

# 基于土地利用变化及 CA-Markov 土地利用变化预测模型预测的生态敏感性分析

阿地来·阿地力, 张永福\*, 马丽娜 (新疆大学绿洲生态重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830046)

**摘要** 土地利用变化是导致生态敏感性的重要因素, 不仅体现了土地资源的数量、质量方面的特征, 还反映了土地利用格局动态。市(县)生态敏感性研究对生态环境保护 and 区域发展具有最直接的意义。融合土地利用和生态环境之间相互关系的基本结构, 利用土地利用动态度模型和地理信息系统空间分析功能, 建成土地利用变化下的生态敏感性指标体系和分级标准, 分析建设用地、林地、草地、耕地、水域、未利用地等土地利用类型的面积比例和变化过程, 对库车县 2009—2016 年期间单一土地利用动态度变化和生态敏感性程度进行了定量研究。通过 CA-Markov 土地利用变化预测模型预测库车县 2020 年土地利用格局, 根据土地利用强度变化率的比值得到土地利用变化下的生态敏感性指数, 运用 Arc GIS 空间叠加功能分析其过程, 目的在于得到生态敏感性分布情况。生态敏感性划分为高敏感、中敏感、低敏感及不敏感 4 个等级。得出以下结论: 2009—2016 年间耕地、建设用地和林地每年以 0.34%、1.37% 和 0.22% 的速度增加; 草地、水域和未利用地每年以 0.24%、0.04% 和 0.27% 的速度减少。库车县 2020 年的土地利用预测结果表明, 高敏感和低敏感区域面积减少到 2 458.92 km<sup>2</sup> 和 1 055.71 km<sup>2</sup>, 中敏感区域由 2009 年的 7 312.59 km<sup>2</sup> 减少到 2016 年的 7 268.87 km<sup>2</sup>, 再减少到 2020 年的 6 534.97 km<sup>2</sup>, 不敏感区域面积由 2009 年的 3 604.88 km<sup>2</sup> 增加到 2016 年的 3 626.83 km<sup>2</sup>, 再增加到 2020 年的 4 476.57 km<sup>2</sup>。该研究将为库车县土地可持续利用提供借鉴, 也为区域土地环境影响的动态模拟提供新思路。

**关键词** 生态敏感性; CA-Markov; 土地利用; 库车县

**中图分类号** F301.2 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2018)36-0042-06

## Ecological Sensitivity Analysis Based on Land Use Change and Prediction of CA-Markov Land Use Change Prediction Model

ADILAI Adili, ZHANG Yong-fu, MA Li-na (Key Laboratory of Oasis Ecology, Xinjiang University, Urumchi, Xinjiang 830046)

**Abstract** Land use change is an important factor leading to ecological sensitivity. It not only reflects the quantity and quality of land resources, but also reflects the dynamics of land use patterns. City (county) ecological sensitivity research has the most direct significance for ecological environmental protection and regional development. Integrating the basic structure of the relationship between land use and ecological environment, using the land use dynamics model and the geographic information system spatial analysis function, the ecological sensitivity index system and grading standards under land use change were built, and the construction land, forest land and grassland were analyzed. The area ratio and change process of land use types such as cultivated land, water area and unused land were quantitatively studied for the change of single land use dynamic degree and ecological sensitivity during the period from 2009 to 2016 in Kuche County. The CA-Markov land use change prediction model was used to predict the land use pattern of Kuche County in 2020, and the ratio of land use intensity change rate was obtained by the ecological sensitivity index under land use change. The Arc GIS spatial superposition function was used to analyze the process. The ecological sensitivity level was divided into four levels: high sensitivity, medium sensitivity, low sensitivity and insensitivity. The paper drew the following conclusions: the cultivated land and construction and forest land increased by 0.34%, 1.37% and 0.22% per year from 2009 to 2016. Grassland, water and unused land were decreasing at a rate of 0.24%, 0.04% and 0.27% per year. The land use forecast results of Kuche County in 2020 indicated that the area of high-sensitivity and low-sensitivity areas in Kuche County had decreased to 2 458.92 km<sup>2</sup> and 1 055.71 km<sup>2</sup>, and the sensitive area had been reduced from 7 312.59 km<sup>2</sup> in 2009 to 7 268.87 km<sup>2</sup> in 2016, and then decreased to 6 534.97 km<sup>2</sup> in 2020. The area of insensitivity area had been increased from 3 604.88 km<sup>2</sup> in 2009 to 3 626.83 km<sup>2</sup> in 2016, and then increased to 4 476.57 km<sup>2</sup> in 2020. This study will provide reference for the sustainable use of land in Kuche County, and also provide new ideas for the dynamic simulation of regional land environmental impact.

