

约束性条件下的喀什市土地利用空间格局分析

吕金霄^{1,2}, 张永福^{1,2}

(1. 新疆大学 资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046; 2. 新疆大学 绿洲生态重点实验室, 乌鲁木齐 830046)

摘要: 基于高分辨率遥感影像解译得到新疆喀什市 2002 年与 2013 年两期土地利用历史数据, 通过对两期影像进行处理、分类、精度验证以及对 CLUE-S 模型和 Markov 模型进行精度验证, 利用 CLUE-S 模型和 Markov 模型相结合的方法对研究区喀什市未来土地利用变化进行两种不同情景的模拟预测, 系统分析了两种不同情景下土地利用变化的时空特征。结果表明: CLUE-S 模型和 Markov 模型的相互结合使用成功克服了单一模型的不足, 能够对喀什市未来土地利用情况进行良好的模拟。因此, 在设计两种情景模拟预案下, 喀什市未来的建设用地均将持续增加, 并以消耗大量的耕地资源为代价, 并且约束情景模型 II 城镇规划节约集约用地和基本农田保护预案是喀什市未来土地利用变化的推荐预案。

关键词: 土地利用; 约束性条件; 情景模拟; 喀什市

中图分类号: F301.24

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)03-0325-06

Analysis on Land Use Spatial Pattern of Kashi City Under the Constraint Condition

LYU Jinxiao^{1,2}, ZHANG Yongfu^{1,2}

(1. College of Resources and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

2. Key Lab of Oasis Ecology, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

Abstract: Based on high-resolution satellite image interpretation obtained in Kashi Prefecture of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Kashi City, in 2002 and 2013. The CLUE-S model and Markov model were used to predict city under the condition of the binding decades of land use change in the future. Two phases of images were processed and classified, accuracy was verified. The accuracy of CLUE-S model and Markov model was verified. Two different scenarios were predicted, and two different system changes in spatial characteristics in land use scenarios were analyzed. The results showed that combinin CLUE-S model and the Markov model could successfully overcome the lack of mutual use of a single model, it is possible for the future land use of the city of Kashi to be well simulated in two design plans, Kashi City, the future of construction land will continue to increase, and to consume a lot of resources at the expense of arable land, comprehensive comparison of results show that the constraint scenario model II town planning conservation and intensive land and basic farmland protection plan is the future land use change in Kashi City recommended plan.

Keywords: land use; binding conditions; scenarios simulation; Kashi City

土地利用/覆被变化(LUCC)作为全球环境变化与可持续发展的研究内容, 已取得了许多研究成果^[1-3], 但目前的 LUCC 模拟预测研究主要集中在发达区域^[4-5]与城市尺度^[6-8], 随着研究的不断深入, LUCC 研究需要针对更加多样化的研究区域, 尤其要加强不发达地区土地利用的研究。土地利用受自然、人文和社会经济等众多因素在不同时间和空间尺度

上的综合影响, 是一个极其复杂的演变过程^[9-10]。模型模拟是预测未来土地利用变化的重要方法, 土地利用变化模型的应用是深入了解土地利用变化过程、驱动因素、动态规律^[11]、生态效应和环境影响评价的重要技术手段^[12-13]。应用模型对不同空间约束条件下的土地利用变化和生态后果进行模拟情景剖析对于科学决策具有重要的意义^[14]。模型的建立有助于全

