

基于地理模拟方法的昆明市空间拓展情景分析

赵耀龙¹, 张珂¹, 彭永俊¹, 付迎春¹, 张洪²

(1. 华南师范大学地理科学学院, 广州 510631; 2. 云南财经大学城市与环境学院, 昆明 650221)

摘要: 改革开放以来, 西部高原湖滨城市经历的快速城镇化进程给湖泊流域带来了较为严重的生态环境问题, 未来城市空间发展政策的调整需要关注城市空间拓展对区域生态环境的影响。以位于滇池湖滨地区的昆明市为例, 设定6种不同的城市空间拓展政策情景, 应用SLEUTH模型预测了6种情景下未来20年的城市空间格局, 采用空间指数和空间分析方法对预测结果进行了分析评价。结果表明: 昆明市城市建成区具有典型的摊大饼式空间拓展模式, 城市道路网对城市形态具有重要的影响。6种情景模式下未来昆明市建成区空间格局既有相似性, 也表现出显著的差异。城市建设用地空间格局总体上呈集约、紧凑型的发展趋势。生态保护与城市发展管制相结合的政策情景对滇池湖滨地区的景观影响最小。多中心城市发展格局和城市发展管制相结合的政策情景对城市总体空间规模的控制具有明显的效果, 但不宜在湖滨地区实施。滇池湖滨地区需要划定景观或生态保护区, 严格禁止城市建设用地对湖滨用地景观的占用与分割。滇池湖滨以外的区域, 适宜执行生态保护与城市发展管制相结合的多中心发展模式。

关键词: 地理模拟; 城市空间拓展; 情景分析; SLEUTH模型; 空间指数

DOI: 10.11821/dljy201401011

1 引言

改革开放以来, 中国经历了持续而快速的城镇化进程。1978年, 城镇人口总量为1.72亿, 城镇化率为17.92%; 到2010年, 城镇人口总数达到6.66亿, 城镇化率提高到49.68%^[1-2]。根据预测, 在未来的20年内这种快速增长的城镇化进程仍将持续^[3]。城镇化进程推动了我国社会和经济的发展, 在一定程度上改善了人民群众的生产生活条件, 但伴随着城镇化水平的提高, 城市及其腹地发生了显著的土地利用/覆盖变化, 直接表现为建设用地呈“冒进式”无序态势发展^[4-5], 土地集约利用程度较低, 城市周边大量优质耕地资源被蚕食, 给当地资源、环境带来较为严重的负面影响。位于中国西南部云贵高原中部滇池流域的昆明市, 也经历了同样快速的城镇化进程。昆明市位于滇池的湖滨地区, 近年来土地利用/覆盖空间格局发生了显著的变化^[6-7], 城乡建设用地面积大规模扩展, 给滇池及其流域带来了诸多生态环境问题^[8]。区域土地利用/覆盖变化格局通常受城镇化进程中城市土地利用政策的直接影响^[9-10], 因此, 通过科学合理地调整城市土地利用政策引导城市合理拓展、改善未来土地利用/覆盖格局, 以协调城市用地空间拓展与生态环境保护之间的关

收稿日期: 2012-10-16; 修订日期: 2013-05-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(40901090, 41101152, 41001079); 广东省高等学校人才培养专项基金项目; 教育部留学回国人员科研启动基金项目; 华南师范大学学生课外科研重点课题

作者简介: 赵耀龙(1974-), 男, 河南沈丘人, 博士, 教授, 主要从事地理信息科学与城市研究。

E-mail: yaolong@scnu.edu.cn

其输入数据名称首字母缩写的简称：坡度（Slope）、土地利用（Land use）、限制因素（Excluded）、城市范围（Urban）、交通（Transportation）、山体阴影（Hillshade）。该模型假设历史增长趋势是持续的，认为未来的现象可以由过去真实演化趋势模拟得到。在各种传感器和不同分辨率的遥感影像以及各类专题数据的支持下，SLEUTH模型能在宏观和中观尺度上模拟人为政策因素引起的城市空间拓展情况，并能在输入数据的基础上进行中长期城市空间拓展预测，已广泛应用于世界各地的城市动态模拟^[36, 37]。

本文采用的SLEUTH模型为3.0版本，包含三种运行模式：测试模式、校正模式、预测模式。测试模块可确保模型的正确编译和运行；校正和预测模式是模型的主体，其中校正模式最为复杂和耗时。输入图层后，模型通过五个系数来模拟城市增长的4种形式（表1），5个系数的值域均为[0, 100]。0代表该控制系数对于城市空间拓展不起作用，100则代表着其影响最大。

表1 SLEUTH模型中城市增长类型的定义

Tab. 1 Growth types simulated by the SLEUTH model

增长环顺序	增长类型	控制系数	描 述
1	自发增长	散布系数	随机选择新的城市化元胞
2	新传播中心增长	繁衍系数	自发增长的城市元胞成为新的空间拓展中心
3	边缘增长	蔓延系数	在新旧城市拓展中心基础上产生的增长.
4	道路影响增长	道路权重系数	沿交通网络产生新的城市化元胞
全过程	坡度阻抗	坡度阻抗系数	抑制坡度高的地方出现城市化
全过程	排除图层	用户定义	由用户定义的完全或部分不可城市化的区域

