

# 北京市土地利用空间格局演化模拟及预测

韩会然, 杨成凤, 宋金平\*

(北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875)

**摘要:**土地利用空间格局的演化模拟可定量地从空间尺度揭示区域土地利用变化的驱动因素,是厘清未来时期内土地变化的重要途径。基于CLUE-S模型,以北京市为研究案例,结合1985、2000和2010年三期土地利用数据,运用Logistic逐步回归方法识别了北京市各种土地利用类型演化的驱动因素,对北京市土地利用空间格局进行模拟。在此基础上,基于北京市社会经济发展、土地利用规划、资源禀赋及生态保护等不同情景,对北京市2020年土地利用空间分布格局进行模拟及预测。结果表明:①不同的时期内,驱动因子对不同土地利用类型的影响呈现差异性,其中交通因素及社会经济因素对土地利用类型的转化率影响较显著,坡度对各个土地利用类型的影响较大。②通过对2010年北京市土地利用变化的模拟结果来看,Kappa指数为87.03%,说明预测结果与实际土地利用情况有较好的一致性。③预测结果显示,北京市的城市发展均表现为继续向外扩展,且以东南、东北为主要扩展方向,但扩张的程度存在差异。

**关键词:**土地利用变化;空间格局;情景模拟;CLUE-S模型;北京市

## 1 引言

土地利用是人类活动作用于自然环境的重要方式和响应(Lambin et al, 1999; 唐华俊等, 2009; 刘纪远等, 2014; 吴琳娜等, 2014),是社会经济活动与自然生态过程相互影响的纽带(刘纪远等, 2014),对处理和理解人类—环境的复杂关系具有重要作用(吴琳娜等, 2014)。研究区域系统内的土地利用变化过程、格局及驱动因素,对土地利用管理、社会经济发展调控具有重要意义,尤其是对处于快速城市化阶段的中国城市来说,人类活动对土地利用格局的影响最为明显,因此具有显著的研究价值。

土地利用格局的形成与演化易受不同时空尺度上的自然、社会、经济等多种因素影响,故深入了解土地利用格局与各种因素之间的相互作用成为当前的研究重点。如Meyfroidt等(2013)发现,土地利用变化受全球化商品流、信息流、资金流和人流的强烈影响,并逐渐受市场因素的驱动,往往与不断增长的城市消费新兴市场相关联;Lambin等

(2003)认为,土地利用变化是由资源稀缺导致的产量增加的压力,市场多变的机会,外来政策的干预,适应能力的丧失以及社会组织、属性变化的改变等多种协同因素共同驱动的结果。城镇化的快速发展改变了土地的相关属性特征,有学者认为快速的城镇化进程增加了土地的破碎性与复杂性,一定程度上改变了土地景观格局(Jenerette et al, 2001);Wu等(2011)通过规划、市场的均衡与非均衡等四种不同的政策情景探讨了发展中国家的城镇化政策对土地空间格局的影响,发现城镇化水平是土地利用变化的主要影响因子,城市建设用地会随着人口的增加而不断扩张。随着研究内容的不断拓展,还有学者尝试将土地利用政策与城镇化的发展进程相结合,探讨了公共政策如何影响土地利用变化,从而评价当前土地利用政策的有效性,发现基础设施,如学校、路网的增加对土地利用的影响更大,土地利用政策在城市扩张中并没有完全发挥效用(Lee, 1979)。

为了更好地识别不同要素对土地利用格局的

收稿日期:2015-01;修订日期:2015-03。

基金项目:国家自然科学基金项目(41271132);国土资源部公益性行业科研专项经费项目(201211001)。

作者简介:韩会然(1987-),男,山东聊城人,博士研究生,研究方向为城市地理与区域发展研究,E-mail: hanhui@163.com。

通讯作者:宋金平(1968-),男,山东平邑人,教授,博士生导师,主要研究方向为经济地理,E-mail: jinpingsong@163.com。

引用格式:韩会然,杨成凤,宋金平. 2015. 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, 34(8): 976-986. [Han H R, Yang C F, Song J P. 2015. Simulation and projection of land-use change in Beijing under different scenarios[J]. Progress in Geography, 34(8): 976-986.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2015.08.005

影响,学者们非常关注通过构建相关模型来分析预测土地利用演化(裴彬等,2010)。对土地空间格局过程的分析可以定量地从空间尺度探讨土地空间格局变化的驱动因素(李月臣等,2008;任志远等,2011),为政府决策者制定土地利用政策提供依据。从已有研究来看,国内外土地利用变化研究主要集中在土地利用时空过程探测(范泽孟等,2005)、驱动机理分析(Lambin et al, 2003;刘纪远,张增祥等,2009)、宏观生态效应评价(于兴修等,2004)等方面,其中土地利用演化过程的刻画与模拟成为当前研究的重要对象之一。目前,国内外学者开展了一系列不同尺度的土地利用变化模拟模型的实证与检验,既有全球宏观尺度的地表覆盖研究,如Schal-dach等(2011)基于土地利用系统方法,首次将多标准分析与多目标土地配置技术应用到大尺度的土地利用模型,在大陆和全球尺度上提出了模拟土地利用变化的LandSHIFT模型,结合系统动力学仿真来模拟土地利用变化特征;又有中观尺度的国家或区域性研究,如对生态脆弱热点区域—密西西比河流域(Yi et al, 2015)、洱海流域(Xu et al, 2015)、漓江流域(王祺等,2014)等地区的土地空间格局研究;也有小尺度的城市、乡镇土地空间格局预测等,通过采用不同的土地模型对其变化格局进行模拟预测,从而获得科学的土地利用方案,如Dewan等(2012)利用元胞自动机模型模拟了孟加拉国首都达卡土地利用空间格局演化过程,发现经济发展与人口增长不断驱动着城市土地扩张,带来了环境恶化与土地碎片化等相关问题。杨俊等(2015)从土地利用类型变化及相互作用的角度实现了局部土地利用竞争的元胞自动机模型原型开发,并以大连市经济技术开发区进行了模拟验证;戴尔阜等(2015)以西藏乃东县为研究区,采用线性光谱分离技术,监测了研究区内的土地覆被变化,发现线性光谱分离技术对青藏高原土地覆被识别具有较好的适用性。

根据不同的研究目的,可以将相关土地模型分为三类:①基于数理统计的社会经济过程模型,主要是通过构建数学方程来对区域土地利用变化格局的影响因子进行统计分析,能够实现相关因素的定量表达,但这类模型对社会性因素(如制度影响等)考虑不足(裴彬等,2010);②基于复杂性理论的系统模型,如元胞自动机模型等(裴彬等,2010;杨俊等,2015),这类模型的特点是时间和空间都离散,将土地格局划分为不同的网格单元,依据一致的转化规则来对土地利用变化过程进行模拟,然而

