<https://www.gscloud.cn>)。

对 3 期 GlobeLand 30 数据镶嵌和裁剪,提取阿克苏地区 2000、2010、2020 年土地利用数据;提取各县市的永久基本农田、沟渠和道路数据,并转为栅格数据;统一以上数据的空间参考系、范围和空间、精度。

1.3 研究方法

1.3.1 土地利用动态度。土地利用动态可以揭示地类的综合变化率,客观地表示全部地类之间变化速度情况,反映区域土地利用变化的强烈程度^[15-16]。土地利用动态度为正值,说明在研究时间段该地类面积在增加;土地利用动态度为负值,说明在研究时间段该地类面积在减少;土地利用动态度的绝对值越大,说明该土地利用类型的变化速度越快^[17]。

(1)单一土地利用动态度可定量描述区域一定时期内某种土地利用类型的变化速度。该值越大,说明该类型变化越快。其公式如下:

$$D=\frac{S_b-S_a}{S_a}\times\frac{1}{T}\times100\%$$

(1)

式中, D 为土地利用某类型动态度, S_a 为初始年土地利用类型面积, S_b 为终止年土地利用类型面积, T 为初始年到终止年的时间间隔。

(2)综合土地利用动态度反映了研究区在一定时期内土地利用总体类型的变化,反映了社会经济发展对区域土地利用变化的综合影响。其公式如下:

$$LC=\frac{\sum_{i=1}^n\Delta LU_{i-j}}{2\sum_{i=1}^nLU_i}\times\frac{1}{T}\times100\%$$

(2)

式中, LC 为综合土地利用动态度, LU_i 为研究初期第 i 类土地的面积, ΔLU_{i-j} 为某一时间段第 i 类土地转化为 j 类土地的面积绝对值, T 为时间尺度。

1.3.2 土地利用转移矩阵。土地利用转移矩阵以矩阵的形式列出前后两期土地利用变化类型的转移面积,可以详细地展现出不同类型之间的相互转换关系^[18-19]。其公式如下:

$$L_{ij}=\begin{bmatrix} L_{11} & \cdots & L_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ L_{n1} & \cdots & L_{nn} \end{bmatrix}$$

(3)

式中, L 为土地利用类型面积, n 为土地利用类型数量, i 为初始年土地利用类型, j 为终止年土地利用类型。

1.3.3 土地利用变化图谱。土地利用变化图谱可以从空间上反映各种地类在研究时间段的转移情况^[20]。在 ArcGIS 10.2 中,将 2000、2010 和 2020 年阿克苏地区土地利用数据重分类后输入到栅格计算器中,按以下公式进行运算:

$$N=100A+10B+C$$

(4)

式中, N 为图谱单元值, A 为起始年土地类型代码, B 为中间年土地类型代码, C 为终止年土地类型代码。

1.3.4 CA-Markov 模型。马尔可夫(Markov)模型具有无后效性和稳定性,即在 $t+1$ 时刻的土地利用类型状态仅取决于 t 时刻的状态^[21]。其公式如下:

$$S_{(t+1)} = S_t \times P$$

(5)

式中, $S_{(t+1)}$ 、 S_t 分别为 $t+1$ 、 t 时刻研究区土地利用类型状态向量; P 为土地利用状态转移概率矩阵。

元胞自动机(cellular automata,CA)模型是一种时间、空间、状态都离散,空间相互作用和时间因果关系都为局部的网格动力学模型^[22]。现已被广泛应用于土地利用变化模拟研究。其公式如下:

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

(6)

式中, S_t 、 $S_{(t+1)}$ 分别是 t 、 $t+1$ 时刻的系统状态结果, N 是元胞的邻域范围, f 是邻域范围内元胞单元相互作用的状态转移规则函数。

Markov 模型着重探索时间尺度上 LUCC 变化特征与规律,难以预测土地利用的空间格局变化;CA 模型关注地块、人群、环境等微观因子间的相互作用机制,但其主要着眼于元胞的局部相互作用,存在一定的局限性^[23]。CA-Markov 模型将马尔可夫链长时间序列预测的能力与元胞自动机模拟复杂系统空间变化的优势相结合,可实现动态、多情景模拟 LUCC 的能力,且具有较好的模拟精度^[24]。

运用 IDRISI Selva 软件进行 Markov 预测,首先将阿克苏

地区 2010 年与 2020 年两期土地利用图像进行对比分析,得到 2010—2020 年各地类转移矩阵和过渡适宜性图像集。其次为了更准确模拟下一时刻的土地利用变化,林地、草地、灌木地、湿地、水体、裸地、冰川沿用 Markov 操作得到的各自过渡适宜性图像集,而耕地和人造地表的变化较为复杂,在此需要用 IDRISI 中的 decision wiard 对耕地和人造地表进行多标准评估。多标准评估中分为限制因素和影响因素。水体一般不会转化为耕地,所以将水体设置为限制因素。在干旱区,耕地的发展不仅受到高程和坡度的制约,更会受到水资源的制约,所以选取沟渠、坡度和高程作为影响因素^[24]。水体和永久基本农田基本不会发展为人造地表,故将水体和永久基本农田设置为人造地表的限制因素,道路、坡度和高程设置为影响因素。多标准评估后产生的单一图层即为该地类的过渡适宜性图像。最后进行 CA-Markov 模拟,基础土地覆被图像选择 2020 年阿克苏地区土地利用图像;马尔可夫过渡面积文件选择 Markov 操作得到的转移面积文件;过渡适宜性图像集选择 Markov 和 decision wizard 操作得到的各地类过渡适宜性图像;元胞自动机迭代次数为 10;元胞自动机过滤器类型为标准 5×5 临近滤波器,即可得到 2030 年阿克苏地区土地利用模拟图像。