SLEUTH模型通过自调节功能来调节增长系数，当增长率总和超过最高临界阈值时，散布系数、繁殖系数和空间拓展系数均乘以一个大于1的系数，模拟“繁荣”增长模式；反之，乘以一个小于1的系数，模拟城市“萧条”的增长模式。在自调节功能下，SLEUTH模型能模拟出区域内典型的S曲线型城市增长，合乎客观规律；否则，只要还有可发展的空间，模型将生成线性或指数型的城市增长格局^[38]。

2.3 数据与处理

作者曾经应用研究区域范围内的Landsat MSS影像（1974年）和Landsat TM影像（1988，1998，2008年）提取和分析了昆明市1974年至2008年间的土地利用/覆盖变化动态^[6]，本文应用该成果作为城市土地利用/覆盖地理模拟系统参数检校和预测的基础数据（表2）。另外，根据模拟的需要又收集了研究区域历史交通数据（1988，1996，2003年）、DEM数字高程模型、1:1万比例尺土地利用现状图（2008年）、村镇调查成果（2008年）等纸质和电子数据。所有数据都在ArcGIS软件中进行处理。纸质地图通过扫描、配准、矢量化处理，电子数据进行了几何检校和配准，统一为30 m分辨率的栅格数据，采用WGS-84坐标系下UTM北48带投影，并转换为模型所需要的Gif格式。

2.4 模型校正与预测

模型校正的目的就是获取一组能模拟历史年份城市空间格局演变的参数，用来把握城市演变的历史规则。SLEUTH模型的校正采用Brute force蒙特卡洛方法，分粗校正、精校正、终校正三个阶段来完成。在校正的每个阶段，由用户设定控制城市增长的5个参数的范围和步长，模型会尝试各种可能的参数组合，并计算每一种组合下的城市动态与历史年份实际增长之间的匹配程度。不同参数组合匹配程度的优劣由最小二乘回归获得的量测指

表 2 基础数据

Tab. 2 Input dataset for SLEUTH model

输入图层	来源	格式和年份
城市土地利用/覆盖数据	Landsat MSS/TM 遥感影像	栅格, 1974, 1988, 1998, 2008
交通图	交通地图	栅格, 1988, 1996, 2003
坡度	由 DEM 生成	栅格
山体阴影	由 DEM 生成	栅格
排除因素图层	从土地利用分类图中提取主要湖泊水体等	栅格
村镇调查成果	云南财经大学城市与环境学院于 2008 年组织的 野外实地调查成果	电子文本和矢量图, 2008
土地利用现状图	第二次全国土地利用调查成果	矢量, 2008

标数值的大小来评价^[39]。很多学者对根据这些量测指标来选取参数范围的方式进行了广泛的尝试, 但对最合适的方法一直没有达成一致的意見^[35, 40, 41]。本文采用传统的校正方式, 即采用 Lee-Sallee 形状指数作为校正时筛选参数范围的依据^[42]。此外, Jantz 等的研究表明, SLEUTH 模型对于像元大小具有敏感性^[40], 所以不提倡 Clarke 与 Gaydos^[38]提出的按像元大小等级规模次序来进行的粗—精—终校正的步骤。本文统一采用 30 m 空间分辨率像元大小的数据集来进行模型的校正。

由于 SLEUTH 模型具有自修正特性, 模型参数值在从初始年份到期末年份时可能已经发生改变。为了启动模型的预测功能, 则要求输入一组期末年份的最佳校正参数。使用终校正获取的最优参数再校正模式运行历史年份的增长, 即可获取一组期末年份的参数值来初始化预测模式。然而, 由于模型的随机变动性, 许多次蒙特卡洛迭代所得结果的平均值常被用于生成一组更加健壮的参数组合。

2.5 城市空间拓展情景定义

本文从保持自然增长、生态环境保护、城市形态管制和政策综合等 4 种城市空间拓展模式设计了 6 个情景 (表 3)。SLEUTH 模型可以通过调整参数、定义限制因素图层 (图 2) 等多种途径对不同情景的未来城市空间拓展进行预测^[43], 得到不同情景下未来城市空间拓展的可能性分布图, 作为评价不同政策效能的基础。