**Key words** Ecological sensitivity; CA-Markov; Land use; Kuche County

土地利用和土地覆盖变化(LUCC)是研究全球变化和可持续发展的基础<sup>[1]</sup>。土地利用变化和城市化对生态系统和可持续土地利用的影响已引起研究人员越来越多的兴趣<sup>[2]</sup>。随着城市化进程的加快, 农田和农村居民用地的增加已经转化为城市用地。城市扩张模式正在改变地球表面温度并影响全球气候<sup>[3]</sup>, 导致土地退化<sup>[4]</sup>、海平面升高以及其他全球环境问题。城市化进程不仅反映在城市人口不断增长和相关的经济增长中, 而且反映在城市土地使用类型和面积的变化上。模拟城市规划对土地利用变化的影响对于城市地区的可持续发展非常重要<sup>[5]</sup>。城市蔓延受环境和人为因素的影响, 其运行机制非常复杂。土地利用作为人类最基本的实践活动, 与土地生态系统及其功能密切相关<sup>[6]</sup>。导致生态敏

感性的重要因素是土地利用变化, 不仅体现了土地资源的质量、数量方面的特征, 还反映了土地利用分布格局动态。城市用地的空间分布动态格局与过程是城乡关系变化和城乡土地利用现代化过程的主要方面之一。土地利用生态敏感性分析是区域生态规划中最主要的内容, 也是区域土地利用总体规划的基础性研究, 是评价不同的土地利用方式对区域生态环境的影响及其生态效用的主要方法<sup>[7-8]</sup>。

生态敏感性是指自然环境变化与人类活动影响下生态系统程度的变化, 表明区域生态环境问题发生的可能性<sup>[9]</sup>。生态敏感性评估是一个识别自然环境背景下的潜在生态问题, 然后将其置于特定区域的过程<sup>[10]</sup>。生态敏感性评估和生态功能研究已基本完成省级规模。然而, 关于市(县)规模的研究仍然有限<sup>[11-12]</sup>。评估方法正处于勘探和开发阶段。在没有统一标准的情况下, 指数选择有任意性<sup>[13]</sup>。该研究通过监督分类技术对库车县 2009 年和 2016 年的土地利用变化进行分类, 并计算土地利用变化类型的覆盖面积, 根据土地利用现状结果分析库车县生态敏感性。通过 CA-Markov

**基金项目** 国家自然科学基金项目(41161063)。

**作者简介** 阿地来·阿地力(1993—), 女, 新疆乌鲁木齐人, 硕士研究生, 研究方向: 国土资源规划, 国土资源评价。\* 通讯作者, 副教授, 硕士生导师, 从事土地资源评价及土地利用规划、土地整治开发研究。

**收稿日期** 2018-08-13

土地利用变化预测模型预测库车县 2020 年的土地利用变化动态,进而分析人为和自然元素对土地利用及生态敏感性的影响。

## 1 研究区概况

库车县位于天山中部南麓,塔里木盆地北缘,地理位置为  $40^{\circ}46' \sim 42^{\circ}35'N, 82^{\circ}35' \sim 84^{\circ}17'E$  (图 1),东与巴音郭楞蒙古自治州的轮台县为邻,东南与尉犁县相接,南靠塔克拉玛干沙漠,西南与沙雅县相连,西以渭干河为界,与新和县隔河相望,西北与拜城县接壤,北部与巴音郭楞蒙古自治州和静县毗连,属阿克苏地区东端。县境南北长 193 km,东西宽 164 km,全县面积 1.45 万  $km^2$ ,县城东距自治区首府乌鲁木齐市直线距离 448 km,公路里程 753 km,西距行署驻地阿克苏市直线距离 228 km,公路里程 257 km。库车县东南胡杨林由于受干旱影响,生长脆弱,面积逐渐减少,对绿洲生态的保护作用下降。

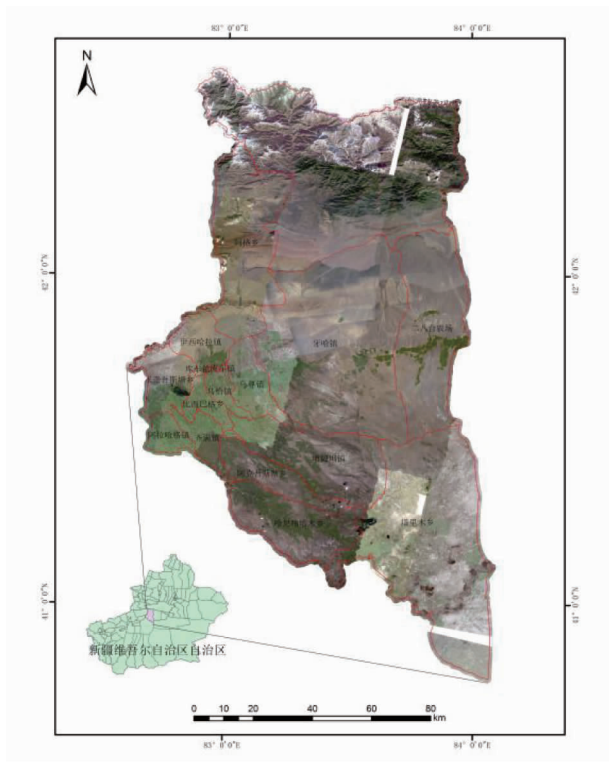


图 1 研究区示意

Fig.1 The map of study area

## 2 数据收集与研究方法

**2.1 资料收集与处理** 选取 2009 年 9 月 6 日,2016 年 9 月 10 日的 Landsat-TM 遥感影像,空间分辨率为  $30 m \times 30 m$ 。在遥感图像处理软件 ENVI5.1 的支持下裁剪研究区,经过几何校正和辐射校正,利用最大似然分类法和目视解译结合的方法,对库车县不同时相的 2 幅影像图进行监督分类。另外,收集库车县地形图、行政区划图、植被分布图、矢量数据、野外考察等资料。根据处理好的数据以及收集的资料,将库车县的土地利用类型分为耕地、建设用地、草地、林地、水域、未利用地,与分类结果相结合,构建分级标准和土地利用敏感性指标体系,获取库车县 2009 年和 2016 年的土地利用生