面地分析土地利用变化和驱动机制的定量关系,对于理解和预测土地利用变化格局和过程,也具有不可替代的作用。

土地利用模拟模型的方法有很多,但是单一的模型都存在不足,因此有必要建立一种模型能尽可能地反映土地利用变化的整个动态过程。目前,用到的模型主要有元胞自动机(Cellular Automata, CA)模型^[15]、系统动力学(System Dynamics)模型^[16]、CLUE-S(the Conversion of Land Uses and its Effect at Small Regional Extent)模型^[17]、马尔可夫(Markov)模型等^[18-19]。以往大多数研究都是利用单一模型对某一区域的土地利用/覆盖格局进行模拟预测,模拟尺度也只是时间或者空间中一个方面,不能揭示时空尺度LUCC的过程。为了弥补单一模型模拟土地利用/覆盖格局方面的缺陷,耦合和集成现有的土地利用预测模型已成为土地利用/覆盖格局模拟的一个可行和有效的方法,已有学者做了这方面的工作,并且取得了较好的效果。CLUE-S(Conversion of Land Use and its Effects at Small Regional Extent)模型作为经验统计模型的典型^[20],在模拟土地利用时空动态方面具有较高的模拟效果和重要的应用价值^[21],可综合模拟多种土地利用类型的时空变化,且具有统计模型共有的简化问题和易应用的优点。然而这种模型的土地利用变化数量需求预测必须事先运用其他模型或方法进行计算,因此在应用中存在一定的不足。Markov模型作为预测土地利用变化的较好的方法,近年来在土地利用变化模拟中得到较多运用。然而该模型由于没有空间模块,因此无法对预测的各地类数量变化信息实现空间可视化,所以在应用中还存在一定的弊端。将CLUE-S模型和Markov模型的结合使用^[22],可弥补各自在数量预测和空间分配上分别存在的缺陷,实现模型模拟应用方法的互补,进而综合协调不同地类之间的竞争和相互转化关系,既能提高各地类转化的数量精度,又可以有效模拟土地利用的空间变化,实现土地利用变化的空间模拟,因此具有重要的科学意义和实践意义。

鉴于此,本文在综合考虑研究区资料的可获得性、驱动因素的选取以及模型是否适用等方面,尝试建立Markov数量模型和CLUE-S空间分配模型的集成模型,用以处理不同土地利用类型之间的竞争和相互转移关系,实现土地利用格局演变的时空模拟,最后以喀什市为例,在约束性条件下对集成的Markov过程模型和CLUE-S模型进行验证和情景模拟,以期能够为该区域的土地利用管理和规划以及生态的空间格局优化等提供科学依据。

1 试验材料与方法

1.1 研究区概况

喀什地区位于中国新疆维吾尔自治区境内,喀什市是喀什地区的社会、政治、经济、文化中心,位于喀什地区的西北部。市境东西部均与疏附县接壤,北倚古玛塔格山与克孜勒苏柯尔克孜自治州首府阿图什市毗邻,南隔克孜勒河与疏勒相望。喀什市东西宽45 km,南北长25 km,全市土地总面积55 010.90 hm²。地理位置为东经75°48′50″—76°18′30″,北纬39°23′50″—39°37′30″。现辖6乡、2镇、4个街道办事处和市直辖(市属国有土地),总人口45.89万人,其中城市人口27.04万人,农村人口18.85万人。喀什市属典型的暖温带大陆性干旱气候,一年四季分明,干燥少雨,日照充沛,热量丰富,且无霜期长。喀什市地貌类型,在大区属西昆仑山麓叶尔羌—英吉沙中积洪积的复合三角洲平原的范围,在中区属喀什噶尔水系形成的冲积平原。喀什市地下水资源丰富,主要补给来源,一是地表河流,二是灌溉用水。喀什市的地质地貌条件决定地下水的埋深由北向南逐渐变浅,流向由西北至东南。

1.2 数据来源

本研究所使用的数据包括:喀什市2002年Landsat-5,2013年Landsat-8均来源于中国科学院计算机网络信息中心网站(<http://www.gscloud.cn/>),喀什市30 m分辨率的DEM坡度及坡向数据也来源于中国科学院计算机网络信息中心(<http://www.gscloud.cn/>),2013年的行政区划图、2013年土地利用现状图来源于喀什市国土资源局,包括道路、河流、城镇及农村居民点、城市等要素数据;社会经济数据:包括喀什市2013年人口、社会经济等统计数据,来源于喀什市2013年统计年鉴。