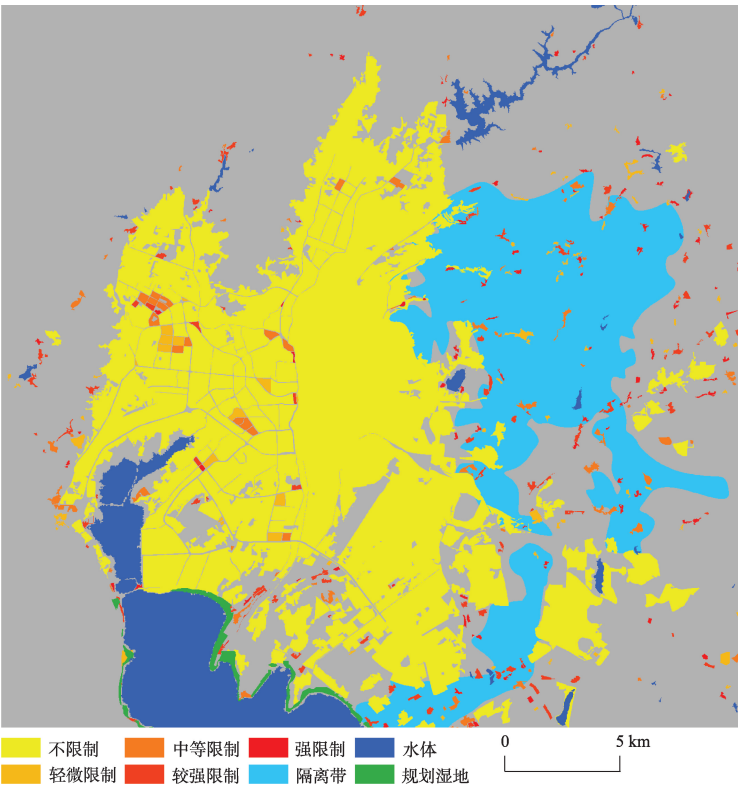
(1) 情景一: 自然增长模式, 即不进行任何政策调整, 允许城市建设区按照现有发展趋势进行拓展, 研究区内城—镇—村的空间拓展仅受到绝对禁止建设区 (如水体) 的限制。在模型中, 不对各预测参数数值进行调整, 仅使用城市发展的限制因素图层进行控制, 将湖泊水面、水库水塘等图层参数设置为阈值的最大值。

表 3 6 种政策情景的定义

Tab. 3 The definitions of six types of policy context

城市空间拓展模式	情景编号	情景定义	描述
自然趋势	一	自然增长 (NT)	不做政策调整, 按现有城市空间演变趋势发展
生态环境保护	二	生态可持续 (ES)	以最少 (适宜) 占用生态用地量为目标
城市形态管制	三	城市发展管制 (UDM)	对城-镇-村土地集约利用度分级别进行限制
	四	多中心模式 (PC)	限制“摊大饼”式扩展趋势, 鼓励城市扩展时形成多个新的中心, 促成多中心的城市化格局
政策综合	五	生态环境保护与城市发展管制相结合 (EU)	同时考虑生态环境保护与城市发展管制两种政策情景模式
	六	生态环境保护与城市发展管制下的多中心发展模式 (EUP)	在生态环境保护与城市发展管制相结合的背景 下, 鼓励形成多中心的城市发展格局

(2) 情景二：生态环境保护模式，即以城市建设用地占用最少（适宜）生态用地量为目的，研究区内城—镇—村的空间拓展受到滇池周边绝对禁止建设区（水体、规划湿地）和相对禁止建设区（生态隔离带）的限制。在模型中，不对各预测参数数值进行调整，而在限制因素图层中，将湖泊水面、水库水塘、规划湿地等图层参数设置为阈值的最大值，生态隔离带图层参数设置为最大阈值的60%，以体现“相对禁止”建设区的情景设置效果。



(3) 情景三：城市发展管制模式，即按照昆明滇池流域“全域城镇化”^[44]发展的要求和城—镇—村规模体系结构限制，根据土地集约利用度对城—镇—村发展的可能性分级进行限制，引导城市空间格局的合理调整。土地集约利用度通过村镇调查成果进行测算获得。在模型中，城—镇—村发展的可能性级别按照规模进行等间距划分（分为强限制区、较强限制区、中等限制区、轻微限制区和无限制区），将其限制因素图层参数按可能性级别由大到小分别设置为最大阈值的100%、80%、60%、40%和20%；湖泊水面、水库水塘等图层参数设置为阈值的最大值。

图2 相关限制因素图层
Fig. 2 Related exclusion layers

(4) 情景四：多中心模式，即限制旧城中心最大斑块的“摊大饼”式空间拓展趋势，而鼓励城市空间拓展时适度地形成多中心的城市化格局。在历史发展趋势下，模型中的散布系数、繁衍系数、蔓延系数等参数分别为1、21、76（表4），体现了主城区以旧城区为中心向四周蔓延式拓展的“摊大饼”式空间拓展形态。其中，散布系数控制模型随机选择新的城市化元胞，繁衍系数控制自发增长的城市元胞成为新的空间拓展中心，传播系数控制新的城市元胞在新旧城市拓展中心基础上的增长。因此，在模型中将散布系数、繁衍系数、蔓延系数分别设置为最大阈值的60%、60%和1%，以体现“多中心模式”的发展思路，引导城市空间格局和形态的调整。湖泊水面、水库水塘等限制因素图层参数设置为阈值的最大值。

(5) 情景五：情景二与情景三相结合的空间拓展模式，即同时考虑生态环境保护与城市发展管制两种情景。在模型中，参数数值按照情景二和三的参数模式进行合并调整。

(6) 情景六：情景二、情景三和情景四相结合空间拓展模式，即在生态环境保护与城

表 4 模型校正结果

Tab. 4 Statistics of each phase in model calibration

增长系数	粗校正		精校正		终校正		最佳参数获取		预测参数
	蒙特卡洛		蒙特卡洛		蒙特卡洛		蒙特卡洛		
	迭代次数=4		迭代次数=7		迭代次数=8		迭代次数=100		
	Leesallee		Leesallee		Leesallee				
	匹配=0.4005		匹配=0.4013		匹配=0.4012				
	范围	步长	范围	步长	范围	步长	范围	步长	
散布系数	0-100	25	0-20	5	1-10	1	1-1	1	1
繁衍系数	0-100	25	0-75	15	15-60	9	15-15	1	21
蔓延系数	0-100	25	40-60	5	53-57	1	55-55	1	76
坡度系数	0-100	25	50-75	5	60-75	3	75-75	1	1
道路权重系数	0-100	25	0-100	25	50-100	10	100-100	1	100
自修正规则参数	最低速度临界值=0.97		坡度敏感系数=0.1		道路权重敏感系数=0.01				
	最高速度临界值=1.30		坡度阈值=15		繁荣系数=1.01		萧条系数=0.9		