这类模型不能处理人的行为和决策过程对土地利用变化的动态影响(田光进等,2008);③基于智能体模型的土地利用主体模型,优点是考虑了不同的土地利用主体的行为决策及其时空作用,从而弥补了系统模型的缺陷,但应用过程中社会经济及主体决策本身的复杂性,增加了模型的不确定性,难以形成统一的模式(田光进等,2008)。为了有效解决土地模拟中的相关问题,有学者提出了综合模型,即将不同的模型相结合来弥补单一模型的不足,从而提高土地利用变化的数据解释能力(林坚等,2014),如较为常用的CA-Markov模型等。近年来,土地利用变化及效应模型(CLUE-S模型)引起了较多学者的注意,普遍应用于土地格局预测模拟过程中(吴健生等,2012)。CLUE-S模型主要通过通过对影响土地变化的社会、经济、自然等多种因素的识别来探讨不同尺度下的土地格局演化趋势(刘纪远,邓祥征,2009),能够整合模拟不同情景方案下多种土地利用类型的时空变化过程,为土地利用决策提供科学依据,已经取得了较多成果(蔡玉梅等,2004;蒙吉军等,2010;吴健生等,2012;张丁轩等,2013)。与其他模型相比,CLUE-S模型能够将自然驱动因素与社会经济因素进行综合、空间与非空间分配相结合,具有更好的开放性(吴健生等,2012),但也存在预测土地利用需求计算中需要借助其他模型的局限性。基于此,本文借鉴陆汝成等(2009)的研究将CLUE-S模型与Markov模型相结合,首先,利用Markov模型实现对土地需求的预测;其次,利用CLUE-S模型实现土地利用数据的空间分配,实现两个模型的优势互补,有效提高土地利用变化的模拟精度,具有一定的实用性。

作为快速城市化进程中的发达城市,北京市近年来经济、人口高速增长以及重大基础设施建设导致的土地利用格局变化具有典型性,有重要的研究价值。因此,本文以北京市作为研究案例,在综合考虑各种土地利用数据与社会经济发展的基础上,将CLUE-S模型与Markov模型应用于北京市土地利用格局模拟中,预测未来不同情景下的土地需求,揭示土地利用系统的内部作用机制。本文的主要任务有3个:①描述和分析北京市土地利用格局的时空演化过程,为驱动机制研究提供基础;②通过量化的数学模型,识别北京市土地利用格局演化的主要驱动因子;③基于相关驱动因素,模拟和预测未来不同情景下北京市土地空间格局的演化趋势。



## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源与处理

本文研究区为北京市域范围。土地利用数据主要来源于北京市 1985、2000、2010 年三期 Landsat TM 影像数据; ASTER GDEM 高程数据空间分辨率均为 30 m(数据免费下载于 <http://gdem.ersdac.jp>); 地貌与土壤矢量数据分别提取自中国 1:100 万数字地貌数据库、中国 1:100 万土壤数据库, 其中地貌数据中地貌类型包括山地(低山、高山)、丘陵、河谷、平原等, 土壤数据包括褐土、潮土、棕壤等土壤类型, 主要用于土地模拟合理性的检测。社会经济数据源自相应年份的北京市统计年鉴、北京区域统计年鉴、北京市人口普查资料等。将空间数据统一投影并进行空间配准, 运用遥感影像处理工具进行处理, 提取有效的地类空间信息, 从而得到 1985、2000、2010 年 3 个年份的土地空间分布图, 并结合北京市年度变更调查数据及第二次土地调查数据进行了校正, 3 个年份影像解译精度分别为 87.26%、86.41% 和 88.37%, 达到了模拟的需求。结合研究区的土地利用特点, 北京市土地利用类型可划分为: 建设用地、水域、林地、耕地、草地和未利用地等六大类(孙丕苓等, 2014), 其中将园地、水田、旱地等一并划到耕地一类, 荒草地划到草地一类。

首先, 根据 DEM 数据对研究区的地形特征进行分析, 得到相关的坡向数据; 其次, 从不同年份的遥感影像获取其道路和河流等矢量数据, 计算研究区域内各地类到城市中心、道路、水系的距离等区域空间变量数据, 得到相应的距离因子图层; 再次, 整理研究区域内的人口、经济发展、科技及政策等变量数据, 实现人口、社会经济发展数据的空间化; 最后, 结合模型的运行分辨率进行模拟: 因本文模拟的栅格单元为 300 m×300 m, 因此模拟的空间尺度为 300 m。

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 CLUE-S 模型

CLUE-S 模型是通过定量的方法总结各土地利用类型演变与相关要素之间的关系, 进而模拟区域土地利用变化过程, 探索土地利用时空演变的基本规律(盛晟等, 2008; 蒙古军等, 2010; 黄明等, 2012)。模型主要包括非空间分析与空间分析。非空间分析主要是对土地利用空间布局变化驱动因素的选择与分析, 采用相关模型计算研究区域内未

来各土地利用类型的需求; 空间分析主要依据不同土地利用类型间的转换概率与转换规则, 对不同情景下的土地利用需求进行空间分配及模拟(蒙古军等, 2010)。

#### 2.2.2 马尔科夫(Markov)模型

马尔科夫模型因其长期预测优势在土地利用格局预测研究中得到广泛应用。马尔科夫模型是描述系统运动过程中的分布状态与组织形式, 认为某一土地类型在未来  $t+1$  时的空间分布格局只与  $t$  这个时间节点的分布状态具有相关性, 与其他时刻无关(吴季秋等, 2012), 其模型表示方式为:

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & \cdots & P_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{m1} & \cdots & P_{mn} \end{bmatrix} \quad (0 \leq P_{ij} \leq 1, \sum_{j=1}^n P_{ij} = 1) \quad (1)$$

式中:  $P$  为某一土地类型从当前时刻的空间分布格局到下一时刻分布格局的转移概率矩阵,  $m$  和  $n$  为研究区域内的土地类型数,  $P_{ij}$  为某一个土地利用类型  $i$  转变为另外的土地类型  $j$  的转移概率。综上可知, 在土地利用变化过程中可用土地利用类型的转移概率矩阵结合当前  $t$  时刻的土地利用状态来推知  $t+1$  时刻的状态。

## 3 北京市土地利用空间格局变化特征

在 GIS 与相关软件平台下, 得到北京市 3 个时期的土地利用类型图(图 1)。从空间尺度上来看, 北京市建设用地扩张的趋势极为明显, 由中心向四周扩散, 整体上呈现出“摊大饼”式的空间格局, 扩张方向主要沿环线向外以分散模式为主, 增长区域由