态敏感性分布图。

## 2.2 研究方法

**2.2.1 土地利用动态度。**土地利用动态度是土地利用面积和数量变化研究方面经常用到的方法之一,通过分析土地利用动态度可以了解土地利用变化结果以及变化趋势,它可定量描述一定时间范围内某一土地利用类型面积的净变化和土地利用类型的数量变化情况<sup>[14-15]</sup>,其表达式为:

$$K = \frac{S_2 - S_1}{S_1} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中, $S_1$ 和 $S_2$ 代表研究初期和末期区域某种土地利用类型面积; $T$ 为研究时段,当 $T$ 的单位为年时, $K$ 值就是该区域某种土地利用类型的年变化率。

**2.2.2 构建指标体系。**土地利用是根据当地人们的不同用地需求用途和用量而划分出来的地表区域自然属性,不同的土地利用类型受自然属性与人为活动干扰的程度都有所不同。库车县土地生态敏感性是在多种生态因子的共同作用下形成,如高程、坡度、水体、植被覆盖度、土地利用、土壤盐渍化、土地沙漠化等,其中对城市生态敏感性的影响和贡献最大的是土地利用,这种趋势为库车县土地利用生态敏感性分析和分级评价提供了可能,结果参照 2003 年国家环保总局制定的《生态功能区划暂行规程》附件<sup>[16]</sup>中提出的生态环境敏感性分级标准和指标体系,对库车县土地利用生态敏感区进行划分,具体划分依据如表 1 所示。

表 1 土地利用敏感性分级指标及划分

Table 1 Sensitivity indicators of land use classification and division

编号 Code	等级 Grade	分类标准 Classification standard	分级赋值 Graded assignment
1	高敏感	灌木林地、疏林地、未成林和造林地、水库、湖泊、河流	7
2	中敏感	草地、园地、设施农用地	5
3	低敏感	耕地、灌溉水田	3
4	不敏感	建设用地、农村居民点、未利用地、其他用地	1

**2.2.3 分级标准与方法。**参考相关研究结果<sup>[12,17-19]</sup>,遵守生态敏感性指标选取的综合性、动态性、科学性和系统性原则,选择能反映库车县生态敏感性特征的土地利用敏感性分级标准(表 2)。以土地利用生态敏感性分级标准和指标体系为基础,通过 Arc GIS10.1 的空间分析功能和自然间断点分级法(Jenks)对单因子栅格图层分级赋值并且在 Arc GIS 栅格计算器的 Field Calculator 和 calculate Geometry 模块中对分级指标的敏感性栅格图进行运算和面积统计,其公式为:

$$C_i = \sqrt{\prod_{k=1}^m S_k} \quad (2)$$

式(2)中, $C_i$ 代表空间单元对第 $i$ 项敏感性因子指数; $m$ 为第 $i$ 个因子的指标个数; $S_k$ 为第 $k$ 项指标的敏感性空间分布。

**2.2.4 CA-Markov 土地利用变化预测模型。**CA 模型是同时具备时间和空间的预测模型,其模型中的变量包括状态、领域空间和时间,这些变量都呈现离散的特点<sup>[20]</sup>。

表2 库车县土地利用敏感性分级标准

Table 2 Ecological sensitivity standard of land use classification in Kuche County

编号 Code	等级 Grade	土地分类 Land classification	分级赋值 Graded assignment
1	高敏感	林地、水域	7
2	中敏感	草地	5
3	低敏感	耕地	3
4	不敏感	未利用地、建设用地	1

$$S_{(t+1)} = f[S_{(t)}, N] \quad (3)$$

式(3)中, $S$ 为元胞有限、离散的状态集合; $N$ 为元胞的邻域; $t, t+1$ 表示不同的时刻; $f$ 为局部空间元胞状态的转化规则。

Markov 链<sup>[21]</sup>可以描述一个时间状态到另一个时间状态土地利用的变化趋势,并以此为规则预测将来的变化趋势。此规则是通过从时间 1 到时间 2 的土地利用变化转换概率矩阵来创建。

$$S_{(t+1)} = P_{ij} \times S_{(t)} \quad (4)$$

式(4)中, $S_{(t+1)}$ 和 $S_{(t)}$ 分别表示 $t+1$ 和 $t$ 时刻土地利用系统的状态, $P_{ij}$ 为状态转移矩阵。CA-Markov 模型综合了 Markov 模型长时间数量预测的优点和 CA 模型模拟空间变化趋势的能力,提高了土地利用类型变化趋势的预测精度<sup>[22]</sup>。在土地利用网格图中,每个格网代表 1 个细胞,每个细胞表示土地利用类型,通过地理信息系统软件的支持,利用变换矩阵和条件概率图来确定细胞状态的变化规则,并对土地利用格局变化趋势进行模拟,得到不同土地利用的变化趋势<sup>[23]</sup>。

**2.2.5 Kappa 系数预测精度检验。**为了验证 CA-Markov 模型预测精度,在分类的精度评价中,不同的精度评价方法有不同的划分标准。笔者主要采用 IDRISI 软件中 CROSSTAB

工具计算的 overall Kappa 系数来评价预测图和原始图之间的一致性。直接借用 Cohen 提出的 Kappa 系数分类评价标准<sup>[24-25]</sup>,即 $(-\infty, 0.00)$ ,很差; $[0.00, 0.20)$ ,微弱; $[0.20, 0.40)$ ,弱; $[0.40, 0.60)$ ,适中; $[0.60, 0.80)$ ,显著; $[0.80, 1.00]$ ,最佳。