市发展管制下，鼓励城市空间拓展时形成多个中心的的城市化格局。在模型中，参数数值按照情景二、三和四的参数模式进行合并调整。

2.6 空间指数

空间指数来源于景观生态学中景观指数的概念^[45]，产生于20世纪80年代末，结合了信息论和分形几何中的方法^[46, 47]，在城市研究领域，常常被称之为“空间指数”。空间指数能在一个特定尺度和分辨率下定量描述城市建成区斑块、斑块类别间以及整个景观的空间特征和空间异质性^[48, 49]，提高城市地理模型模拟结果的解释度^[37, 45]。本文应用空间指数来评估6种政策情景预测的结果。在景观级别和地类级别选取了景观总面积（TA）来比较各种情景下的城市规模；斑块数目（NP）用于衡量景观的碎化程度；最大斑块指数（LPI）是优势度的一种度量，被用来衡量建设用地团聚为一个斑块的程度；聚集度（AI）用来衡量建设用地斑块整体的集聚程度；平均最邻近距离（ENN_MN）来度量城市开敞空间的大小与建设用地斑块之间的联系；周长面积分维度（PAFRAC）用来衡量建设用地景观的复杂程度与紧凑度，当PAFRAC值为1.5时，表示景观处于一种类似于布朗运动的不稳定状态。

3 结果与分析

3.1 城市空间拓展过程机制

城市空间拓展的过程机制通过应用过去时期城市空间拓展格局数据对SLEUTH模型校正进行探索。模型通过粗校正、精校正和终校正后，从生成的校正记录文件中选取Lee-Sallee指数最大的一组系数组合作为各系数的起始值和终止值，步长设定为1，采用100次蒙特卡洛迭代进行校正，获取预测参数（表4）。

模型所获取的最优预测参数组合显示昆明市主城区过去时期的城市空间具有典型的“摊大饼”式扩展形态，即城市建成区以旧城区为中心向四周蔓延式扩展的现象。值为100的道路权重系数体现了昆明市主城区的空间拓展受路网的影响特别显著；蔓延系数值为76、繁衍系数为21，反映出研究区内以旧的城市增长中心向四周扩展为主要特征；散布系数为1，表明自发增长在昆明市主城区的拓展过程中并不明显，研究区内并没有显著

形成许多新的发展中心；坡度阻抗系数值为1，表明昆明市主城区过去时期的城市空间拓展暂时并没有受到坡度的较大限制，这与昆明市主城区处于地势平坦的湖滨地区的实际情况以及蔓延扩展的城市动态相契合。

3.2 不同城市发展政策情景下的城市空间拓展格局

分别将6种政策情景模式对应的限制图层和参数融入模型校正后的系数值植入SLEUTH模型，以2008年昆明市土地利用/覆盖现状图为基础，以年度为时间尺度分别模拟预测了6种政策情景模式下未来20年的城市空间格局可能性分布（以2028年结果为例）（图3）。

以历史年份1974、1988、1998和2008年城市建成区分布图与6种政策情景模式下预测生成的2013、2018、2023、2028年的城市空间拓展格局可能性分布图所构成的长达55年的城市空间拓展格局时间序列为基础，应用空间指数景观总面积（TA）、斑块数目（NP）、最大斑块指数（LPI）、平均最邻近距离（ENN_MN）、聚集度（AI）和周长面积分维度（PAFRAC），对6种城市发展政策情景模式对城市未来空间格局的影响进行分析（图4）。其中，2009至2028年间的城市建成区空间格局以预测结果中转换为建设用地可能性大于90%的元胞为基础生成。目前，应用SLEUTH模型预测未来城市空间拓展格局分析的相关研究中较少涉及到对生成建设用地可能性阈值选择的讨论。Herold等在研究中将其设定为90%^[37]，Jantz将其设定为85%^[40]，Feng等将其设定为80%^[22]，但这些研究都没有说明阈值设定的依据，学者们多是根据“转化为建设用地可能性值越高的栅格未来转化为城镇建设用地的可能性越大”的原则设置这个阈值。基于以上考虑，本研究中选择转化为城镇建设用地可能性大于90%的栅格地域作为未来新的建成区，用于空间指数计算。