1.3 数据处理

1.3.1 遥感图像处理 2期遥感数据质量较好,均经过系统几何畸变和辐射畸变纠正,因此,只需要对图像分别进行几何精校正即可,就可实现原始图像与标准图像的空间配准,以地形图作为主控数据源,将2002年Landsat-5,2013年Landsat-8数据与地形图进行配准,然后采用二次多项式模型和最近邻重采样方法对所有影像数据进行图像配准,精度需要控制在一个像元以内。数据处理主要软件有ArcGIS 10.0和ENVI 5.0和Erdas 9.1。

1.3.2 各时期遥感图像分类 土地利用分类参照全国《土地利用现状调查技术规程》,采用人机交互目视解译法提取所需专题信息,并在野外调查的基础上,对

分类结果进行验证和修改,以保证解译结果的精度。依据喀什市的植被和土地利用特点,结合当地的实际情况,将研究区域的土地利用类型划分为 7 大类:水田、水浇地、建设用地、林地、草地、水面、未利用地。

1.3.3 遥感图像分类精度验证 参考同期的地面资料及 2 次野外调查时用 GPS 所定的点,对上述 2 期遥感分类结果进行精度检验。将实地调查的植被类型与解译判读的植被类型进行匹配度验证,3 种结果相同的点占总数的百分比作为精度值。结果表明:2002 年、2013 年总体分类精度分别为 94.49% 和 93.76%,分类结果精度较高,达到最低允许判别精度 70% 的要求^[23]。由此认为,上述遥感分类结果可以进行土地利用/覆盖时空格局的情景模拟。

1.4 研究方法

1.4.1 基于 Markov 过程的土地利用时间变化模拟

Markov 预测法是作为一种特殊的随机运动过程且基于 Markov 链,根据事件的目前状况预测其将来各个时刻(或时期)变动状况的一种预测方法。该模型是景观生态学家用来模拟土地利用/覆被格局变化最普遍的模型,其特点是没有后效性。它假设一个动态系统在 $T+1$ 时刻的状态和 T 时刻的状态有关,而和 T 时刻以前的状态无关。计算公式如下:

$$X(n) = X(n-1)P_{ij} \quad (1)$$

式中: $X(n)$, $X(n-1)$ 分别为 n 和 $n-1$ 时刻的系统状态; P_{ij} 为转移矩阵概率,该矩阵满足以下两个条件: $\sum_{j=1}^n P_{ij} = 1$, $(i, j = 0, 1, 2, \dots, n)$ 矩阵每行元素之和等于 1; $0 \leq P_{ij} \leq 1$, $(i, j = 0, 1, 2, \dots, n)$, 矩阵每个元素都非负。

由于一定时期内不同土地利用类型之间存在相互转化,而且它们之间的转化过程包含着许多难以用函数来准确表达的事件,所以此模型较适宜用于对土地利用动态变化的研究。应用 Markov 模型的关键是确定被预测对象所经历的各个过程中不同阶段不同状态之间的转移概率矩阵。

1.4.2 基于 CLUE-S 的土地利用空间变化模拟模型

土地利用变化的空间模型(CLUE-S)是荷兰瓦赫宁根大学 Verburg 等在 CLUE 模型基础上开发的高分辨率 LUCC 模型。土地利用变化空间(CLUE-S)模型的假设条件是:一个地区的土地利用变化是受该地区的土地利用需求驱动的,并且某一个地区的土地利用分布的格局总是和这个地区土地的需求量以及该地区的自然环境和社会经济状况处在动态的平衡之中。所以在此假设的基础上,CLUE-S 即土地利用变化的空间模型运用系统论的处理方法不同于土地

利用类型之间的相互竞争关系,实现对不同土地利用类型变化的同步模拟。其主要的理论基础包括土地利用变化的关联性、等级特征、竞争性和土地利用的相对稳定性等。CLUE-S 模型已得到较广泛的应用。