### 3 结果与分析

**3.1 土地利用面积变化** 区域土地利用数量变化主要表现在面积变化上,面积变化先反映在不同土地利用类型的总量变化上,通过分析土地利用的总量变化可以分析出土地利用的变化趋势和土地利用结构变化特征。依据上述土地利用分类的理想状态,对库车县 2009—2016 年的各类土地面积进行统计。通过计算和分析库车县土地利用变化可以看出,2009—2016 年研究区不同类型土地的分布及数量变化较为显著,其中最直接的表现表现为耕地、建设用地、林地和水域面积增加,草地及未利用地面积明显减少,其中耕地、建设用地、林地和水域数量分别增长 0.34%、1.37%、0.22%和 0.11%,草地及未利用地数量分别减少 0.24%、0.27%。土地利用现状如图 2 所示,动态度变化幅度如图 3 所示。库车县耕地、建设用地、林地和水域面积由 2009 年 949.4、229.81、2 259.25、121.04 km<sup>2</sup> 增加到 2016 年的 971.89、251.89、2 294.74、121.93 km<sup>2</sup>;草地和未利用地由 2009 年的 6 535.93、4 419.69 km<sup>2</sup>减少到 2016 年的 6 424.74、4 337.31 km<sup>2</sup>(表 3)。随着社会发展及科技水平提高,城镇化进程加快以及政府对农业的扶持力度加大,库车县未利用地资源开发利用幅度较大,加之在当地政府的领导下农民积极开展土地整治工程,改善了原有的生产模式,逐渐提高了人们保护农用地、保护生态环境的意愿。

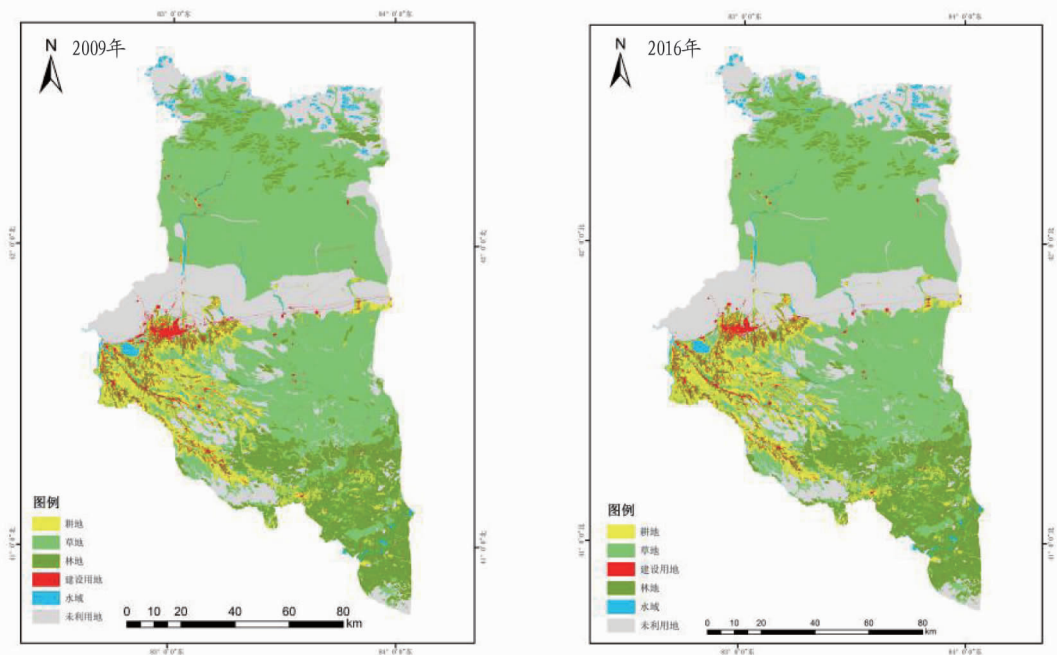


图2 2009—2016年库车县土地利用现状

Fig.2 Current land use map of Kuche County from 2009 to 2016



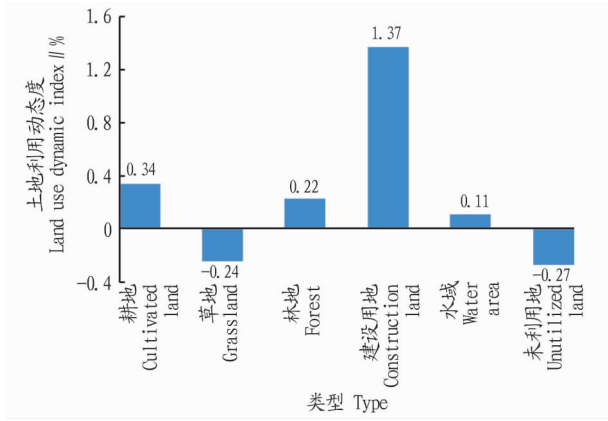


图3 库车县土地利用类型动态度

Fig.3 The dynamic degree of land use types in Kuche County

表3 库车县土地利用类型变化幅度

Table 3 The magnitude of land use changes in Kuche County

类型 Type	2009年		2016年		面积净变化量 Net change in area//km <sup>2</sup>	变化比例 Change ratio//%
	面积 Area//km <sup>2</sup>	比例 Proportion//%	面积 Area//km <sup>2</sup>	比例 Proportion//%		
耕地 Cultivated land	949.40	15.30	971.89	14.95	22.49	-0.35
草地 Grassland	6 535.93	2.22	6 424.47	2.26	-111.46	0.04
林地 Woodland	2 259.25	6.43	2 294.74	6.33	35.49	-0.10
建设用地 Construction land	229.81	63.20	251.89	57.66	22.08	-5.54
水域 Waters	121.04	120.00	121.93	119.13	0.89	-0.88
未利用地 Unutilized land	4 419.69	3.29	4 337.31	3.35	-82.38	-0.06