2 结果与分析

2.1 土地利用动态度分析 从图 2 和表 1~2 可以看出,由于阿克苏地区南部为大面积的塔克拉玛干沙漠,并未很好地得到开发,所以土地利用中裸地占比较大,占据优势地位,面

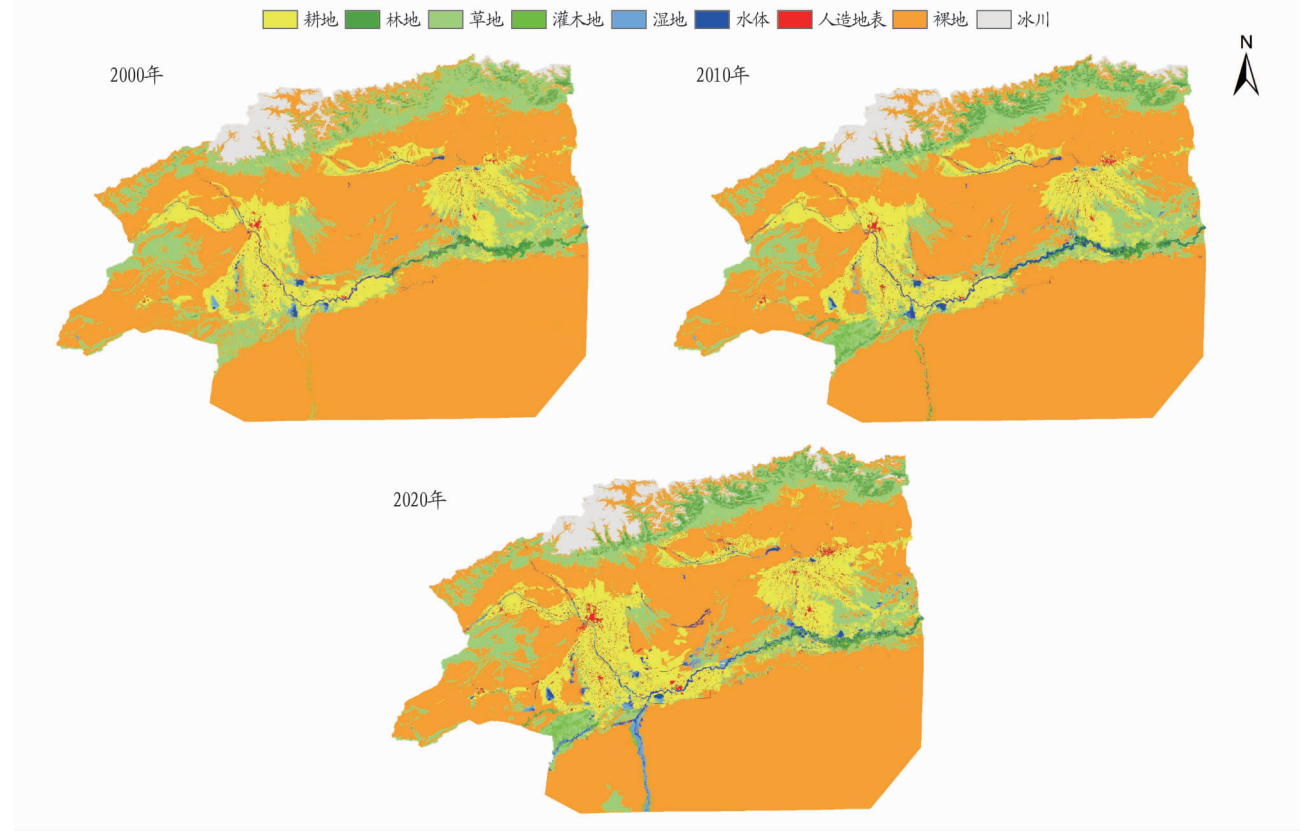


图 2 2000—2020 年阿克苏地区土地利用现状
Fig. 2 Status of land use in Aksu region from 2000 to 2020

积占比虽然达 60% 以上,但在 2000—2020 年面积及占比一直在下降,减少速度先慢后快。阿克苏地区草地空间分布较集中,主要集聚在西部、北部和东部广大地区,草地在各县之间分布差异较大,其中温宿县、拜城县、库车县和乌什县分布较多,草地面积在阿克苏土地利用面积中仅次于裸地,面积占比由 2000 年的 16.48% 下降至 2020 年的 14.57%,减少速度先快后慢。耕地在 2000—2020 年持续增长 了 3 465.55 km²,耕地动态度 2010—2020 年较大,2010—2020 年增长较快,说明 2010—2020 年阿克苏地区农业快速发展。人造地表由 2000 年的 478.26 km² 增长到 2020 年的 1 099.91 km²,面积为 2000 年面积的 2.30 倍,人造地表动态度 2010—2020 年较大,2010—2020 年增长迅速,说明 2010—2020 年阿克苏地区城市扩张迅速,人口与经济快速发展。从林地的空间分布上看,东部地区集聚程度较高,南部较少有森林资源分布;沙雅