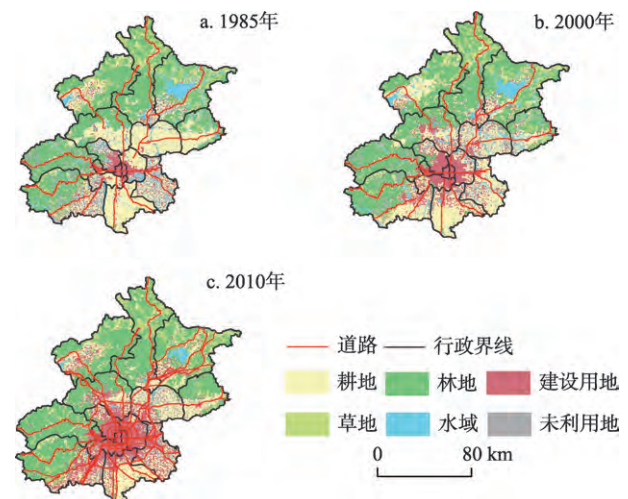


图 1 1985-2010 年北京市土地利用类型图

Fig.1 Land-use pattern in Beijing, 1985-2010

近郊区的朝阳、海淀向通州、昌平等远郊区集中,沿北京市区和所辖各县呈环状分布趋势。另外,耕地面积减少的区域主要集中在中东部和南部区域,沿着高速通道及国道方向呈放射性扩展。

根据相关学者提出的土地利用动态度公式(王秀兰等, 1999)可以得出,北京市土地利用变化速度在不断增加,表明社会经济活动对土地格局的影响更加剧烈。1985-2000年,北京市土地利用综合动态度为0.99,土地利用变化速度较为平缓;2000-2010年,北京市土地利用综合动态度为1.64,相比于前一时期,土地利用类型变化呈现加速趋势,受到人类活动的影响增多。

## 4 北京市土地利用空间格局演化的驱动因子及模拟精度

### 4.1 Logistic 回归结果与分析

土地利用格局演化是自然和人文因素共同作用的结果,在不同区域影响土地利用变化的驱动因素也具有差异性。分析土地利用空间格局演化的驱动因素,对揭示土地利用变化的内部机制以及预测未来土地利用具有重要作用。Logistic 回归模型是研究土地利用空间格局演化较常见的方法,有助于从多种影响土地利用变化的驱动因子中筛选出对研究区域的各个地类分布变化相关性更大的因子,逐步剔除对土地利用变化解释能力较弱的因子,在建立回归模型之前,已剔除存在明显共线性的因子,模型表示形式(黄明等, 2012)为:

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

式中: $P_i$ 表示每个区域中土地利用类型*i*可能出现的概率, $X_i$ 表示与土地利用类型*i*相关的驱动因素, $\beta_i$ 表示土地利用类型*i*与驱动因子之间的回归系数。

对于Logistic模型的回归结果,通常采用Pontius提出的ROC (Relative Operating Characteristic)方法进行显著性检验(Pontius et al, 2001)。ROC值的取值范围在0.5~1之间,值越大说明该土地利用类型概率分布与实际分布一致性越好。一般情况下,ROC值大于0.7时,表明该驱动因子对某种土地利用类型具有较大解释能力。

结合已有的土地利用变化驱动力的研究成果(刘纪远,张增祥等, 2009;任志远等, 2011)及北京市的实际情况,本文选取土地适应性变量、区域空间变量及社会经济变量等三类要素作为本文的原始数据,包括地貌、高程、坡度、距市(区、县)中心的距离、距河流距离、距铁路距离、距国道省道及高速公路的距离、人口、GDP、财政收支、城镇化水平(指城镇化率)等27个指标,通过消除多个指标之间的共线性关系,将剩余指标在相应的空间尺度上对不同的土地利用类型进行Logistic回归分析,回归结果如表1-2所示。可以看出,1985-2000年及2000-2010年两个时间段内,不同土地利用类型的ROC值都大于0.7,表明获取的相关驱动因子对不同时间段内土地利用类型演化的解释能力较好,其中对林地、建设用地的解释程度较强。总体看来,回归结果可用于土地空间格局的模拟及预测。

(1)从不同的土地利用类型来看:耕地受不同驱动因子的影响较大。高程、坡向、距离市(区、县)中心距离等地形因素以及经济要素等对土地类型

表1 1985-2000年北京市不同土地利用类型 Logistic 回归结果

Tab.1 Logistic regression results of spatial distribution of land-use types in Beijing, 1985-2000

驱动因子	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
	exp( $\beta$ )	exp( $\beta$ )	exp( $\beta$ )	exp( $\beta$ )	exp( $\beta$ )	exp( $\beta$ )
高程	0.9989	1.0004			1.0011	
坡度	0.7734	1.0337		0.9739	0.9783	0.9435
到河流距离	0.9404	1.0960	0.9535	0.8366	1.0640	
到市(区、县)中心距离	1.0669	1.0187	1.0533		0.9196	1.0628
到一般公路距离		1.0358			0.8623	
到铁路距离	1.0517	0.9389	0.9598	1.0640		0.9585
到高速公路距离	1.0577	1.0625	1.0206		0.9468	
GDP	0.9777	0.9815	1.0327			
城镇化水平	0.9726	0.9062	0.9225	0.9828	1.0369	
人口密度		1.0006	1.0002		0.9998	
常量	0.6923	2.6440	0.1726	0.0339	0.2714	0.0014
ROC 检验	0.7730	0.8460	0.8100	0.7470	0.8250	0.7990

表 2 2000-2010 年北京市不同土地利用类型 Logistic 回归结果

Tab.2 Logistic regression results of spatial distribution of land-use types in Beijing, 2000-2010

驱动因子	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
	$\exp(\beta)$	$\exp(\beta)$	$\exp(\beta)$	$\exp(\beta)$	$\exp(\beta)$	$\exp(\beta)$
高程(DEM)	0.9992	0.9997			1.0015	
坡度	0.8980	1.0173			0.9785	
到河流距离	0.9412	1.1001	0.9579	0.7812	1.0263	
到市(区、县)中心距离	1.0212	1.0156	1.0654		0.9160	0.9177
到一般公路距离		1.0518	1.0301	1.0475	0.8472	
到铁路距离	1.0336	0.9521	0.9787	1.0603		
到高速公路距离	1.0349	1.0648			0.9364	
GDP			1.0015	1.0015	1.0013	
城镇化水平	0.9943	0.9855	0.9659			
人口密度	0.9584	0.9989	0.9995	0.9986	1.0013	
常量	0.9654	0.4281	0.0436	0.0133	1.2785	0.0077
ROC 检验	0.7080	0.8300	0.7970	0.7980	0.8390	0.7320