性程度相对中等的区域,库车县生态中敏感区域是以草地为主,主要分布在墩阔坦镇、哈尼喀塔木乡、塔里木乡等。库车县生态中敏感区面积由2009年的7 312.59 km<sup>2</sup>减少到2016年的7 286.87 km<sup>2</sup>。中敏感区属于库车县生态系统健康运转的防护区,土地利用过程中以生态维护为主,防止生态建设受到威胁。

**3.2.3 低敏感区分析。**库车县生态低敏感区域是以耕地为主,主要分布在阿拉哈格镇、齐满镇、比西巴格乡等。库车县生态低敏感区面积由2009年的1 063.11 km<sup>2</sup>增加到2016年的1 063.60 km<sup>2</sup>。低敏感区是库车县生态系统的保护区,土地利用过程中以农用地为主,在基本农田保护红线政策的影响下产生耕地面积的变化。该区生态环境具有较强的自我恢复能力,敏感性程度总的来说处于良好状态。

**3.2.4 不敏感区分析。**生态不敏感区适合以城市建设和农业生产为主,生态系统已经形成了一定的稳定性,各种人类开发活动不会对生态系统产生破坏性干扰,随着社会和经济的快速发展,库车县建设用地面积增多而被开发利用的未利用地面积减少,因而库车县生态不敏感区域面积由2009年的3 604.88 km<sup>2</sup>增加到2016年的3 626.83 km<sup>2</sup>。

### 3.3 基于土地利用结构预测的库车县2020年生态敏感性测算

**3.3.1 库车县2020年土地利用结构变化预测分析。**采用CA-Markov土地利用变化预测模型对库车县2020年的土地

**3.2 库车县土地利用敏感度分析** 对2009—2016年库车县各乡镇基于土地利用结构变化下的生态敏感性分布进行分析,将生态敏感性等级划分为高敏感、中敏感、低敏感及不敏感4个等级,最后以划分出来的生态敏感性分布图进行统计分析(图4)。

**3.2.1 高敏感区分析。**土地利用变化生态敏感性程度高的区域则为高度敏感区,高度敏感区生态系统手动的土地利用影响最大,按空间分布来看,库车县生态敏感性高的区域是以林地和水域为主,分布在阿拉哈格镇、齐满镇、比西巴格乡、乌恰镇、乌尊镇、阿克吾斯塘乡等农用地面积比较广的区域以沟渠为主。库车县生态高敏感区面积由2009年的2 545.58 km<sup>2</sup>增加到2016年的2 548.85 km<sup>2</sup>。

**3.2.2 中敏感区分析。**中敏感区是土地利用变化生态敏感

利用结构进行预测并根据库车县国土局提供的《库车县土地利用总体规划(2010—2020年)》按照当地政府和国土局有利于库车县城市发展和农业发展共存的指标布局理念,以该研究中分类出来的2016年土地利用分类图为基础数据做出2020年的土地利用图(图5),预测结果见表4。

结果表明,到2020年库车县土地利用变化幅度较大,耕地面积和建设用地面积大幅度增加,由2016年的971.89、251.89 km<sup>2</sup>增加到2020年的996.60、271.31 km<sup>2</sup>,草地、林地和未利用地面积大幅度减少,由2016年的6 424.47、2 294.74和4 337.31 km<sup>2</sup>减少到2020年的6 214.24、2 166.53和4 323.28 km<sup>2</sup>,水域面积相对变化不大。根据国家和地方政策导向,积极实行土地复垦和土地整治规划,坚持从确保粮食安全、维护社会稳定出发,严格保护耕地,严格控制非农建设占用耕地,保障耕地扩展面积递增,实现生态恢复。同时随着库车县人口和经济实力的提升,建设用地的布局和面积也发生了较大的变化,人口向城镇集中、住宅向社区集中,有效控制了建设用地规模,城乡建设用地适度增加,交通水利等基础设施用地充分保障,建设用地内部结构进一步优化。

**3.3.2 库车县2020年生态敏感性预测分析。**库车县2020年的土地利用结构变化以构建环境友好型土地利用方式为目标,以保护为前提进行开发建设,加强环境保护与生态建设工程。通过预测出的土地利用结构进一步进行库车县2020年的生态敏感性预测(图6),预测结果如下:到2020年库车