从图4可以看出，在分界点2008年处，6种政策情景模式下每个空间指数与未来的衍

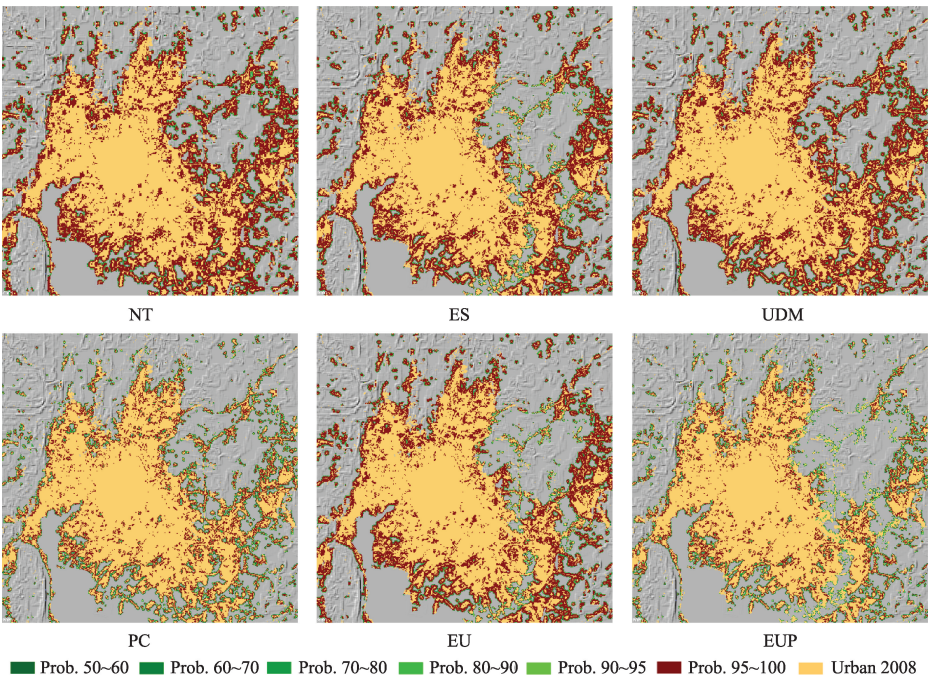


图3 6种政策情景下2028年建成区范围的可能性分布图

Fig. 3 Probability map of urban extent in 2028 under six policy contexts

接都比较自然,没有出现大的跳跃,而且在2008-2028年的4个时间阶段的变化趋势也大体一致,这表明SLEUTH模型在各种政策情景模式下的预测结果具备良好的时空一致性。空间指数的动态也从不同的角度反应了6种政策情景模式下昆明市未来20年的城市动态过程所具备的共同规律。建成区斑块面积指数TA的动态表明,在2008-2028年间昆明市建成区的空间拓展是必然的趋势,各种政策情景模式下建成区的总面积都有不同大小的增幅。斑块数目NP在各阶段的减小趋势与斑块间平均最邻近距离ENN_MN的升高趋势恰好

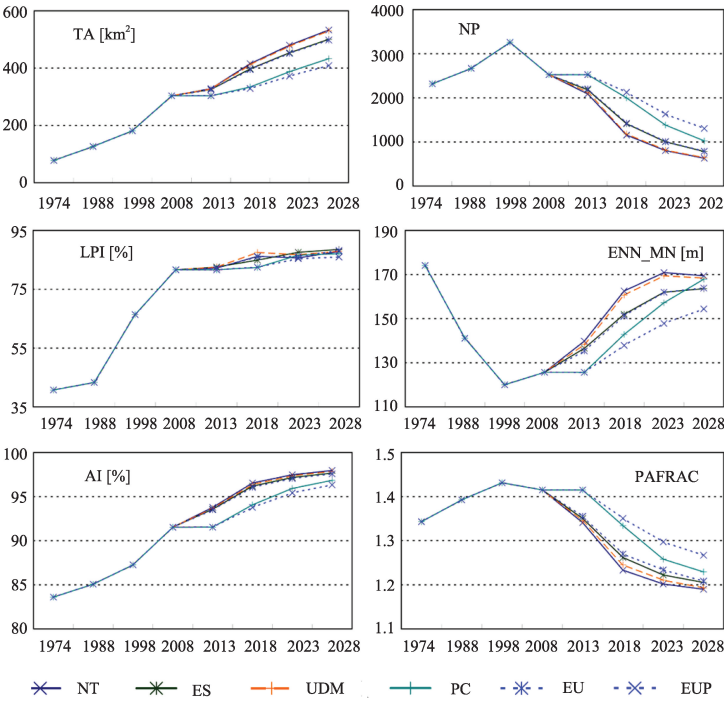


图4 6种政策情景模式下城市空间拓展格局的空间指数动态
Fig. 4 Dynamics of spatial metrics in six policy contexts

相反,说明在建成区斑块团聚的同时,研究区内开始保留了较大的城市开敞空间,这反映了昆明市未来城市空间发展的总特征。聚集度指数AI持续升高,也反映昆明市未来的城市扩展有团聚之势,且以填充式增长为主要特征。最大斑块指数LPI持续升高,说明昆明市主城区的空间拓展主要依附在原来的最大斑块之上,还是具有摊大饼式扩展的发展趋势。各政策情景模式下的周长面积分维度PAFRAC均呈下降趋势,表明建成区斑块的形状复杂度逐步降低,预示着昆明市未来的建成区呈紧凑型发展趋势。