县、库车县和阿瓦提县林地较多,阿克苏市林地较少。林地与灌木地面积在 2000—2010 年较快增长,2010—2020 年无明显变化。湿地和水体面积均有所增长,湿地动态度 2000—2010 年较小、2010—2020 年较大,水体动态度则为 2000—2010 年较大、2010—2020 年较小。冰川较其他土地利用类型无明显变化。

总体来说,2000—2010 年,灌木地、水体和林地动态度较大,在此期间变化速度较快;2010—2020 年,湿地、人造地表和耕地动态度较大,在此期间变化速度较快;2000—2020 年,裸地和草地持续大面积减少,耕地、人造地表和水体持续增加。通过对比前后 10 年的土地利用变化后发现,阿克苏地区 2010—2020 年综合土地利用动态度(0.37%) 大于 2000—2010 年综合土地利用动态度(0.20%),说明 2010—2020 年阿克苏地区对土地的开发和利用更为迅速。

表 1 2000—2020 年阿克苏地区土地利用面积及占比
Table 1 Land use area and proportion in Aksu region from 2000 to 2020

土地利用类型 Land use type	2000 年		2010 年		2020 年	
	面积 Area/km ²	占比 Proportion/%	面积 Area/km ²	占比 Proportion/%	面积 Area/km ²	占比 Proportion/%
耕地 Cultivated land	14 592.19	11.08	14 953.55	11.36	18 057.74	13.72
林地 Forest	1 547.05	1.18	2 752.90	2.09	2 626.44	1.99
草地 Grassland	21 702.50	16.48	19 706.52	14.97	19 181.24	14.57
灌木地 Shrubland	24.36	0.02	457.46	0.35	430.60	0.33
湿地 Wetlands	264.88	0.20	185.95	0.14	1 134.59	0.86
水体 Water body	535.26	0.41	1 029.32	0.78	1 122.40	0.85
人造地表 Man-made surface	478.26	0.36	557.49	0.42	1 099.91	0.84
裸地 Bare land	87 840.44	66.72	87 332.61	66.34	83 139.66	63.15
冰川 Glacier	4 668.76	3.55	4 677.96	3.55	4 861.18	3.69

表 2 2000—2020 年阿克苏地区土地利用变化面积及土地利用动态度
Table 2 Land use change area and land use dynamics in Aksu region from 2000 to 2020

土地利用类型 Land use type	土地利用变化面积 Land use change area/km ²		单一土地利用动态度 Single land use dynamics/%	
	2000— 2010 年	2010— 2020 年	2000— 2010 年	2010— 2020 年
耕地 Cultivated land	361.36	3 104.19	0.25	2.08
林地 Forest	1 205.85	-126.46	7.79	-0.46
草地 Grassland	-1 995.98	-525.28	-0.92	-0.27
灌木地 Shrubland	433.10	-26.86	177.79	-0.59
湿地 Wetlands	-78.93	948.64	-2.98	51.02
水体 Water body	494.06	93.08	9.23	0.90
人造地表 Man-made surface	79.23	542.42	1.66	9.73
裸地 Bare land	-507.83	-4 192.95	-0.06	-0.48
冰川 Glacier	9.20	183.22	0.02	0.39

2.2 土地利用转移分析 将阿克苏地区的 2000、2010 和 2020 年的 GlobeLand 30 产品数据 2000LC030、2010LC030 和 2020LC030 中的栅格数据运用 ArcGIS 10.2 转成矢量数据,3 期数据相交得到阿克苏地区 2000—2010 和 2010—2020 年土地利用转移矩阵,具体见表 3~4。从表 3~4 可以看出,耕地转入远大于转出,20 年间面积增加了 3 465.55 km²,主要由

裸地和草地转入,可能由于耕地占补平衡系统中新增耕地指标与新增建设用地指标相联系,促使政府和个人积极开发耕地;转出主要为人造地表和草地,说明不仅存在建设占用耕地的情况,而且存在少量耕地撂荒问题,这种情况在 2010—2020 年更为明显。2000—2010 年林地转入大于转出,2010—2020 年是转出大于转入,总体转入大于转出,面积增加了 1 079.39 km²,林地和草地相互转换面积较大;2000—2010 年转入转出变化较大,有大量草地与裸地转入,同时也转出为草地和水体,2010—2020 年由草地转入,主要转出为草地和湿地。草地转入远小于转出,面积减少了 2 521.26 km²,2000—2020 年转入以裸地和林地为主,转出也主要为裸地和林地。2000—2010 年灌木地转入大于转出,2010—2020 年转出大于转入,总体转入大于转出,面积增加了 406.24 km²,2000—2020 年转入主要为裸地和草地;转出主要为裸地、草地和湿地。湿地转入大于转出,面积增加了 869.71 km²,2000—2010 年变化较小,2010—2020 年大量的裸地、草地和水体转入湿地;转出较少,主要转为水体,水体和湿地相互转换。水体转入大于转出,面积增加了 587.14 km²,2000—2010 年以转入为主,主要由裸地和林地转入,转出较小;2010—2020 年水体与林地、裸地、草地和湿地之间相互转换。人造地表转入大于转出,面积增加了 621.65 km²,主要转入为耕

地和裸地,近年来,农村安居富民工程、旧城改造、棚户区整治、小城镇试点建设等民生工程以及城市化工业化对建设用地需求旺盛,导致人造地表面积大幅增加;转出也主要为耕地,说明人造地表的主要来源为耕地,由于城乡建设用地增减挂钩、采矿用地整治等项目的实施刺激原本的人造地表复垦为农用地。裸地转入小于转出,面积减少了 4 700.78 km²,