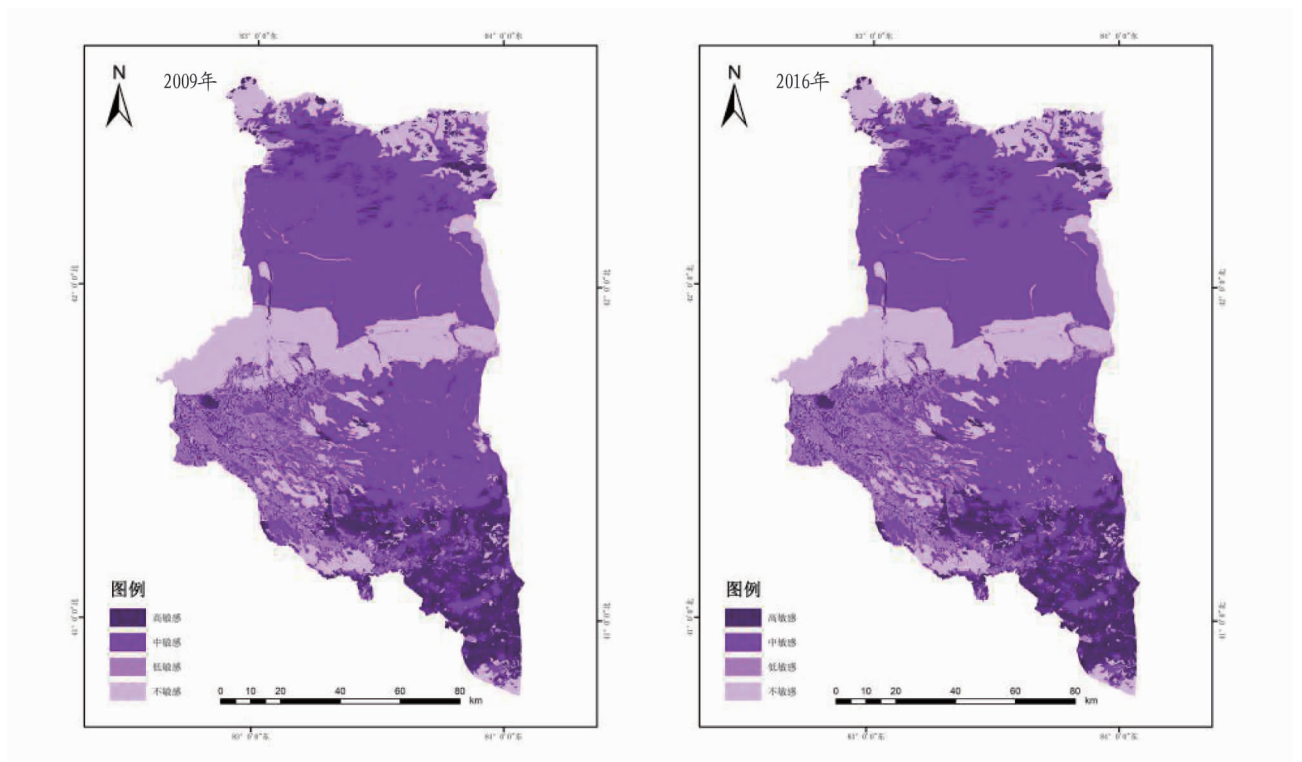


图4 2009—2016年库车县土地利用的生态敏感性分布

Fig.4 Ecological sensitivity distributions of land use in Kuche County from 2009 to 2016

县高敏感性区域面积 2 458.92 km<sup>2</sup>,中敏感性区域面积 6 534.97 km<sup>2</sup>,低敏感性区域面积 1 055.71 km<sup>2</sup>,不敏感性区域面积 4 476.57 km<sup>2</sup>。由此可见,库车县的土地利用趋势对生态敏感性产生了一定的影响,高敏感性、中敏感性、低敏感

性区域面积明显减少,不敏感性区域面积大幅度提高,可以为库车县未来生态安全建设打好基础。库车县基础性生态用地主要集中在塔里木河、库车河、渭干河、盐水沟沿岸及铜场水库周边区域,可以进一步加强生态敏感性区域的保护。

表4 库车县2020年土地利用类型变化预测

Table 4 Forecast of the change of land use type in Kuche County in 2020

类型 Type	面积 Area//km <sup>2</sup>	比例 Proportion//%
耕地 Cultivated land	996.60	6.86
草地 Grassland	6 214.24	42.78
林地 Woodland	2 166.53	14.92
建设用地 Construction land	271.31	1.87
水域 Waters	116.75	0.80
未利用地 Unutilized land	4 323.28	29.76

#### 4 结论与讨论

不同研究时段的城市土地利用敏感区域面积和比例各不相同,经研究可得土地生态敏感性结果,库车县高敏感和低敏感区域面积由 2009 年的 2 545.58、1 063.11 km<sup>2</sup> 增长到 2016 年的 2 548.85、1 063.60 km<sup>2</sup>,在国家政策和地方政府的引导下各个乡镇领导及居民的积极配合为库车县生态文明建设提供了优化条件,在此基础上预测 2020 年的土地利用结构变化和土地生态敏感性,计算结果表明 2020 年库车县高敏感和低敏感区域面积减少到 2 458.92、1 055.71 km<sup>2</sup>,中敏感区域由 2009 年的 7 312.59 km<sup>2</sup> 减少到 2016 年的 7 286.87 km<sup>2</sup>,再减少到 2020 年的 6 534.97 km<sup>2</sup>,不敏感区域面积由 2009 年的 3 604.88 km<sup>2</sup> 增加到 2016 年的 3 626.83 km<sup>2</sup>,再