空间指数在不同政策情景模式下未来20年城市空间格局之间也存在着较为显著的差异。比较斑块面积指数TA可以看出,自然增长情景一和城市发展管制情景三下未来建成区扩展的面积最大,和历史时期城市增长的速度基本一致,仍然保持了高速增长的势头,大量占用了其他用地类型。多政策综合的情景六模式下建成区增加的面积最少,多中心模式情景四次之,两者对城市周边其他用地类型的占用都保持了较为理智的克制。其它两种情景下建成区面积也有较大的增幅。但情景六和四模式下建成区斑块数目NP较其它四种情景模式较大,表现出较强的散布式城市空间格局。其他四种情景模式则表现出较为聚集的城市空间格局,特别是情景一和三最为突出。聚集度指数AI也表现出相似的特征。由于情景一和三城市空间格局较为聚集,其建成区斑块间平均最邻近距离ENN_MN也较高,但到2023年达到最大值,之后略微降低。情景六的ENN_MN值则一直在增加,但增幅较小。情景四的ENN_MN值直线上升,至2028年接近于情景一和三的值。这6种政策情景模式下建成区最大斑块指数LPI变化的特征较为接近,没有表现出明显的差异。情景六的建成区周长面积分维度PAFRAC值较其他五种情景模式降低得最少,表明该情景下形状复杂度还有一定的降低空间,相比其他政策情景模式建成区还具有较大的发展空间。

3.3 不同情景模式对滇池湖滨地区的影响评价

为了了解在相似的城市扩展趋势下不同的政策情景是否对滇池湖泊生态系统的保护有着不同的意义，本文定义了环绕滇池湖岸距离为 3 km 的湖滨缓冲区（图 5），应用 6 个空间指数（两两构成散布图）对不同政策情景模式下湖滨缓冲区内未来 20 年建成区的空间形态进行了分析（图 6）。

从图 6a 中可以看出，自然增长趋势情景一下的城市空间拓展在滇池湖滨地区占用了最多的土地资源，且建成区斑块的数目减少得最多，这和整体景观的发展趋势一致。根据是否鼓励城市的多中心发展，其他 5 个情景模式可以被区分为两组，即 EUP、PC 组与 EU、ES、UDM 组。在鼓励多中心发展的政策模式下（PC 与 EUP 组），建成区斑块虽然较其他 3 种情景模式较少（即建成区空间格局较散布），但在缓冲区内占用其他土地利用类型的面积较少，节省了更多的土地资源。

图 6b 反映出不同政策下缓冲区内建成区斑块间的最大斑块面积指数 LPI 与平均最邻近距离 ENN_MN 都呈增大的趋势，说明在未来 20 年的城市空间拓展过程中，缓冲区内依附于原城市建成区向四周扩展的“摊大饼”式增长仍占据主导地位。同时，各种政策情景下，城市空间拓展过程中湖滨地区的建成区斑块之间的开敞空间也呈扩大趋势。生态环境保护和城市发展管制政策情景 EU 下建成区斑块之间保持着较为紧密的联系，有利于城市公共服务设施的共享与城市垃圾的集中处理。

图 6c 中反应不同情景下缓冲区内建成区景观的集聚度 AI 均呈增大趋势，周长面积分维度 PAFRAC 均呈下降趋势。从周长面积分形维 PAFRAC 的减幅来看，鼓励多中心的情景模式 PC 和 EUP 与情景模式 UDM、ES、EU 相近，表现出湖滨地区的建设用地也呈紧凑式发展，其中政策情景 EU 下最为紧凑；但湖滨地区的建设用地在鼓励多中心的政策 PC 与 EUP 相比其他政策具有更低的集聚度，即更倾向于蔓延式扩展，这样的景观格局不利于滇池