转入主要为草地;转出主要为耕地和草地。冰川变化较小,与裸地相互转入转出。

总体来说,裸地、草地和林地是其他除人造地表地类外的主要转入来源,它们之间同样也进行着复杂的转换,人造地表的主要来源为耕地,水体和湿地、林地和草地相互转换。

表 3 2000—2010 年阿克苏地区土地利用转移矩阵
Table 3 Land use transfer matrix in Aksu region from 2000 to 2010

2000 年											km ²
2010 年	耕地 Cultivated land	林地 Forest	草地 Grassland	灌木地 Shrubland	湿地 Wetlands	水体 Water body	人造地表 Man-made surface	裸地 Bare land	冰川 Glacier	总计 Total	
耕地 Cultivated land	14 338.36	2.37	183.35	0	24.54	8.34	44.10	352.49	0	14 953.55	
林地 Forest	2.21	1 239.39	821.89	0	5.62	2.08	0	681.21	0.52	2 752.92	
草地 Grassland	77.44	155.03	18 730.07	1.54	46.62	18.04	1.62	671.69	4.47	19 706.52	
灌木地 Shrubland	0.37	0	109.33	15.40	0	0.01	0	332.36	0	457.47	
湿地 Wetlands	1.21	0.14	35.70	0	113.93	9.95	0	25.01	0	185.94	
水体 Water body	35.16	138.84	117.60	0.50	67.93	473.96	0.37	194.89	0.07	1 029.32	
人造地表 Man-made surface	107.70	0.00	3.70	0	0	0.20	431.43	14.44	0	557.47	
裸地 Bare land	29.74	10.99	1 687.16	6.92	6.23	22.59	0.74	85 494.39	73.83	87 332.59	
冰川 Glacier	0	0.32	13.74	0	0	0.09	0	73.95	4 589.86	4 677.96	
总计 Total	14 592.19	1 547.08	21 702.54	24.36	264.87	535.26	478.26	87 840.43	4 668.75	131 653.74	

表 4 2010—2020 年阿克苏地区土地利用转移矩阵
Table 4 Land use transfer matrix in Aksu region from 2010 to 2020

2010 年											km ²
2020 年	耕地 Cultivated land	林地 Forest	草地 Grassland	灌木地 Shrubland	湿地 Wetlands	水体 Water body	人造地表 Man-made surface	裸地 Bare land	冰川 Glacier	总计 Total	
耕地 Cultivated land	14 113.60	42.04	1 647.24	7.70	6.64	91.04	77.46	2 072.02	0	18 057.74	
林地 Forest	3.70	2 265.77	280.57	0.31	0.14	38.14	0.10	37.26	0.44	2 626.43	
草地 Grassland	156.32	239.39	16 532.96	22.55	28.10	218.28	1.89	1 937.03	44.73	19 181.25	
灌木地 Shrubland	0.37	0.29	21.34	351.96	0.01	0.03	0.00	56.61	0	430.61	
湿地 Wetlands	10.29	98.26	320.95	61.19	89.33	120.65	0.08	433.84	0	1 134.59	
水体 Water body	42.39	49.62	217.49	6.66	47.76	512.26	0.58	245.41	0.22	1 122.39	
人造地表 Man-made surface	506.32	0.13	18.82	0	0	1.02	474.01	99.60	0	1 099.90	
裸地 Bare land	120.56	15.73	526.81	7.10	13.96	47.70	3.35	82 003.40	401.05	83 139.66	
冰川 Glacier	0	41.69	140.34	0	0	0.20	0	447.42	4 231.52	4 861.17	
总计 Total	14 953.55	2 752.92	19 706.52	457.47	185.94	1 029.32	557.47	87 332.59	4 677.96	131 653.74	

2.3 土地利用图谱分析 该研究建立阿克苏地区 2000—2020 年的土地利用图谱,在空间上展示研究区的土地利用变化特征。研究区内土地利用变化分为 5 种图谱变化模式:①

稳定型,如 A-A-A;②前期变化型,如 A-B-B;③后期变化型,如 A-A-B;④反复变化型,如 A-B-A;⑤持续变化型,如 A-B-C,结果见表 5。

表 5 2000—2020 年阿克苏地区土地利用变化图谱分析
Table 5 Map analysis of land use change in Aksu region from 2000 to 2020

类型 Type	面积 Area/km ²	占比 Proportion/%	最大变化类型 Maximum change type	面积 Area/km ²	占比 Proportion/%
持续变化型 Continuous change	961.87	0.73	草地-裸地-耕地	78.86	8.20
反复变化型 Repeated change	866.85	0.66	草地-裸地-草地	303.75	35.04
后期变化型 Late-stage change	9 250.19	7.03	裸地-裸地-耕地	1 976.79	21.37
前期变化型 Early-stage change	4 398.27	3.34	草地-裸地-裸地	1 130.82	25.71
稳定型 Stable type	116 176.52	88.24	裸地-裸地-裸地	80 784.08	69.54