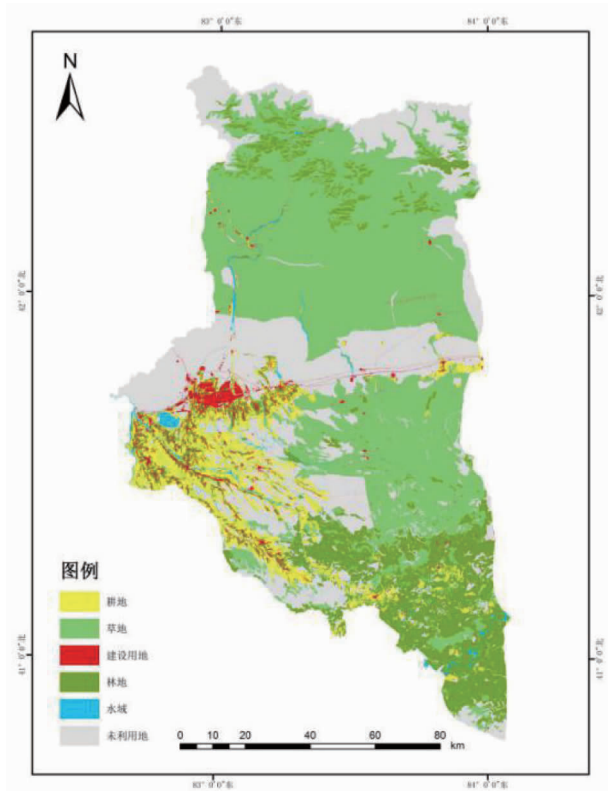


图5 2020年库车县土地利用现状

Fig.5 Current land use map of Kuche County in 2020

增加到 2020 年的 4 476.57 km<sup>2</sup>。

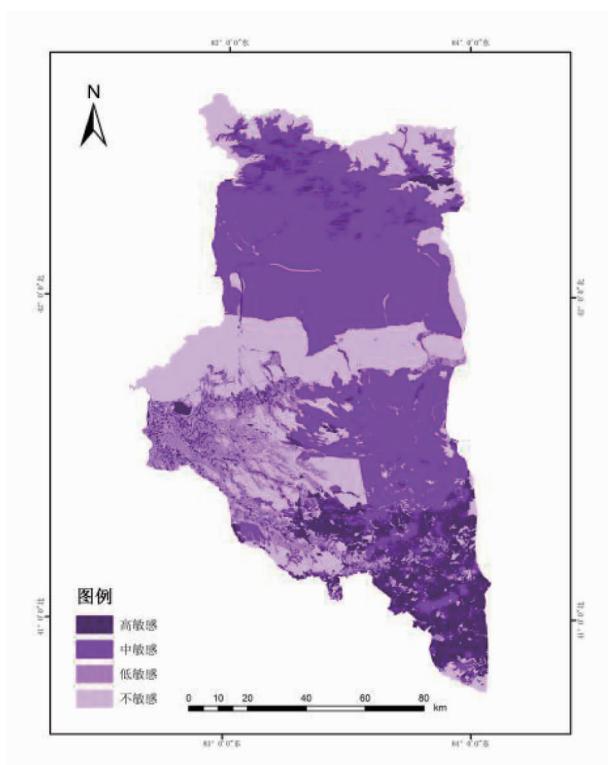


图 6 2020 年库车县土地利用生态敏感性预测分布

Fig.6 Distributions ecological sensitivity area of land use in Kuche County in 2020

人类活动与生态系统的敏感性变化是密切相关的,人类社会的不断发展,产业的日益多样化以及人民生活水平的逐步提升对生态环境造成了一定的压力,随着政府对环境保护和生态安全的重视,人们也有了保护环境意识,积极配合政府的宅居地集中连片建设等有利于土地集约节约、提高土地利用率的政策。在以后的发展过程中确保优化生态用地内部结构和空间布局,提升园地和林地的生态服务功能,构建国土生态屏障,促进社会、经济、生态的协调和可持续发展。

总之,库车县生态敏感性的优化需要加强区域植被的大规模建设,实施退耕还林和退耕还草政策,减轻人为造成的生态压力。

#### 参考文献

[1] RINDFUSS R R, WALSH S J, TURNER B L, et al. Developing a science of land change: Challenges and methodological issues [J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2004, 101(39): 13976-13981.

(上接第 34 页)

#### 参考文献

[1] 郭世荣. 无土栽培学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2014: 3.  
 [2] 赵根, 邱芬, 陈丽萍, 等. 草莓无土栽培模式与营养供给 [J]. 蔬菜, 2017(11): 69-73.  
 [3] 尹克林, 刘素君, 钱春, 等. 草莓新品种栽植密度与产量相关性分析 [J]. 西南农业大学学报(自然科学版), 2001, 23(3): 235-238.  
 [4] 杨莉, 李莉, 孙丽敏, 等. 草莓果实主要数量性状变异及相关性研究 [J]. 华北农学报, 2005, 20(3): 22-24.