转化为耕地的比率产生重要影响。通过回归数据分析可知:距市(区、县)中心、铁路、高速公路距离的  $\exp(\beta)$  大于 1, 距以上驱动因素的距离越远, 耕地的发生率将会增加。具体来看, 两个时间段内, 距离市(区、县)中心、铁路及高速公路每增加 300 m, 耕地的发生率都具有不同程度的增加。而坡度、高程、距河流距离  $\exp(\beta)$  值小于 1, 表明上述驱动因素与耕地发生率呈负相关; 坡度每增加  $1^\circ$ , 土地利用类型转化为耕地的概率减少 23.65%; 距离河流越近, 周围土地类型为耕地的概率越高, 这与耕地一般在坡度较低、水资源丰富地区的情况相符合。此外, 在社会经济因素方面, GDP、城镇化发展水平与耕地发生率呈负相关, 即 GDP、城镇化水平越高的区域, 土地利用类型转化为耕地的发生率越低。

(2) 从林地发生率来看, 该土地利用类型与坡度、距河流、市(区、县)中心、一般公路、高速公路距离等驱动因子的  $\exp(\beta)$  值大于 1, 表明距上述因素越远, 土地类型转变为林地的可能性越高。其中, 1985-2000、2000-2010 年, 坡度每上升  $1^\circ$ , 林地的发生率分别增加 3.37%、1.73%; 距河流、市(区、县)中心、一般公路、高速公路的距离每增加 300 m, 林地的发生率分别增加 9.6%、1.87%、3.58%、6.25%。而距铁路的距离越近 ( $\exp(\beta)$  小于 1), 林地的发生率越大; 此外, 人口密度、城镇化发展水平与林地发生率呈负相关关系, 即人口密集区、城镇化水平较高地区周围土地类型转化为林地的比率较低。

(3) 从对草地发生率的影响因素来看, 距河流、铁路的距离及城镇化水平的  $\exp(\beta)$  值小于 1, 说明

距河流、铁路的距离越近, 城镇化水平越低的地区, 土地利用类型转化为草地的概率越大; 距市(区、县)中心的距离、GDP 的  $\exp(\beta)$  值大于 1, 说明距离市(区、县)中心的距离每增加 300 m, 1985-2000 与 2000-2010 年, 周围土地利用类型转化为草地的比率分别增加 5.33%、6.54%; 此外, 经济发展较好地区草地的发生率越高。从不同时期来看, 距一般公路、高速公路的距离对草地发生率也具有一定影响, 但影响程度呈现差异性。

(4) 不同年份影响水域发生率的驱动因素呈现较大差异。1985-2000 年, 坡度、距河流的距离及城镇化水平与水域发生率呈负相关。坡度升高  $1^\circ$ , 水域的发生率降低 3%; 城镇化水平越高地区, 由于大量水资源的消耗使得水域的转化率降低。距离铁路的距离与水域发生率呈正相关, 即距离铁路越近, 周围土地类型转化为水域的发生率越低。2000-2010 年, 到一般公路距离、到铁路距离、GDP 及人口密度对水域发生率产生显著影响。可以看出, 距一般公路、铁路距离每增加 300 m, 水域的发生率分别增加 4.75%、6.03%; GDP 越高地区水域发生率越高, 但人口密度越高的区域土地类型转化为水域的比率越低。

(5) 从建设用地的转化比率来看, 建设用地与到市(区、县)中心、一般公路、高速公路的距离等驱动因子的  $\exp(\beta)$  值小于 1, 说明与距离上述因素越近, 周边土地利用类型转化为建设用地的比率越大, 距市(区、县)中心、一般公路、高速公路的距离每增加 300 m, 周边土地类型转化为建设用地的比率



分别减少8.1%、14.8%、6.3%。距河流的距离、城镇化水平以及GDP与建设用地发生率的 $\exp(\beta)$ 值大于1,表明在两个时段内(1985-2000、2000-2010年),距河流的距离每增加300 m,建设用地的发生率能够分别增加6.4%、2.6%;城镇化水平、GDP越高的区域,周边土地类型转化为建设用地的几率越高。此外,在地形因素中,坡度对建设用地的影响较大,坡度越高,建设用地的发生率越低。

综上所述,不同因子对土地利用类型的影响呈现差异性。可以看出,交通因素及社会经济因素对土地利用类型的转化率影响较大,其中以距铁路、高速公路、市(区、县)中心距离,及城镇化发展水平的影响最为突出。地形因素中,坡度对各个土地利用类型的影响较为显著,坡度较高地区有利于林地生长,坡度较低地方则有利于其他地类发展。

#### 4.2 北京市土地利用空间模拟及精度检验

以3个年份的土地利用空间格局变化数据为依托,结合不同驱动因子的影响程度、土地利用转移概率矩阵等相关变量进入CLUE-S模型来模拟2010年北京市土地利用空间分布格局,得到2010年北京市土地利用变化模拟图,将之与2010年北京市土地利用现状图进行对比分析(图2)。

从图2可以看出,土地利用空间格局模拟图与土地利用现状图具有较高的一致性。运用Kappa指数来检测CLUE-S模型对土地利用类型的空间分配精度(Pontius et al, 2000; 黄明等, 2012),经过计算得出,Kappa指数为87.03%,说明预测结果与实际

土地利用情况有较好一致性。综上所述,土地利用空间格局的模拟结果可以接受,表明CLUE-S模型在研究区内具有较好的适用性,故采用CLUE-S模型预测未来北京市土地利用需求。

## 5 北京市土地利用需求及空间格局模拟预测

### 5.1 不同情景设计

根据国内外相关情景设计的研究成果(Jenerette et al, 2001; 范泽孟等, 2005; 李月臣等, 2008; 蒙古军等, 2010; 张丁轩等, 2013),结合1985-2010年北京市土地利用变化特征,建立自然发展情景、土地利用总体规划情景、快速发展情景、水资源约束情景及生态保护情景等五种情景模式来模拟预测2020年北京市土地利用空间分布格局。

#### (1) 情景1:自然发展情景

结合1985-2010年北京市土地利用变化趋势,假定2010-2020年影响北京市土地利用变化的因素没有发生较大变化,结合历年来北京市社会经济发展的平均水平,得出2020年各种土地利用类型的需求量。

#### (2) 情景2:土地利用总体规划情景

根据北京市国民经济和社会发展规划及土地供给能力,《北京市土地利用总体规划》(2006-2020)对不同类型的土地面积作了相应限制。故此情景是根据《北京市土地利用总体规划》(2006-2020),对