(1) CLUE-S 模型的框架。CLUE-S 模型包括两个模块:空间模块和非空间模块,非空间模块以人口、社会经济以及政策法规等土地利用变化驱动因素的分析为基础,计算出一定时间内研究区域各年度土地利用类型的面积变化(土地利用需求);然后在空间模块中,将逐年的土地需求变化作为输入,依据土地利用格局影响因素的空间分布特征,在基于栅格系统的空间分析模块各候选区进行配置,实现对各年土地利用格局时空动态变化的模拟。非空间模块中的土地利用类型需求变化不能由 CLUE-S 型预测,需要其他方法进行估算,本研究中采用 Markov 模型进行预测。

(2) CLUE-S 模型的空间分析。在土地利用类型的空间分布适宜性分析中,必须核算出每一种土地类在区域内每一个栅格上出现的几率大小,然后对同样的栅格空间上每种土地类的出现几率进行分析比较,以确定哪种土地地类出现概率较高。Logistic 回归分析作为土地利用变化研究中一种常用的方法,在 CLUE-S 模型中也用来计算某一种土地利用类型出现的概率,公式如下:

$$\ln \left\{ \frac{p_i}{1-p_i} = \beta_0 + \beta_1 X_{1,i} + \beta_2 X_{2,i} + \dots + \beta_n X_{n,i} \right\} \quad (2)$$

式中: P_i 为每一个栅格可能将会出现某一土地利用类型 i 的概率; X_n 为 i 栅格处第 n 个驱动因素; β_n 为第 n 个驱动因素的回归系数。通过 Logistic 逐步回归分析可以筛选出对土地利用格局影响较为显著的因素,同时剔除不显著的因素。

(3) CLUE-S 模型和 Markov 模型的合成应用喀什市土地利用/覆盖格局情景模拟分为两步:(1) 以 2002 年为初始年份,模拟 2013 年的土地利用/覆盖时空格局,对 Markov 过程模型和 CLUE-S 模型进行调试和精度验证;(2) 设定不同的模拟情景,以 2013 年为初始年份,利用 Markov 过程模型模拟不同情景状态下 2025 年的土地需求数量,并作为 CLUE-S 模型的需求输入,对 2025 年的土地利用/覆盖空间格局进行情景预测。

2 结果与分析

2.1 区域土地利用变化分析

通过对研究区 2002 年、2013 年 Landsat 影像解译得到图 1。通过分类,喀什市共分为水田、旱地、林地、草地、建设用地、水域、未利用地 7 类用地。经过遥感影像

解译得表 1,2002—2013 年喀什市的建设用地提升较快,从 2002 年的 8 423.34 hm² 增加为 16 100.20 hm²,增幅为 13.96%,水田与水浇地面积均有减少,其中水田从 2002 年的 2 038.28 hm² 减少为 943.04 hm²,水浇地

从 20 815.21 hm² 减少为 13 896.48 hm²。林地有所增加,增加面积为 1 371.58,增幅为 2.5%,水面面积有所减少,但变化面积不大。总体表现为建设用地面积增加,耕地面积减少。