从表 5 可以看出,5 种图谱变化模式中,稳定型面积占比达 88.24%,处于绝对优势地位,其中以无变化的裸地为主,

面积占比 69.54%,这是由于阿克苏地区土地总量大,未利用地占比过高;后期变化型面积占比 7.03%,其中裸地-裸地-

耕地占后期变化型面积 21.37%，裸地-裸地-草地 17.58%，草地-草地-耕地占比 16.59%，3 种演变类型面积及所占比例较为接近，2010—2020 年阿克苏地区大量裸地与草地共计 3 511.49 km² 变为耕地，主要分布在阿克苏河下游和渭库绿洲外围；前期变化型面积占比 3.34%，其中草地-裸地-裸地面积 1 130.82 km²，占比 25.71%，主要分布在北部雪山和林地、草地的过渡地带，南部塔克拉玛干沙漠与绿洲过渡地带和西部山地向阿克苏绿洲的过渡带；持续变化型面积 961.87 km²，占比 0.73%，其中草地-裸地-耕地面积达 78.86 km²，占比 8.20%，此图谱中的变化类型较多；反复变化型在这 5 种类型中面积最小，其中草地-裸地-草地占反复变化型面积的 35.04%。

下面重点分析 2020 年现状为耕地和人造地表的图谱演变，即图谱栅格单元属性值末位为耕地和人造地表。由于前期变化型是在 2000—2010 年发生形成的，反复变化型、持续变化型和后期变化型都是在 2010—2020 年发生形成的，以下按时间进行简化描述。2000—2010 年各种地类转入耕地 615.19 km²，2010—2020 年各种地类转入耕地 3 944.14 km²，共计 4 559.33 km²。2000—2010 年阿拉尔市和温宿县分别新增 266.73 和 122.90 km²，各占 2000—2010 年新增总面积的 43.36%和 19.98%，其他各县则新增耕地较少，其中柯坪县新增耕地为 1.66 km²，位于末位。2010—2020 年各县新增耕地明显增多，阿克苏市和库车市耕地面积增加较多，分别达 1 128.93 和 920.57 km²。2000—2020 年阿克苏市、库车市、沙雅县和阿拉尔市耕地增长面积较多，以上县市位于阿克苏河流域下游或是渭干河下游，水资源丰富，开垦条件较好。

2000—2010 年各种地类转入人造地表 126.04 km²，2010—2020 年各种地类转入人造地表 625.89 km²，共计 751.93 km²。2000—2010 年库车县和阿克苏市分别新增 38.72 和 23.80 km²，各占 2000—2010 年新增人造地表总面积的 30.72%和 18.88%，其他各县则新增人造地表较少。2010—2020 年各县人造地表面积极明显增加，阿克苏市和温宿县人造地表面积增加较多，分别达 100.07 和 95.02 km²。2000—2020 年阿克苏市、温宿县、库车市和阿拉尔市人造地表扩张较多，以上县市地理位置优越，发展较快。

2.4 CA-Markov 模型预测 2030 年土地利用 将预测的 2020 土地利用年数据与实际 2020 年土地利用数据进行精度判断，用来分析以这种方法预测其他年份的数据可靠性。精度越高表示该方法预测越准确，效果越好。在 IDRISI 17.0 中使用 2000 和 2010 年阿克苏土地利用数据和 CA-Markov 模型模拟出阿克苏地区 2020 年土地利用数据与实际 2020 年土地利用现状数据对比，使用 IDRISI 17.0 软件中的 CROSTAB 模块进行验证，结果显示 kappa 为 0.874 5，kappa 系数大于 0.8，精度较高，模拟结果较为可信^[25-26]。2030 年土地利用模拟情况详见图 3 和表 6~7。

从表 6、7 可以看出，2020—2030 年阿克苏地区土地利用演化趋势：①大量草地与裸地转入为耕地，耕地预计增加 2 029.94 km²，绿洲向继续外缘扩展，使得阿克苏绿洲和渭库

绿洲外围地形坡度良好的草地和裸地被开发成耕地，随着高效节水灌溉的发展与推广，水资源利用效率的提高，耕地的大规模增加成为可能；②草地、林地和灌木地转出到水体和湿地中，面积减少，水体和湿地的转入较多、转出较少，水体和湿地相互转换，近年来阿克苏地区加强生态文明建设，修建阿克苏市多浪河国家湿地公园、乌什县托什干河沙棘林湿地公园和沙雅塔里木河上游湿地自然保护区等生态功能区，加强对湿地和水体的增加和保护；③人造地表快速扩张，相比 2020 年人造地表预计面积增加了 1 993.15 km²，动态度达到 18.12%，远大于其他地类的动态度，主要来源仍为耕地，随着阿克苏地区经济总量的稳步提升，产业结构的进一步优化，对人口和投资的吸引力越来越强，阿克苏地区道路用地、工业用地、宅基地等建设用地都呈增加趋势，要严格执行耕地占补平衡制度，避免城市的盲目扩张造成的用地浪费；④裸地进一步减少，转出为耕地、草地和湿地。

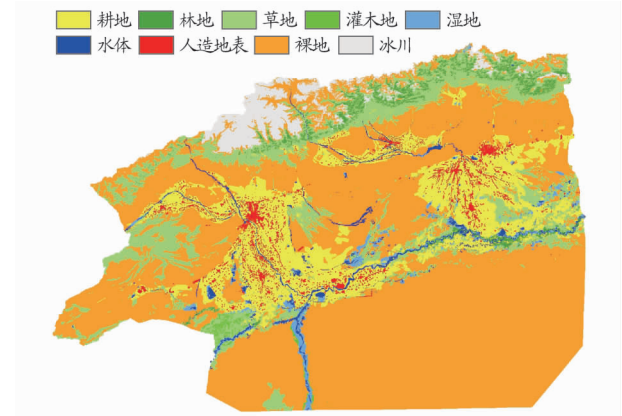


图 3 2030 年阿克苏地区土地利用预测
Fig. 3 Forecast of land use in Aksu region in 2030

表 6 2030 年阿克苏地区预测土地利用动态度及与 2020 年面积差值
Table 6 The predicted land use dynamics in Aksu region in 2030 and the area difference from 2020