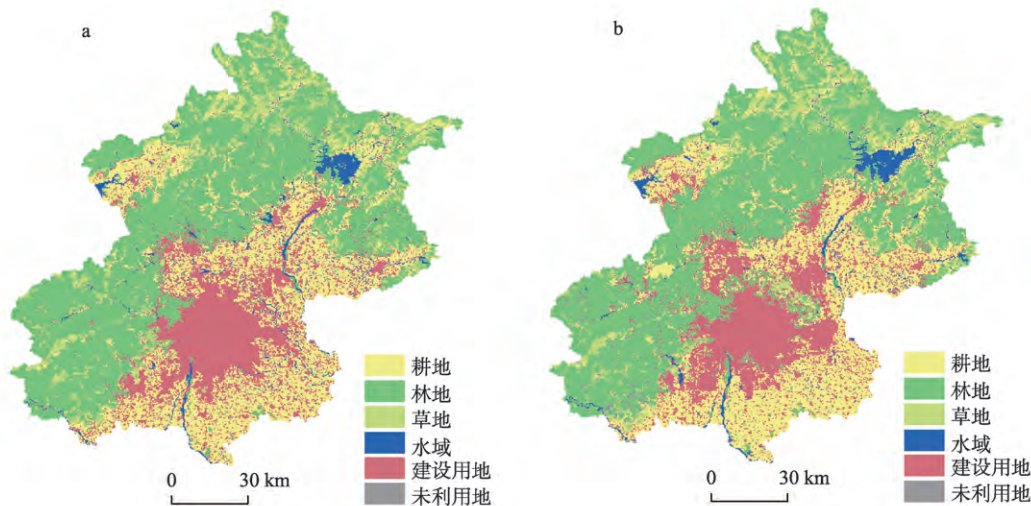


图2 2010年北京市土地利用现状图(a)与模拟图(b)比较

Fig.2 Comparison of observed (a) and simulated (b) land-use patterns in Beijing in 2010

2020年北京市规划面积进行插值,得出不同类型的土地需求量。

### (3) 情景3:快速发展情景

2000-2010年是北京市经济发展的快速阶段,发展程度超过以往阶段。假设2010-2020年土地利用类型面积继续实现增速发展,通过考虑GDP增长率、人口增长率、城镇化水平、住房面积、流动人口、森林覆盖率等多项因素,从而得出未来各个土地利用类型的需求面积。

### (4) 情景4:水资源约束情景

从水资源来看,2013年北京市人均水资源占有量仅为124 m<sup>3</sup>,可见首都人口与水资源的矛盾极为突出。从年际变化来看,2001-2013年北京常住人口人均年生活用水量平均为84 m<sup>3</sup>,如果按照每年人口平均增加60万计算,需水量每年增加约0.5亿 m<sup>3</sup>。随着首都社会经济发展,新增人口产生的巨大需水量给水资源供给带来的压力将进一步凸显,水资源短缺形势将会日益严峻。在历史数据的基础上,结合水资源总量、人均用水量、农用地用水量、工业GDP等情景参数,进行水资源约束情景下北京市土地类型需求预测。

### (5) 情景5:生态与耕地保护情景

该情景设定对生态安全有重要作用的林地、生态保护区等用地不能转变用途(张丁轩等,2013)。此外,为了有效保护耕地,主要以基本农田为限制,约束其保护范围内耕地不向其他类型用地转化,即基本农田保护区内的水田、旱地等不能转化为建设用地等其他类型用地。故此情景与其他情景相比,对耕地、林地面积具有一定限制。

## 5.2 不同情景下的土地需求预测及空间模拟对比

在1985-2010年土地利用变化数据的基础上,

借助Markov模型对2020年不同情景下北京市各种土地利用类型的需求量进行预测,并根据不同的情景设计适度调整预测结果(表3)。

由表3可以看出,除林地、建设用地外,耕地、草地、水域等其他用地类型都呈减少趋势,而且不同情景下各种土地利用类型变化也具有较大差异。结合不同情景的用地需求、土地转移规则、相关驱动因素及约束条件,与1985、2000年相比较而言,北京市未来的发展方向与趋势与2010年的空间格局具有更密切的相关性,故选择2010年为预测基准年,实现2020年北京市土地利用空间分布模拟预测(图3)。由图3可以看出,不同情景下,各种土地利用类型的空间分布格局也呈现差异性,其中土地利用变化最为明显的依然是中心城区及其外围区域。

(1) 自然发展情景下,建设用地向外的扩张趋势明显,沿着主要交通干线方向,如机场快轨方向等,尤其是昌平、顺义、通州地区更为突出。受政府发展新城政策的影响,中心城区功能逐步向新城疏解,吸引人口向昌平、顺义等地集中,使得居住用地不断扩张,耕地面积、水域面积大幅度减少,其中耕地面积减少73413 hm<sup>2</sup>,建设用地增加89001 hm<sup>2</sup>。在快速发展情景下,北京市各种土地利用类型的变化最为剧烈,其中到2020年建设用地的增加率达31.4%,主要由耕地、水域面积、未利用地转化而来;耕地面积减少78157 hm<sup>2</sup>,水资源短缺的形势更加严重,林地与草地的变化趋势较为平缓。由此可见,随着城镇化进程的不断推进,在自然发展及快速发展情景下,北京市城市扩张更为明显,土地资源面临着较大的不可持续性。

(2) 生态与耕地保护情景下,由于限制了基本农田内的耕地不能转化为其他类型的用地,故本情

表3 不同情景下2020年北京各种土地类型需求量预测/hm<sup>2</sup>

Tab. 3 Projected land use demand under different scenarios in Beijing in 2020 /hm<sup>2</sup>

情景设计	年份/变化量	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
基准年	2010年	406692	741789	119772	44082	311013	10305
自然发展情景	2020年	333279	756891	115083	21330	400014	7056
	变化量	-73413	15102	-4689	-22752	89001	-3249
规划情景	2020年	358100	750007	111000	23934	381700	8912
	变化量	-48592	8218	-8772	-20148	70687	-1392
快速发展情景	2020年	328534	757222	114975	17333	408672	6916
	变化量	-78157	15433	-4797	-26749	97659	-3389
水资源约束情景	2020年	349858	753737	116064	29466	378751	5776
	变化量	-56833	11948	-3708	-14616	67738	-4529
生态与耕地保护情景	2020年	360912	751635	116718	34890	364575	4923
	变化量	-45780	9846	-3054	-9192	53562	-5382