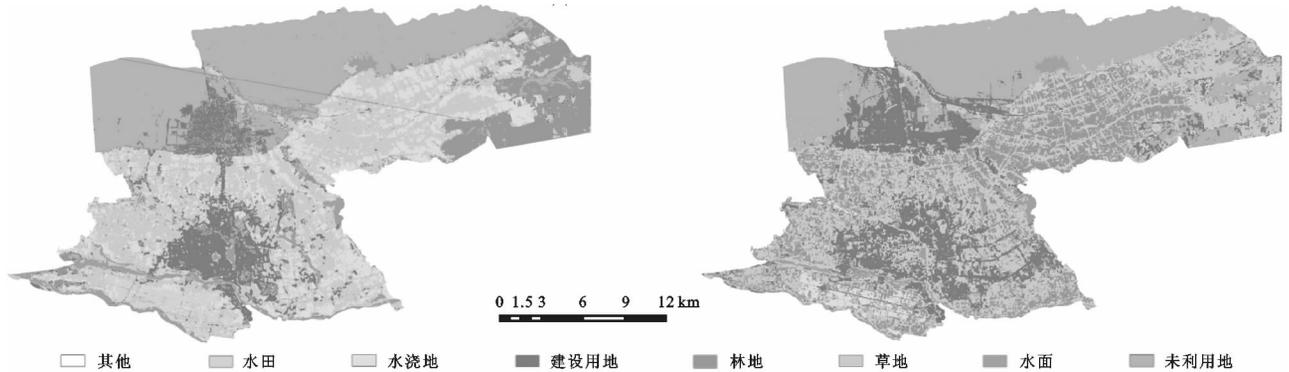


图 1 喀什市 2002 年和 2013 年土地利用类型

表 1 2 个时期研究区域土地利用类型面积和比例

土地利用类型	2002 年		2013 年	
	面积/hm ²	比例/%	面积/hm ²	比例/%
水田	2038.28	3.71	943.04	1.71
水浇地	20815.21	37.84	13896.48	25.26
建设用地	8423.34	15.31	16100.2	29.27
林地	716.82	1.30	2088.4	3.80
草地	5514.01	10.02	5104.37	9.28
水面	2358.91	4.29	1948.67	3.54
未利用地	15144.33	27.53	14929.74	27.14

2.2 土地利用模拟结果与分析

(1) 土地利用变化的空间模拟结果及校验。将 2002 年和 2013 年的 2 期图像进行空间叠加,得出 2002 年土地利用覆盖类型 *i* 转变为 2013 年土地利用覆盖类型 *j* 的转移概率矩阵(表 2)。从表 2 可以看出,喀什市的土地利用结构发生了明显变化,各土地

利用类型之间的相互转变频繁:(1) 水田区转出概率较大的类型为建设用地;(2) 水浇地和建设用地、草地之间的相互转变较为密切,从转移概率来看,草地转变为建设用地的概率较大;(3) 林草地之间相互转变频繁;(4) 未利用地转为建设用地的较多,转出概率大于转入概率;(5) 林地和未利用地面积变化量最大,林地转入和转出类型分别主要是草地和建设用地,未利用地转出概率大于转入概率。

先以 2002 年土地利用空间数据为基础,输入并调整模型运行所需的主参数、Logistic 逐步回归分析结果、土地利用转换规则、区域限制、概率转移等参数,应用 CLUE-S 和 Markov 复合模型进行模拟比较,得到 2005 年土地利用模拟图。以 2005 年实际土地利用图为参照,运用 Erdas 软件下精度评估模块进行验证,得到 Kappa 指数为 0.78,反映模拟精度较好。

表 2 2002—2013 年土地利用/覆盖类型转移概率矩阵

时间	土地利用/覆盖类型	2013 年						
		水田	水浇地	建设用地	林地	草地	未利用地	水面
2002 年	水田	95.90	1.06	2.36	0.81	0.43	0.02	0.03
	水浇地	0.93	58.61	29.22	0.74	8.44	1.81	0.26
	建设用地	0.67	0.29	42.99	3.93	42.65	7.23	2.24
	林地	7.50	1.58	9.19	26.75	43.11	2.24	2.63
	草地	1.00	0.37	24.51	13.06	56.37	1.59	3.03
	未利用地	0.63	0.03	23.50	0.67	11.97	62.04	1.16
	水面	0.00	0.76	2.70	1.65	6.36	0.27	88.26

(2) 未来土地利用变化情景模拟。本文猜想出两种情景,对喀什市 2025 年土地利用时空变化进行模拟。情景 I:按照现有土地转移速率发展的土地使用变化情景。按照 2002—2013 年的土地利用转移速率发展,应用复合模型中的 Markov 模块预测,获得 2025 年按现有土地转移速率发展模式下的土地利用数据,该数据使用为 Demand 文件与其他文件共同在 CLUE-S 和 Markov 复合模型中运行,然后再导入