土地利用类型 Land use type	2030 年			2020—2030 年面积变化 Area change from 2020 to 2030//km ²
	面积 Area km ²	占比 Proportion %	单一动态度 Single dynamics %	
耕地 Cultivated land	20 087.68	15.26	1.12	2 029.94
林地 Forest	2 404.22	1.83	-0.85	-222.21
草地 Grassland	17 767.20	13.50	-0.74	-1 414.05
灌木地 Shrubland	376.87	0.29	-1.25	-53.74
湿地 Wetlands	1 929.68	1.46	7.01	795.09
水体 Water body	1 730.71	1.31	5.42	608.32
人造地表 Man-made surface	3 093.05	2.35	18.12	1 993.15
裸地 Bare land	79 718.46	60.55	-0.41	-3 421.20
冰川 Glacier	4 545.87	3.45	-0.65	-315.30

2020—2030 年基本延续 2010—2020 年土地利用演变趋势：裸地和草地被开发，所占面积比重进一步下降；随着经济发展，人造地表进一步扩大；湿地和水体面积增加较多，林地、草地、灌木地面积较少，土地利用综合动态度(0.41%)大于前 20 年，土地利用变化加剧。

表 7 2020—2030 年阿克苏地区土地利用转移矩阵

Table 7 Land use transfer matrix in Aksu region from 2020 to 2030

km²

2030 年	2020 年									
	耕地 Cultivated land	林地 Forest	草地 Grassland	灌木地 Shrubland	湿地 Wetlands	水体 Water body	人造地表 Man-made surface	裸地 Bare land	冰川 Glacier	总计 Total
耕地 Cultivated land	16 218.06	51.73	1 973.94	2.86	2.25	0	4.62	1 834.22	0	20 087.68
林地 Forest	0	2 317.44	84.48	0	0	0	0	2.30	0	2 404.22
草地 Grassland	1.22	0	16 510.29	0.10	0	0	0.27	1 255.32	0	17 767.20
灌木地 Shrubland	0	0	1.49	328.60	0	0	0	46.78	0	376.87
湿地 Wetlands	1.63	158.03	324.53	90.48	948.31	0.52	0	406.18	0	1 929.68
水体 Water body	18.57	33.55	125.93	8.57	184.03	1 121.87	0.06	238.13	0	1 730.71
人造地表 Man-made surface	1 817.25	0	45.61	0	0	0	1 094.67	135.52	0	3 093.05
裸地 Bare land	1.01	0	0.24	0	0	0	0.28	79 219.51	497.42	79 718.46
冰川 Glacier	0	65.68	114.74	0	0	0	0	1.70	4 363.75	4 545.87
总计 Total	18 057.74	2 626.43	19 181.25	430.61	1 134.59	1 122.39	1 099.90	83 139.66	4 861.17	131 653.74

近期阿克苏地区土地利用趋势及建议:①建设用地扩张显著增加。在“一带一路”倡议、西部大开发和承接东部产业的背景下,阿克苏地区拥有丰富的石油、煤电、矿产等工业资源以及特色林果、棉花、畜产品和粮等农业资源,地区的社会经济发展与城镇化建设都迎来了新的机遇和挑战,地区建设用地供需矛盾将进一步加剧。要充分利用已有建设用地,改造存量闲置低效用地,提高地区建设用地节约集约利用水平;继续开展城乡用地增减挂钩、富民安居等工程,优化农村居民点用地布局。此外地区永久基本农田的空间布局也存在一定问题,如 2017 年划定的永久基本农田保护区域里城镇较近且分散零星分布,自身不具规模,也阻碍了城镇的进一步发展。在未来永久基本农田调整补划中,在政策允许的情况下将城区内和城区周边的永久基本农田在数量不减少质量不降低的情况下调整到城市周边外或城市周边的大片优质耕地区域内,使其集中连片好耕作。建设用地在需求大幅增加、总量增加较少情况下,促使地区转变土地利用方式、提高土地利用效率。②耕地总量明显提升。阿克苏地区拥有小麦、玉米、水稻、棉花、红枣、苹果、核桃、香梨、设施蔬菜等丰富的农业种植资源,但现阶段耕地中高标准农田占比较低,许多耕地面临盐渍化、潜在盐渍化土地、沙化的风险,有的耕地甚至严重干旱缺水。耕地要继续完善路林渠等配套设施,适当放缓耕地开发速度,对于已有耕地要提升土地资源利用效率,继续开展高标准农田与高效节水建设,对于坡度较高适合发展特色林果业要退耕还林,对于严重缺水的耕地实行退耕还草,做到因地制宜。③湿地和水体增加,草地、林地减少。针对近年来的生态环境问题,阿克苏地区确定土地空间生态修复格局并对土地空间生态修复重大工程布局为形成和谐共生的生态建设示范区不懈努力。对现状生态保护项目、生态保护等级进行详细梳理,并且“双评价”分析结果,在保证生态环境不受影响的情况下,适度地、合理地重新确定生态保护红线的范围;完善国土空间规划,统筹划定生态保护红线、永久基本农田保护红线和城镇开发边界。