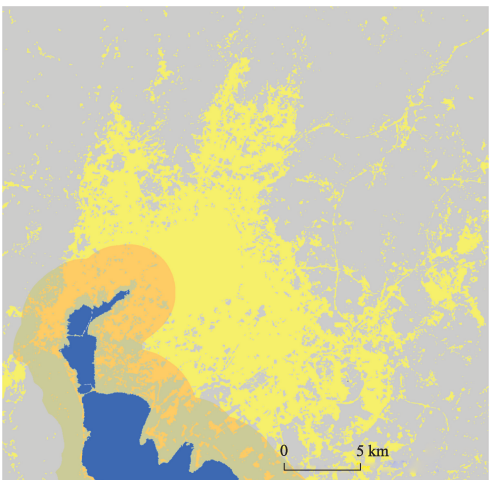


图 5 滇池湖滨 3 km 缓冲区

Fig.5 A 3-km buffer of Lake Dianchi in the study area

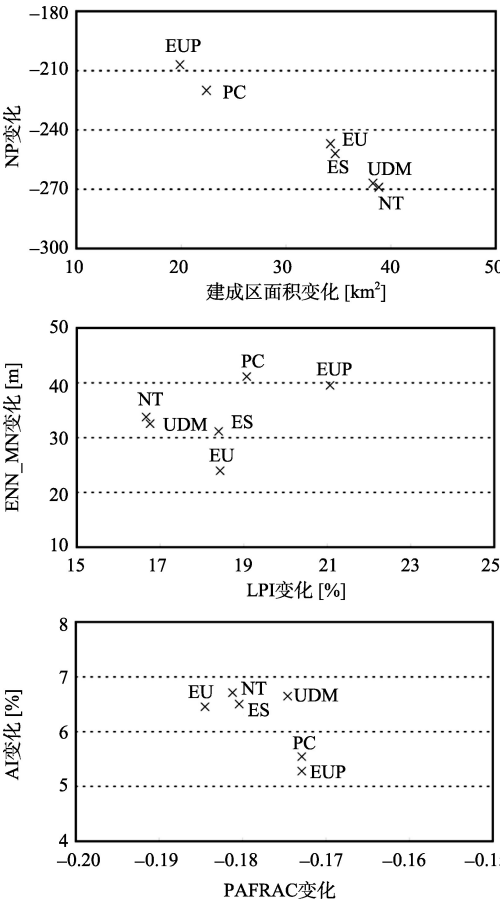


图 6 湖滨缓冲区内建成区空间指数动态：2008-2028

Fig. 6 Dynamics of the spatial metrics in the buffer from 2008 to 2028

湖泊水质的保护。

深入了解 6 种政策情景下湖滨地区 3 km 缓冲带内 2008-2028 年间城市扩展对不同地类的占用情况，有助于根据不同地类的占用情况，为湖滨地区制定合适的保护措施（图 7）。

城市建设用地的扩展一般会受坡度条件的限制，这在滇池的湖滨地区也有显著体现。从图 7 中可以看出，农用地显然是湖滨 3 km 缓冲区内城市扩展最主要的用地来源，湖滨地区城市建设用地对荒草地、裸地、林地的占用则较少。6 种政策情景中，支持多中心发展模式的政策 PC 与 EUP 因蔓延系数减半，限制了建设用地沿旧的城市化像元向外的扩展趋势，明显缓解了建设用地对农用地的占用趋势；在其他 4 个政策情景模式中，自然增长情景模式 NT 占用最多的农用地，生态可持续与城市发展管制相结合的情景 EU 占用农用地相对较少。可见，实行不同的土地利用管理政策对湖滨地区的城市形态有不同的影响。如果不实行严格的景观保护政策，湖滨地区的农用地势必会在未来的城市扩展过程中被大面积占用。

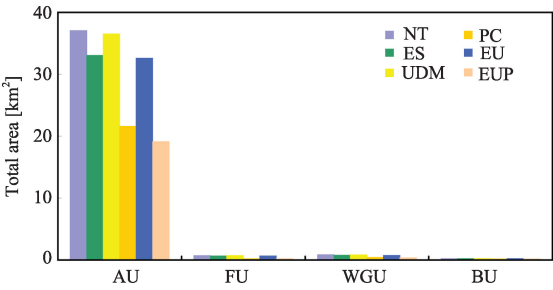


图 7 6 种政策情景下 3 km 缓冲区内城市建设用地

占地类统计图

Fig. 7 Total area of each land use converted to Urban under six policy contexts

注：AU-Agricultural to Urban, FU-Forest to Urban, WGU-Wild grassland to Urban, BU-Bare land to Urban

4 结论

（1）改革开放以来，昆明市的城市空间格局具有典型的“摊大饼”式扩展模式，即城市建成区以旧城区为中心向四周呈现蔓延式扩展的现象。城市道路网对城市形态具有重要的影响。

（2）昆明市未来的城市建设用地空间格局总体上呈集约、紧凑型的发展趋势，同时保留了较大的城市开敞空间，但主城区建设用地的最大斑块仍有着“摊大饼”式扩展趋势。

（3）6 个政策情景中生态环境保护与城市发展管制相结合的政策对滇池湖滨地区的影响最小，其对于湖滨地区城市规模、建设用地斑块数目、城市的“摊大饼”式扩展等的控制起到中等程度的效果，保证了适度的城市开敞空间，并最有效地维系湖滨地区建设用地斑块之间的联系，有利于城市公共基础设施的共享与城市垃圾的集中处理。该情景下缓冲区内内的建设用地景观也具有最好的紧凑度。

（4）鼓励多中心城市发展格局的政策和生态环境保护与城市发展管制下的多中心发展模式对城市总体规模的控制具有明显的效果，但是多中心发展模式下湖滨地区存在更多的建设用地斑块数目，其分布也更为分散，这样的建设用地景观格局不利于湖滨地区敏感的农用地景观的生态稳定性，也不利于滇池湖泊水质的保护。

基于以上结论，对昆明市未来城市空间发展提出如下两点政策建议：① 滇池湖滨需要划定景观或生态保护区，严格禁止城市建设用地对湖滨用地景观的占用与分割；② 滇池湖滨以外的区域，适宜执行生态保护与城市管制下的多中心发展模式，辅以旧城的改造与更新，限制主城区建设用地斑块的“摊大饼”式扩展。

本研究验证了遥感、GIS 技术支持下地理模拟系统在研究和制定适宜于西部高原湖滨

城市空间拓展政策决策支持中的实践应用价值。但城市空间拓展政策决策是一个复杂的过程,还涉及人口、经济、社会、文化等多方面的影响,如何将这些因素成功地融入地理模拟系统还是一个较大的挑战,需要更为深入的探索。另外,如何评估不同情景模式下城市空间拓展形态对生态服务功能的占用和湖泊水环境的影响也是下一阶段重要的研究议题。

参考文献(References)