ArcGIS 中转换得到 2025 年的土地利用模拟图。

情景 II:大力保护耕地的土地利用变化情景。《全国土地利用总体规划纲要 2006—2020 年》提出,喀什市在规划期内要控制建设用地总量,提高集约用地水平,严格管控基本农田等质量高耕地。因此,参考了有关修改 Markov 转移概率矩阵的相关研究成果^[18-19],提出进一步强化耕地保护力度,严格控制建设占用耕地,将水浇地转化为建设用地的速率减缓

50%,转移速率由原来的 29.22%调整为 14.61%。应用 CLUE-S 和 Markov 复合模型进行模拟,得到

2025 年严格保护耕地的土地利用变化情景下的土地利用模拟图(图 2)。

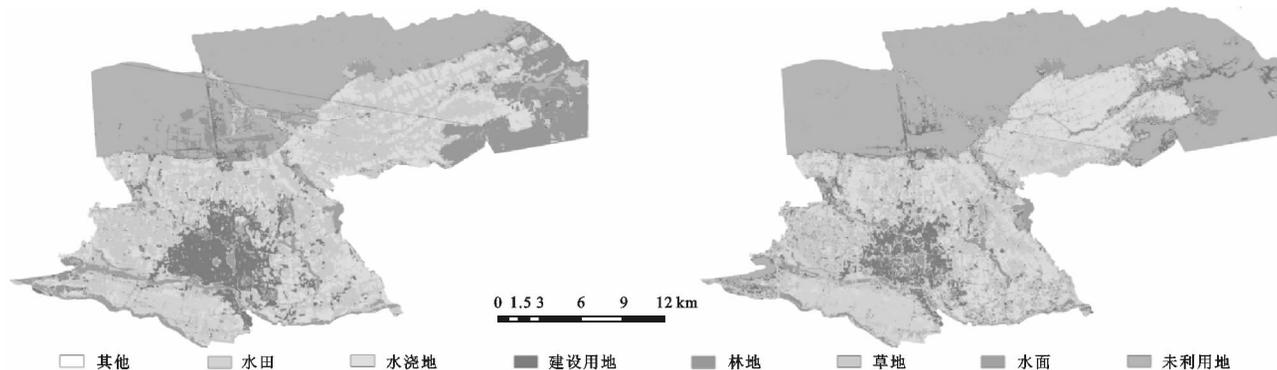


图 2 2025 年喀什市土地利用情景模拟

(3) 土地利用格局变化。当前,土地利用格局变化的研究方法较多,有多智能体与元胞自动机结合、多目标决策和 CA 模型结合、CA-Markov 模型、CLUE-S 模型等,主要趋向于将多种模型的优点结合起来复合应用于土地整体结构布局变化研究。因此结合应用 CLUE-S 和 Markov 复合模型对喀什市土地利用格局变化进行模拟得知,两种情景模拟下建设用地和水浇地格局变化最大的区域均是中心城区以及北部的工业园区,情景 I 的土地利用变化强度比情景 II 大。为打造西部经济开发区,喀什市作为喀什地区的首选,经济发展较快,城镇化率较高,固定资产投资

较大,其建设用地扩展增大的同时伴随着占用水田、水浇地较多;在启动喀什市新城区和喀什经济开发区建设、完善基础设施的基础上,稳定推进老城区改造,促进盘活挖潜工作。未来土地利用格局仍是以水浇地、林地、草地等农用地为主,但建设用地也呈现较大的扩展趋势,尤其在喀什市东部的伯什克然木乡建设用地增加明显。水域的空间格局变化不太明显。

(4) 情景对比剖析。将研究地区 2025 年两种土地利用变化情景分别与 2013 年遥感影像解译各类土地利用面积进行对比,列出两种情景模拟下土地利用面积和变化率(表 3)。