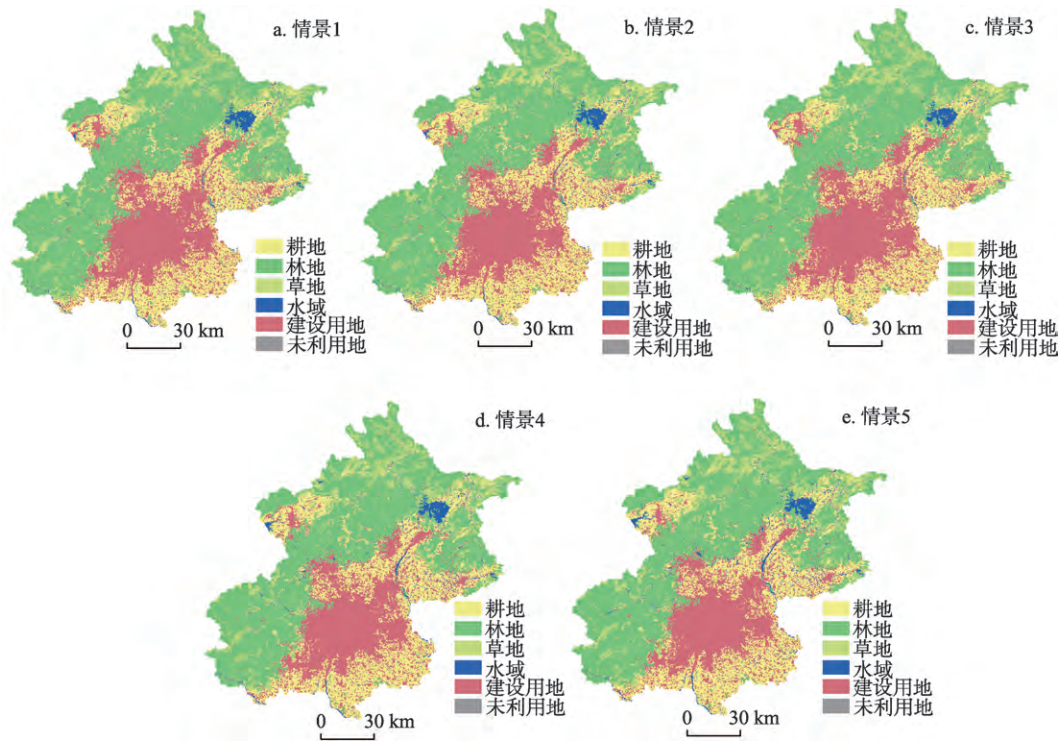


图3 不同情景下2020年北京市土地利用空间模拟预测

Fig.3 Simulation of land-use demand under different scenarios in Beijing in 2020

景下土地利用类型的变化趋势较为缓和。根据研究区内的实际情况,西部山区、海拔较高的地理环境限制了城市建设用地的无序扩张程度。另外可以看出,北京市林地面积有所增加,在一定程度上改善了生态环境;而建设用地的增加率为17.2%,比自然发展情景下建设用地的增加率减少11.39%;水域面积及耕地面积减少率分别为20.9%、11.3%。可见该类情景具有明显的政策调控效果,从而达到了保护耕地及生态环境的效用。在水资源约束情景下,土地类型也呈现出类似的发展格局。

(3) 规划情景下,相较于自然发展和快速发展情景,可以看出,该模式兼顾了社会经济的发展,也考虑了对生态环境的保护,土地的可持续发展性增强。其中耕地减少率为11.9%,建设用地增长率为22.7%,建设用地扩张趋势趋于缓和;林地等土地类型面积有一定程度增加,尽管与生态保护情景相比,增幅不大,但在一定程度上也改善了生态环境。

## 6 结论与讨论

### 6.1 结论

本文以北京市为研究案例地,基于CLUE-S及

Markov模型,探索了该模型在北京市土地利用方面的适用性。在对模拟结果进行验证的基础上,基于北京市社会经济发展情况、土地利用规划、资源禀赋及生态保护等构建了五种不同情景模式,对北京市2020年土地利用变化进行情景模拟及预测。主要结论如下:

(1) 1985-2000年,北京市土地利用综合动态度为0.99,土地利用变化速度较为平缓;2000-2010年,北京市土地利用综合动态度为1.64,相比于前一时期,土地利用类型变化呈现加速趋势,社会经济活动对土地格局的影响更加剧烈。从区域差异的视角来看,不同区县的综合土地利用动态度也呈现较大的差异性。

(2) 通过对土地利用空间格局的回归分析发现,驱动因子对不同土地利用类型的影响也呈现差异性。其中交通因素及社会经济因素对土地利用类型的转化率影响较为明显;地形因素中,坡度对各个土地利用类型的影响较大。

(3) 通过对北京市土地利用空间分布格局的模拟,不同情景模式下的空间格局模拟显示:城市发展均表现为继续向外扩展,且以东南、东北为主要扩展方向,不同情景条件下的土地空间扩张程度存



在一定的差异。研究发现,快速发展情景下,建设用地增加面积最为显著,耕地在生态与耕地保护情景下减少幅度最小,而草地、水域面积分别在规划情景与快速发展情景下减少幅度最大。另外,可以看出,自然发展情景下建设用地增加是生态保护情景下建设用地增加面积的1.66倍,耕地减少面积比率也达到1.6倍,表明北京市城市空间扩张形势依然严峻。从五种情景的比较可以看出,生态保护及水资源约束情景在一定程度优化了北京市的土地利用空间格局,促进建设用地的合理扩张;从发展的角度来看,自然发展情景似乎更符合当前的发展趋势,但必须要在土地利用规划的前提下,加强对生态环境的保护,设定城市增长边界,确保土地资源的可持续性。

## 6.2 讨论

(1) 土地利用系统是一个复杂的系统,本文从土地适应性变量、区域空间变量及社会经济变量等方面构建了影响土地利用变化的相关因素,但仍存在一些其他难以量化的因素。变量与指标的选择在不同程度上导致模拟结果或者模型参数的差异,对土地利用的模拟预测产生一定影响。故如何选取更具科学性、更能反映人类活动对土地演化影响的指标显得更为关键。

(2) 基于相关驱动因子模拟2010年北京市土地利用格局虽然具有较高的模拟精度,但也存在一定误差。一方面在于模拟选择的约束图层以2002年基本农田为基础进行的适当调整,导致约束程度有些差异;另一方面是由于本文获取的社会经济数据只到县区级,未涉及街道层面数据,在进行模拟时采用空间插值,从而在一定程度上影响了模拟精度。

(3) CLUE-S模型对北京市土地空间格局模拟预测具有一定的适用性,但选择不同的土地需求预测模型会呈现出不同的结果。因此,运用灰色关联模型、系统动力学模型等与CLUE-S模型相结合的方法,从数量预测、空间分析等方面实现土地利用格局的合理预测及模拟成为当前研究的重要方向。此外,作为快速城镇化进程中的特大城市,城市发展规划、重大基础设施建设、中心城区的功能疏解等政策因素都会对土地格局演化产生影响,如何对这些影响进行量化成为未来的研究重点。