[2] BIHAMTA N, SOFFIANIAN A, FAKHERAN S, et al. Using the SLEUTH urban growth model to simulate future urban expansion of the Isfahan metropolitan area, Iran [J]. J Indian Soc Remote Sens, 2015, 43(2): 407-414.  
 [3] KALNAY E, CAI M. Impact of urbanization and land-use change on climate [J]. Nature, 2003, 423: 528-531.  
 [4] RILEY W J, MATSON P A, NLOSS. A mechanistic model of denitrified N<sub>2</sub>O and N<sub>2</sub> evolution from soil [J]. J Soil Sci, 2000, 165(3): 237-249.  
 [5] YAO F M, HAO C, ZHANG J H. Simulating urban growth processes by integrating cellular automata model and artificial optimization in Binhai New Area of Tianjin, China [J]. Geocarto Int, 2016, 31(6): 612-627.  
 [6] 关中美, 王雨村, 牛海鹏. 基于 GIS 的焦作市生态敏感性分析 [J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2009, 28(1): 61-66.  
 [7] 庞莎, 刘康, 冀文慧. 土地利用变化对延安市生态服务价值的影响 [J]. 地下水, 2011, 33(1): 154-157.  
 [8] 欧阳志, 王效科, 苗鸿. 中国生态环境敏感性及其区域差异规律研究 [J]. 生态学报, 2000, 20(1): 9-12.  
 [9] ROSSI P, PECCI A, AMADIO V, et al. Coupling indicators of ecological value and ecological sensitivity with indicators of demographic pressure in the demarcation of new areas to be protected: The case of the Oltrepo Pavese and the Ligurian-Emilian Apennine area (Italy) [J]. Landscape and urban planning, 2008, 85(1): 12-26.  
 [10] 李东梅, 高正文, 付晓, 等. 云南省生态功能类型区的生态敏感性 [J]. 生态学报, 2010, 30(1): 138-145.  
 [11] LIU C M, ZHANG D. Temporal and spatial change analysis of the sensitivity of potential evapotranspiration to meteorological influencing factors in China [J]. Acta geographica sinica, 2011, 66(5): 579-588.  
 [12] 韩贵锋, 赵珂, 袁兴中, 等. 基于空间分析的山地生态敏感性评价: 以四川省万源市为例 [J]. 山地学报, 2008, 26(5): 531-537.  
 [13] 何丹, 刁承泰. 重庆江津市土地利用变化及社会驱动力分析 [J]. 水土保持研究, 2006, 13(2): 24-26.  
 [14] 彭保发, 陈端吕, 李文军, 等. 土地利用景观格局的稳定性研究: 以常德市为例 [J]. 地理科学, 2013, 33(12): 1484-1488.  
 [15] 国家环境保护总局. 生态功能区划暂行规程 [A]. 2002.  
 [16] 王佳丽, 黄贤金, 陆汝成, 等. 区域生态系统服务对土地利用变化的脆弱性评估: 以江苏省环太湖地区碳储量为例 [J]. 自然资源学报, 2010, 25(4): 556-563.  
 [17] 王大鹏, 王满堂, 陈伟. 台儿庄生态敏感性 GIS 评价 [J]. 测绘科学, 2012, 37(1): 64-66.  
 [18] 林涓涓, 潘文斌. 基于 GIS 的流域生态敏感性评价及其区划方法研究 [J]. 安全与环境工程, 2005, 12(2): 23-26, 34.  
 [19] 杨志峰, 徐俏, 何孟常, 等. 城市生态敏感性分析 [J]. 中国环境科学, 2002, 22(4): 360-364.  
 [20] 杨俊, 解鹏, 席建超, 等. 基于元胞自动机模型的土地利用变化模拟: 以大连经济技术开发区为例 [J]. 地理学报, 2015, 70(3): 461-475.  
 [21] FITZPATRICK M, SMITH K, BELOUSEK D W, et al. The quantum cellular automaton as a Markov process [J]. Chaos, solitons & fractals, 1999, 10(8): 1375-1386.  
 [22] 汪佳莉, 吴国平, 范庆亚, 等. 基于 CA-Markov 模型的山东省临沂市土地利用格局变化研究及预测 [J]. 水土保持研究, 2015, 22(1): 212-216.  
 [23] 王耕, 王嘉丽, 龚丽妍, 等. 基于 GIS-Markov 区域生态安全时空演变研究: 以大连市甘井子区为例 [J]. 地理科学, 2013, 33(8): 957-964.  
 [24] 王友生, 余新晓, 贺康宁, 等. 基于 CA-Markov 模型的藉河流域土地利用变化动态模拟 [J]. 农业工程学报, 2011, 27(12): 330-336.  
 [25] 胡雪丽, 徐凌, 张树深. 基于 CA-Markov 模型和多目标优化的大连市土地利用格局 [J]. 应用生态学报, 2013, 24(6): 1652-1660.

[5] 程耀民, 李辰, 卫刚果, 等. 草莓生长习性及其几种常见病虫害 [J]. 现代农业研究, 2018(2): 98-99.  
 [6] 杨帆. 冬季大棚草莓管理要点 [J]. 植物医生, 2018(1): 26.  
 [7] 郑茂启, 杨玉民, 罗凤玲, 等. 日光温室草莓蜜蜂授粉配套技术的研究与推广 [J]. 山东农业科学, 2004(3): 48-49.  
 [8] 李星月, 许前贵, 朱从桦, 等. 四川温室草莓生产现状及病虫害绿色防控技术 [J]. 四川农业科技, 2018(3): 27-28.  
 [9] 胡佳羽, 罗友进, 王武, 等. 重庆城郊草莓生产现状调查分析 [J]. 安徽农业科学, 2015, 43(4): 319-321.  
 [10] 李兵. 草莓引种水培对比试验 [D]. 重庆: 西南大学, 2015.