表 3 两种情景模拟下的土地利用类型面积和变化率

项目	水田	水浇地	建设用地	林地	草地	未利用地	水面	
2013 年遥感影像解译的各类土地面积/hm ²	943.04	13896.48	16100.2	2088.4	5104.37	1948.67	14929.74	
2025 年预测的土地面积/hm ²	情景 I	931.58	14412.58	21322.91	2423.56	3243.24	1430.95	11246.08
	情景 II	945.76	15165.34	20564.56	2236.48	3222.03	1427.51	11449.22
2025 年土地利用变化率/%	情景 I	-1.22	3.71	32.44	16.05	-36.46	-26.57	-24.67
	情景 II	0.29	9.13	27.73	7.09	-36.88	-26.74	-23.31

在国家现有土地转移速率发展的土地利用变化模拟情景下,至 2025 年水田比 2013 年减少了 1.22%,建设用地增加了 32.44%,草地的减少率和建设用地的增加率非常大。在大力保护耕地的土地利用变化情景下,至 2025 年水浇地比 2013 年增加了 9.13%,比按现有土地转移速率发展的土地利用变化情景下的水浇地增加率 3.71%多增加了 5.42%;建设用地比 2013 年增加了 27.73%,比按照现有土地转移速率发展的土地利用变化情景下的建设用地增加率 2.44%少增加 4.71%,调控效果显著,其在一定程度上限制了建设用地的扩展,保护了水田、水浇地、林地。

3 结论

(1) 在保障基本农田红线不动摇和建设用地约束性的指标下,应用 CLUE-S 和 Markov 复合模型对

喀什市土地利用进行情景模拟,从而改进了单一模型方法应用的不足,并增加了保护耕地和优质基本农田的规划约束情景,更加准确地预测研究区域的土地利用时空变化。

(2) 以 2002 年的实际土地利用数据为基础,根据当前发展需要,进行了两种土地利用变化情景模拟。通过模拟得知,喀什市建设用地和未利用地格局变化最大,现有土地转移速率情景 I 的土地利用变化强度比严格保护耕地情景 II 大。

(3) 情景 I 中建设用地的增加率和草地的减少率非常大;情景 II 中,至 2025 年草地的面积减少率有所增大,建设用地比在情景 I 下的增加率 32.44%少增加 4.71%。因此,喀什市今后确需控制建设用地总量,提高节约集约用地水平,最严格地保护水田和基本农田等优质耕地。严格保护耕地的情景 II 是一

种比较理想的发展模式,对研究区未来的土地利用管理和宏观调控具有一定的借鉴意义,但情景预测结果带有一定的人为主观性,反映某一特定条件下的可能情况带有不确定性。

CLUE-S 模型和 Markov 模型的相互结合使用成功克服了单一模型的不足,所以只要处理好参数的问题,便可以充分发挥 CLUE-S 模型和 Markov 模型在空间分配和数量预测方面的优点,实现土地利用变化在数量与空间上的双重优化,以提高未来土地利用变化的预测精度。本研究中情景设定主要侧重于数量约束,但不可忽视的是地方政府的干预作用,Markov 模型的预测主要依据土地利用的历史变化趋势,但未来的土地利用变化受地方政策的干扰仍将较大,因此如何结合某一地区的发展政策,制定合理的空间约束情景,以更适用类似开发区和工业园区等“蛙跳式”政策导向下的土地利用的调整和发展,将是我们今后研究的重点。

参考文献:

- [1] Lambin E F. Modeling and monitoring land-cover change processes in tropical regions[J]. *Progress in Physical Geography*, 1997,21(5):375-393.
- [2] Veldkamp A, Lambin E F. Predicting land-use change [J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2001, 85(1/3):1-6.
- [3] Foley J A, Defries R, Asner G P, et al. Global consequences of land use[J]. *Science*, 2005,309(5734):570-574.
- [4] 肖捷颖,葛京凤,沈彦俊,等.基于 TM 和 ETM+ 遥感分析的石家庄市土地利用/覆被变化研究[J]. *地理科学*, 2005,25(4):495-500.
- [5] 李月臣,刘春霞.北方 13 省土地利用/覆盖动态变化分析[J]. *地理科学*,2007,27(1):45-52.
- [6] 周锐,苏海龙,王新军,等.基于 CLUE-S 和 Markov 模型的城镇土地利用变化模拟预测:以江苏省常熟市辛庄镇为例[J]. *资源科学*,2011,33(12):2262-2260.
- [7] 刘殿伟,宋开山,王丹丹,等.50 年来松嫩平原西部土地利用变化及驱动力分析[J]. *地理科学*,2006,26(3):277-283.
- [8] 姚士谋,陈爽,吴建楠,等.中国大城市用地空间扩展若干规律的探索:以苏州市为例[J]. *地理科学*,2009,2(1):15-21.
- [9] 李月臣,刘春霞.北方 13 省土地利用/覆盖动态变化分析[J]. *地理科学*,2007,27(1):45-52.
- [10] 黄贤金,于术桐,马其芳,等.区域土地利用变化的物质代谢响应初步研究[J]. *自然资源学报*,2006,21(1):1-8.
- [11] 杨青生,黎夏.多智能体与元胞自动机结合及城市用地扩张模拟[J]. *地理科学*,2007,27(4):542-548.
- [12] 刘妙龙,陈鹏.基于细胞自动机与多主体系统理论的城市模拟原型模型[J]. *地理科学*,2006,26(3):292-298.
- [13] 邱炳文,陈崇成.基于多目标决策和 CA 模型的土地利用变化预测模型及其应用[J]. *地理学报*,2008,63(2):165-174.
- [14] 刘晓辉,吕宪国,董贵华.分维模型在土地利用研究中的应用[J]. *地理科学*,2008,28(6):765-769.
- [15] Verburg P H, Soepboer W, Veldkamp A, et al. Modeling the spatial dynamics of regional land use: The CLUE-S Model [J]. *Environmental Management*, 2002, 30(3):391-405.
- [16] 曹银贵,王静,陶嘉,等.基于 CA 与 AO 的区域土地利用变化模拟研究:以三峡库区为例[J]. *地理科学进*, 2007,26(3):88-95.
- [17] 何春阳,史培军,陈晋,等.基于系统动力学模型和元胞自动机模型的土地利用情景模型研究[J]. *中国科学 D 辑:地球科学*,2005,35(5):464-473.
- [18] 王健,田光进,全泉,等.基于 CLUE-S 模型的广州市土地利用格局动态模拟[J]. *生态学杂志*,2010,29(6):257-1262.
- [19] 李黔湘,王华斌.基于马尔柯夫模型的涨渡湖流域土地利用变化预测[J]. *资源科学*,2008,30(10):1541-546.
- [20] 张春华,王宗明,宋开山,等.基于马尔可夫过程的三江平原土地利用动态变化预测. *遥感技术与应用*,2009,24(2):210-216.
- [21] Lin Y P, Hong N M, Wu P J, et al. Modeling and assessing land-use and hydrological processes to future land-use and climate change scenarios in watershed land-use planning[J]. *Environmental Geology*, 2007, 53(3):623-634.
- [22] 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.
- [23] 曾辉,高凌云,夏洁.基于修正的转移概率方法进行城市景观动态研究:以南昌市区为例[J]. *生态学报*, 2003,23(1):2201-2209.
- [24] Lucas I F J, Frans J M, Wel V D. Accuracy assessment of satellite derived land-cover data: A review. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1994,60:410-432.
- [25] 赵琳琳,夏乐天.灰色马尔可夫链模型的改进及其应用[J]. *河海大学学报:自然科学版*,2007,35(4):487-490.
- [26] 莫宏伟,任志远,王秋贤.风沙过渡区土地利用变化及生态效应图谱:以陕北榆阳区为例[J]. *地理科学*, 2008,28(6):770-775.