**致谢:** 中国农业大学资源与环境学院孙丕苓博士在遥感影像解译及模拟方面提供了诸多帮助与建议,特致谢忱!

## 参考文献(References)

- 蔡玉梅,刘彦随,宇振荣,等. 2004. 土地利用变化空间模拟的进展: CLUE-S模型及其应用[J]. 地理科学进展, 23(4): 63-71. [Cai Y M, Liu Y S, Yu Z R, et al. 2004. Progress in spatial simulation of land use change: CLUE-S model and its application[J]. Progress in Geography, 23(4): 63-71.]
- 戴尔阜,吴卓,芦海花,等. 2015. 基于线性光谱分离技术的西藏乃东县土地覆被变化监测[J]. 地理科学进展, 34(7): 854-861. [Dai E F, Wu Z, Lu H H, et al. 2015. Linear spectral unmixing-based method for the detection of land cover change in Naidong County, Qinghai-Tibet Plateau [J]. Progress in Geography, 34(7): 854-861.]
- 范泽孟,岳天祥,刘纪远,等. 2005. 中国土地覆盖时空变化未来情景分析[J]. 地理学报, 60(6): 941-952. [Fan Z M, Yue T X, Liu J Y, et al. 2005. Spatial and temporal distribution of land over scenarios in China[J]. Acta Geographica Sinica, 60(6): 941-952.]
- 黄明,张学霞,张建军,等. 2012. 基于CLUE-S模型的罗玉沟流域多尺度土地利用变化模拟[J]. 资源科学, 34(4): 769-776. [Huang M, Zhang X X, Zhang J J, et al. 2012. A multi-scale simulation of land use change in Luoyugou watershed based on CLUE-S model[J]. Resources Science, 34(4): 769-776.]
- 李月臣,何春阳. 2008. 中国北方土地利用/覆盖变化的情景模拟与预测[J]. 科学通报, 53(6): 713-723. [Li Y C, He C Y. 2008. Scenarios simulation and prediction of land use/cover change in the Northern China[J]. Chinese Science Bulletin, 53(6): 713-723.]
- 林坚,张禹平,李婧怡,等. 2014. 2013年土地科学研究重点进展评述及2014年展望: 土地利用与规划分报告[J]. 中国土地科学, 28(2): 3-12. [Lin J, Zhang Y P, Li J Y, et al. 2014. Comments on land sciences research priorities in 2013 and perspective for 2014: sub-report of land use and planning[J]. China Land Sciences, 28(2): 3-12.]
- 刘纪远,邓祥征. 2009. LUCC时空过程研究的方法进展[J]. 科学通报, 54(21): 3251-3258. [Liu J Y, Deng X Z. 2009. Progress of the research methodologies on the temporal and spatial process of LUCC[J]. Chinese Science Bulletin, 54(21): 3251-3258.]
- 刘纪远,匡文慧,张增祥,等. 2014. 20世纪80年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局[J]. 地理学报, 69(1): 3-14. [Liu J Y, Kuang W H, Zhang Z X, et al. 2014. Spatio-temporal characteristics, patterns, and causes of land-use changes in China since the late 1980s [J]. Acta Geographica Sinica, 69(1): 3-14.]
- 刘纪远,张增祥,徐新良,等. 2009. 21世纪初中国土地利用变化的空间格局与驱动力分析[J]. 地理学报, 64(12): 1411-1420. [Liu J Y, Zhang Z X, Xu X L, et al. 2009. Spatial patterns and driving forces of land use change in Chi-