3 结论与讨论

该研究以 2000、2010 和 2020 年 3 期 GlobeLand 30 数据

为基础,运用土地利用动态度、土地转移矩阵和土地利用变化图谱分析阿克苏地区 2000—2020 年的土地利用变化并结合 CA-Markov 模型对阿克苏地区 2030 年土地利用进行预测,得出以下结论:

(1)2000—2010 年,灌木地水体和林地动态度较大,在此期间变化速度较快;2010—2020 年,湿地、人造地表和耕地动态度较大,在此期间变化速度较快;2000—2020 年,裸地和草地持续大面积减少,耕地、人造地表和水体持续增加。通过对比前后 10 年的土地利用变化后发现,阿克苏地区 2010—2020 年综合土地利用动态度(0.37%)大于 2000—2010 年(0.20%),说明 2010—2020 年阿克苏地区对土地的开发和利用更为迅速。

(2)2000—2020 年耕地主要的来源为裸地和草地;林地最大来源为草地,同时与草地之间相互转换;湿地和水体相互转换;人造地表的来源为耕地;裸地和草地相互转换,裸地和草地持续转出为其他地类。

(3)2000—2020 年,5 种图谱变化模式中稳定型占绝对优势;后期变化型和前期变化型占总面积的 10.37%,比较大;持续变化型和反复变化型则很少,共占总面积的 1.39%。

(4)利用 CA-Markov 模型对研究区 2030 年土地利用变化进行预测,kappa 系数大于 0.8,精度较高,用来分析未来土地利用趋势并提出建议。

该研究选取的土地利用数据为 30 m 分辨率,存在一定误差且分类较少。随着科技的发展,未来会选取精度更高、分类更细的数据,进一步研究土地利用变化。

在利用 CA-Markov 模型对研究区 2030 年土地利用变化进行预测时,选取的影响因子较少,并仅对耕地和人造地表制作了专门的适宜性图集,其他地类则沿用 Markov 操作中直接得到的适宜性图集;CA-Markov 模型预测是基于上一时间段的土地利用变化,所以预测的结果所表明趋势与上一时间段的土地利用变化方向有很多相似。另外,土地利用预测中受政策影响较大,该研究在政策方面考虑较少。

C:N 高与土壤 N 含量极少有关,微生物需要从土壤中摄取 N 来满足生长需要^[14],有机质的分解速率较慢,何高迅等^[15]认为当土壤 C:N 越高,越有利于有机物的积累,4 种复垦模式土壤均在有机物积累阶段。土壤 C:P 的高低与全磷含量关系密切,是 P 有效性的重要指标。土壤 C:P 高不利于微生物分解有机质,且微生物会与植物争夺土壤 P,植物生长受到限制^[16]。土壤 N:P 可以用来判别 N 的饱和度,也可以预测不同土壤养分的限制类型。研究表明,N:P<10 时受 N 限制^[17],该研究发现 4 种复垦模式土壤养分受 N 限制。

3.3 土壤 C、N、P 含量及其比值的相关性分析 该研究结果表明,土壤 C 含量与土壤 C:N 呈显著负相关,土壤 P 含量与土壤 C 含量呈极显著正相关,与土壤 C:N 呈极显著负相关,说明土壤养分受到 N 的限制更大。因此,在海州露天矿排土场中要提高土壤氮的供给,以利于植被恢复。

参考文献

- [1] 王绍强,于贵瑞.生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J].生态学报,2008,28(8):3937-3947.
- [2] 张亚冰,吕文强,周传艳,等.贵州月亮山 5 个优势树种叶片与土壤生态化学计量特征[J].水土保持研究,2017,24(5):182-188.
- [3] 胡忠良,潘根兴,李恋卿,等.贵州喀斯特山区不同植被下土壤 C、N、P 含量和空间异质性[J].生态学报,2009,29(8):4187-4195.
- [4] 鲍士旦.土壤农业化学[M].北京:中国农业出版社,2000:22-100.
- [5] 龙攀,苏姗,黄亚男,等.双季稻田冬季种植模式对土壤有机碳和碳库

管理指数的影响[J].应用生态学报,2019,30(4):1135-1142.

- [6] 薛睿,柴春山,马驰,等.黄土丘陵沟壑区柠条人工林地土壤养分特征研究[J].中国水土保持,2019(7):49-51,73.
- [7] 马剑,刘贤德,金铭,等.祁连山 5 种典型灌丛土壤生态化学计量特征[J].西北植物学报,2021,41(8):1391-1400.
- [8] 全国土壤普查办公室.中国土壤普查技术[M].北京:农业出版社,1992.
- [9] 徐露燕,田大伦,王光军,等.湘潭锰矿采树叶片和土壤 N、P 化学计量特征[J].生态学报,2014,34(9):2316-2322.
- [10] 吕文强,唐金刚,罗时琴,等.4 种植被恢复模式对贵州石漠化地区表层土壤有机碳氮的影响研究[J].林业资源管理,2016(5):47-52,70.
- [11] 张光德,赵传燕,戎战磊,等.祁连山中不同植被类型土壤生态化学计量特征研究[J].兰州大学学报(自然科学版),2019,55(4):533-540.
- [12] 李尧,雷泽勇,于东伟,等.樟子松人工林生长对土壤碳氮磷化学计量的影响[J].安徽农业科学,2021,49(2):91-94.
- [13] 董雪,辛智鸣,黄雅茹,等.乌兰布和沙漠典型灌木群落土壤化学计量特征[J].生态学报,2019,39(17):6247-6256.
- [14] BAI Y F, CHEN S Y, SHI S R, et al. Effects of different management approaches on the stoichiometric characteristics of soil C, N, and P in a mature Chinese fir plantation[J]. Science of the total environment, 2020, 723:1-8.
- [15] 何高迅,王越,彭淑娟,等.滇中退化山地不同植被恢复下土壤碳氮磷储量与生态化学计量特征[J].生态学报,2020,40(13):4425-4435.
- [16] 赵栋,王琪,连娥,等.白龙江干旱河谷不同植被土壤碳氮磷化学计量特征[J].中国土壤与肥料,2020(4):178-185.
- [17] BUI E N, HENDERSON B L C. N:P stoichiometry in Australian soils with respect to vegetation and environmental factors[J]. Plant and soil, 2013, 373(1/2):553-568.