- na in the early 21st century[J]. *Acta Geographica Sinica*, 64(12): 1411-1420.]
- 陆汝成, 黄贤金, 左天惠, 等. 2009. 基于 CLUE-S 和 Markov 复合模型的土地利用情景模拟研究: 以江苏省环太湖地区为例[J]. *地理科学*, 29(4): 577-581. [Lu R C, Huang X J, Zuo T H, et al. 2009. Land use scenarios simulation based on CLUE-S and Markov composite model: a case study of Taihu Lake Rim in Jiangsu Province[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 29(4): 577-581.]
- 蒙古军, 严汾, 赵春红. 2010. 大城市边缘区土地利用变化模拟研究: 以北京市昌平区为例[J]. *应用基础与工程科学学报*, 18(4): 197-208. [Meng J J, Yan F, Zhao C H. 2010. Land use change simulation on the edge of metropolis: a case study of Changping District in Beijing[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 18(4): 197-208.]
- 裴彬, 潘韬. 2010. 土地利用系统动态变化模拟研究进展[J]. *地理科学进展*, 29(9): 1060-1066. [Pei B, Pan T. 2010. Land use system dynamic modeling: literature review and future research direction in China[J]. *Progress in Geography*, 29(9): 1060-1066.]
- 任志远, 李冬玉, 杨勇. 2011. 关中地区土地利用格局模拟与驱动力分析[J]. *测绘科学*, 36(1): 105-108. [Ren Z Y, Li D Y, Yang Y. 2011. Simulation and driving force analysis of land use pattern in Guanzhong region, Shaanxi Province [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 36(1): 105-108.]
- 盛晟, 刘茂松, 徐驰, 等. 2008. CLUE-S 模型在南京市土地利用变化研究中的应用[J]. *生态学杂志*, 27(2): 235-239. [Sheng S, Liu M S, Xu C, et al. 2008. Application of CLUE-S model in simulating land use changes in Nanjing metropolitan region[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 27(2): 235-239.]
- 孙丕苓, 许月卿, 王数. 2014. 环京津贫困带土地利用变化的地形梯度效应分析[J]. *农业工程学报*, 30(14): 277-288. [Sun P L, Xu Y Q, Wang S. 2014. Terrain gradient effect analysis of land use change in poverty area around Beijing and Tianjin[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 30(14): 277-288.]
- 唐华俊, 吴文斌, 杨鹏, 等. 2009. 土地利用/土地覆被变化 (LUCC) 模型研究进展[J]. *地理学报*, 64(4): 456-468. [Tang H J, Wu W B, Yang P, et al. 2009. Recent progresses of land use and land cover change (LUCC) models[J]. *Acta Geographica Sinica*, 64(4): 456-468.]
- 田光进, 郭建国. 2008. 基于智能体模型的土地利用动态模拟研究进展[J]. *生态学报*, 28(9): 4451-4459. [Tian G J, Wu J G. 2008. Simulating land use change with agent based models: progress and prospects[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 28(9): 4451-4459.]
- 王祺, 蒙古军, 毛熙彦. 2014. 基于邻域相关的漓江流域土地利用多情景模拟与景观格局变化[J]. *地理研究*, 33(6): 1073-1084. [Wang Q, Meng J J, Mao X Y. 2014. Scenario simulation and landscape pattern assessment of land use change based on neighborhood analysis and auto-logistic model: a case study of Lijiang River Basin[J]. *Geographical Research*, 33(6): 1073-1084.]
- 王秀兰, 包玉海. 1999. 土地利用动态变化研究方法探讨[J]. *地理科学进展*, 18(1): 81-87. [Wang X L, Bao Y H. 1999. Study on the methods of land use dynamic change research[J]. *Progress in Geography*, 18(1): 81-87.]
- 吴季秋, 俞花美, 肖明, 等. 2012. 基于 CA-Markov 模型的海湾土地利用动态预测[J]. *环境工程技术学报*, 2(6): 531-539. [Wu J Q, Yu H M, Xiao M, et al. 2012. Dynamic prediction for gulf land use based on CA-Markov model[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2(6): 531-539.]
- 吴健生, 冯喆, 高阳, 等. 2012. CLUE-S 模型应用进展与改进研究[J]. *地理科学进展*, 31(1): 3-10. [Wu J S, Feng Z, Gao Y, et al. 2012. Recent progresses on the application and improvement of the CLUE-S model[J]. *Progress in Geography*, 31(1): 3-10.]
- 吴琳娜, 杨胜天, 刘晓燕, 等. 2014. 1976 年以来北洛河流域土地利用变化对人类活动程度的响应[J]. *地理学报*, 69(1): 54-63. [Wu L N, Yang S T, Liu X Y, et al. 2014. Response analysis of land use change to the degree of human activities in Beiluo River basin since 1976[J]. *Acta Geographica Sinica*, 69(1): 54-63.]
- 杨俊, 解鹏, 席建超, 等. 2015. 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*, 70(3): 461-475. [Yang J, Xie P, Xi J C, et al. 2015. LUCC simulation based on the cellular automata simulation: a case study of Dalian Economic and Technological Development Zone[J]. *Acta Geographica Sinica*, 70(3): 461-475.]
- 于兴修, 杨桂山, 王瑶. 2004. 土地利用覆被变化的环境效应研究进展与动向[J]. *地理科学*, 24(5): 627-633. [Yu X X, Yang G S, Wang Y. 2004. Advances in researchers on environmental effects of land use/cover change[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 24(5): 627-633.]
- 张丁轩, 付梅臣, 陶金, 等. 2013. 基于 CLUE-S 模型的矿业城市土地利用变化情景模拟[J]. *农业工程学报*, 29(12): 246-256. [Zhang D X, Fu M C, Tao J, et al. 2013. Scenario simulation of land use change in mining city based on CLUE-S model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 29(12): 246-256.]
- Dewan A M, Kabir M H, Nahar K, et al. 2012. Urbanisation and environmental degradation in Dhaka Metropolitan Area of Bangladesh[J]. *International Journal of Environment and Sustainable Development*, 11(2): 118-147.
- Jenerette G D, Wu J. 2001. Analysis and simulation of land-use change in the central Arizona-Phoenix region, USA [J]. *Landscape Ecology*, 16(7): 611-626.
- Lambin E F, Baulies X, Bockstael N, et al. 1999. Land-use and land-cover change (LUCC): implementation strategy[R]. IGBP Report 48 and IHDP Report 10, Stockholm, Sweden and Bonn, Germany: 125-126.

- Lambin E F, Geist H J, Lepers E. 2003. Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions[J]. *Annual review of environment and resources*, 28(1): 205-241.
- Lee L. 1979. Factors affecting land use change at the urban-rural fringe[J]. *Growth and Change*, 10(4): 25-31.
- Meyfroidt P, Lambin E F, Erb K H, et al. 2013. Globalization of land use: distant drivers of land change and geographic displacement of land use[J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 5(5): 438-444.
- Pontius R G. 2000. Quantification error versus location error in comparison of categorical maps[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 66(8): 1011-1016.
- Pontius R G, Schneider L C. 2001. Land-cover change model validation by an ROC method for the Ipswich watershed, Massachusetts, USA[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 85(1): 239-248.
- Schaldach R, Alcamo J, Koch J, et al. 2011. An integrated approach to modelling land-use change on continental and global scales[J]. *Environmental Modelling & Software*, 26(8): 1041-1051.
- Wu Y Z, Zhang X L, Shen L Y. 2011. The impact of urbanization policy on land use change: a scenario analysis[J]. *Cities*, 28(2): 147-159.
- Xu Q L, Yang K, Wang G L, et al. 2015. Agent-based modeling and simulations of land-use and land-cover change according to ant colony optimization: a case study of the Erhai Lake Basin, China[J]. *Natural Hazards*, 75(1):95 - 118.
- Yi Q, Lam N S. 2015. Modeling land use and land cover changes in a vulnerable coastal region using artificial neural networks and cellular automata[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(3): 1-16.

## Simulation and projection of land-use change in Beijing under different scenarios

HAN Huiran, YANG Chengfeng, SONG Jinping\*

(School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** Land-use change is a dynamic process through which human and natural systems interact and the link between social economic activities and ecological processes, and plays an important role in the understanding of human-environment relationship. It has important implications for land management, therefore exploring the many factors influencing land use and land cover has been the focus of scientific study across multiple disciplines, locations, and scales. Simulation of land use spatial pattern under different scenarios may reveal the driving factors of regional land-use change spatially, which is an important way to analyze future land-use demand. In this study, using Beijing as an example we examined characteristics of land-use change and simulated future land-use demand by a CLUE-S model, and identified related driving factors using a Logistic model combine with land use data extracted from remote sensing images in 1985, 2000, and 2010. We simulated the land use requirements of Beijing in 2020 under different scenarios based on economic and social development, land use planning, resources and ecological protection and other conditions. The results are as follows: (1) different driving factors resulted in some different changes in various land-use types. Transportation and socioeconomic factors may have played an important role in the conversion of land-use types especially through affecting accessibility to the administrative center and level of urbanization. The effect of topographic factors, slope in particular, on land-use types is clear, with higher slope conducive to forest land and lower slope for other land-use types.(2) Consistency between the projected and actual land-use situations is high—the kappa index is 0.87. (3) Comparison of simulated land-use changes under various scenarios shows that future land use differs under different scenarios. Spatial pattern of land use in Beijing is optimized to a certain degree under the ecological protection and water resources conservation scenario, which promotes rational expansion of construction land. Under the natural development scenario land use should be based on the Land Use Plan to ensure the sustainability of land resources by setting urban growth boundary and so on.

**Key words:** Land-use change; spatial pattern; scenario simulation; CLUE-S model; Beijing