(上接第 80 页)

参考文献

- [1] 韩会然,杨成凤,宋金平.北京市土地利用空间格局演化模拟及预测[J].地理科学进展,2015,34(8):976-986.
- [2] 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.
- [3] 李广东.全球土地覆被时空变化与中国贡献[J].地理学报,2022,77(2):353-368.
- [4] 刘纪远,宁佳,匡文慧,等.2010—2015 年中国土地利用变化的时空格局与新特征[J].地理学报,2018,73(5):789-802.
- [5] 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.
- [6] 陈军,陈利军,李然,等.基于 GlobeLand30 的全球城乡建设用地空间分布与变化统计分析[J].测绘学报,2015,44(11):1181-1188.
- [7] 陈军.基于 GlobeLand30 的全球耕地利用格局变化研究[J].中国农业科学,2018,51(6):1089-1090.
- [8] 余德贵,吴群.基于 Logistic-Markov 方法的土地利用结构变化多因素驱动预测模型研究与应用[J].水土保持通报,2017,37(1):149-154,160.
- [9] 苏雷,朱京海,胡克梅,等.基于 CA 模型的城市空间扩展模拟预测:以锦葫沿海地区为例[J].国土资源遥感,2012,24(3):129-134.
- [10] 张乐勤,陈发奎.基于 Logistic 模型的中国城镇化演进对耕地影响前景预测及分析[J].农业工程学报,2014,30(4):1-11.
- [11] 凌成星,鞠洪波,张怀清,等.基于 CA-MARKOV 模型的北京湿地资源变化预测研究[J].中国农学通报,2012,28(20):262-269.
- [12] 崔敬涛.基于 Logistic-CA-Markov 模型的临沂市土地利用变化模拟预测研究[D].南京:南京大学,2014.
- [13] 陈晓晓,张永福.基于 CA-Markov 模型的县域土地利用时空演变分析及预测研究[J].安徽农业科学,2020,48(18):65-69.

- [14] 王俊智.基于 GWR 模型的耕地利用时空演变及驱动力分析:以新疆阿克苏地区为例[D].乌鲁木齐:新疆大学,2016.
- [15] 梁田田,张永福,夏楠,等.近 26 年和田绿洲人口对 LULC 时空变化分析及其生态响应[J].江苏农业科学,2020,48(16):302-308.
- [16] 孙智斌,高敏华,崔雪锋.基于遥感与 GIS 的天山北坡经济带 2000—2015 年土地利用动态变化研究[J].北京师范大学学报(自然科学版),2018,54(3):397-404.
- [17] 郭佳君,李茜.耕地资源禀赋与农业产业空间布局优化:以山西省榆社县为例[J].湖北农业科学,2021,60(16):70-75.
- [18] 伊木然江·阿卜来提,张永福,孜比布拉·司马义.基于 GlobeLand 30 的哈密市 2000—2020 年土地利用格局变化研究[J].水土保持通报,2021,41(1):182-189,196.
- [19] 何泽雁,林惠花,武国胜.长汀县土地利用动态变化及生态安全评价[J].福建师范大学学报(自然科学版),2021,37(6):81-92.
- [20] 韩文文.基于 CA-Markov 的农林交错区土地利用变化分析及预测[D].哈尔滨:东北农业大学,2018.
- [21] 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.
- [22] 刘培,贾守军,马朝阳,等.基于 GlobeLand 30 数据和 CA-Markov 模型的郑州市 2000—2020 年地表覆盖变化特征及预测分析[J].水土保持通报,2017,37(4):282-287.
- [23] 霍明明,张轶莹,陈伟强.基于 CA-Markov 的土地利用变化及预测研究:以巩义市鲁庄镇为例[J].中国农学通报,2015,31(12):279-284.
- [24] 何丹,周璟,高伟,等.基于 CA-Markov 模型的滇池流域土地利用变化动态模拟研究[J].北京大学学报(自然科学版),2014,50(6):1095-1105.
- [25] 孙晓莉,张顺安,刘应芳,等.基于 GIS 的土地利用动态变化及其驱动力分析[J].地理空间信息,2021,19(11):101-103,111.
- [26] 张杰,周寅康,李仁强,等.土地利用/覆盖变化空间直观模拟精度检验与不确定性分析:以北京都市区为例[J].中国科学(D 辑:地球科学),2009,39(11):1560-1569.