- [1] 国家统计局国民经济综合统计司. 新中国六十年统计资料汇编. 北京: 中国统计出版社. 2010. [Department of overall statistics of national economy, National Bureau of Statistics of The People's Republic of China. Compilation of Statistic data of China from 1949. Beijing: China Statistics Press, 2010.]
- [2] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴—2011. 北京: 中国统计出版社. 2011. [National Bureau of Statistics of The People's Republic of China. China Statistical Yearbook-2011. Beijing: China Statistics Press, 2011.]
- [3] 曹桂英, 任强. 未来全国和不同区域人口城镇化水平预测. 人口与经济, 2005, (4): 51-56. [Cao Guiying, Ren Qiang. The national and regional urbanization projection for China. Population and Economics, 2005, (4): 51-56.]
- [4] 陆大道, 姚士谋, 李国平, 等. 基于我国国情的城镇化过程综合分析. 经济地理, 2007, 27(6): 883-887. [Lu Dadao, Yao Shimou, Li Guoping et al. Comprehensive analysis of the urbanization process based on China's conditions. Economic Geography, 2007, 27(6): 883-887.]
- [5] 刘纪远, 张增祥, 许新良, 等. 21 世纪初中国土地利用变化的空间格局与驱动力分析. 地理学报, 2009, 64(12): 1411-1420. [Liu Jiyuan, Zhang Zengxiang, Xu Xinliang et al. Spatial patterns and driving forces of land use change in China in the early 21st century. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(12): 1411-1420.]
- [6] Zhang K, Zhao Y, Zhang H. Monitoring land use/land cover changes of Kunming City based on remote sensing technology and spatial metrics. In: IEEE Proceedings of the 20th International Conference on Geoinformatics, Hongkong: IEEE, 2012: 1-5.
- [7] Zhao Y, Zhang K, Fu Y et al. Examining land-use/land-cover change in the Lake Dianchi watershed of the Yunnan-Guizhou Plateau of Southwest China with remote sensing and GIS techniques: 1974-2008. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2012, 9(11): 3843-3865.
- [8] Zhang H, Li H, Chen Z. Analysis of land use dynamic change and its impact on the water environment in Yunnan Plateau lake area: a case study of the Dianchi Lake drainage area. Procedia Environmental Sciences, 2011, 10(Part C): 2709-2717.
- [9] Wang J, Chen Y, Shao X et al. Land-use changes and policy dimension driving forces in China: Present, trend and future. Land Use Policy, 2011, 29(4): 737-749.
- [10] Ding C. Land policy reform in China: Assessment and prospects. Land Use Policy, 2003, 20(2): 109-120.
- [11] Miyazawa M. Enactment of city planning law and urban land use planning. City Planning Review, 1978, 104: 16-21.
- [12] Kaiser E J, Godschalk D R, Chapin F S, Jr. Urban Land Use Planning. 4th ed. Urbana and Chicago: University of Illinois Press, 1995.
- [13] 赵正国. 科学的不确定性与我国公共政策决策机制的改进. 山东科技大学学报 (社会科学版), 2011, 13(6): 32-41. [Zhao Zhengguo. On the improvement of public policy decision-making mechanism in China in light of scientific uncertainty. Journal of Shandong University of Science and Technology (Social Sciences), 2011, 13(6): 32-41.]
- [14] Lindgren M, Bandhold H. Scenario Planning: The Link between Future and Strategy. New York: Palgrave Macmillan, 2003.
- [15] Xiang W-N, Clarke K C. The use of scenarios in land-use planning. Environment and Planning B: Planning and Design, 2003, 30: 885-909.
- [16] Petrov L O, Lavallo C, Kasanko M. Urban land use scenarios for a tourist region in Europe: Applying the MOLAND model to Algarve, Portugal. Landscape and Urban Planning, 2009, 92(1): 10-23.
- [17] Zhang Q, Ban Y, Liu J et al. Simulation and analysis of urban growth scenarios for the Greater Shanghai Area, China. Computers, Environment and Urban Systems, 2011, 35(2): 126-139.
- [18] Thapa R B, Murayama Y. Scenario based urban growth allocation in Kathmandu Valley, Nepal. Landscape and Urban Planning, 2012, 105(1-2): 140-148.
- [19] Vaz E d N, Nijkamp P, Painho M et al. A multi-scenario forecast of urban change: A study on urban growth in the Algarve. Landscape and Urban Planning, 2012, 104(2): 201-211.
- [20] Oana P L, Harutyun S, Brendan W et al. Scenarios and indicators supporting urban regional planning. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 2011, 21: 243-252.
- [21] Vermeiren K, Van Rompaey A, Loopmans M et al. Urban growth of Kampala, Uganda: Pattern analysis and scenario

- development. *Landscape and Urban Planning*, 2012, 106(2): 199-206.
- [22] Feng H-H, Liu H-P, Lv Y. Scenario Prediction and Analysis of Urban Growth Using SLEUTH Model. *Pedosphere*, 2012, 22(2): 206-216.
- [23] He C, Okada N, Zhang Q et al. Modeling urban expansion scenarios by coupling cellular automata model and system dynamic model in Beijing, China. *Applied Geography*, 2006, 26(3-4): 323-345.
- [24] Hosseinali F, Alesheikh A A, Nourian F. Agent-based modeling of urban land-use development, case study: Simulating future scenarios of Qazvin city. *Cities*, 2013, 31: 105-113.
- [25] 单玉红, 朱欣焰. 基于多主体行为决策的城市居住用地利用效用情景分析. *自然资源学报*, 2011, 26(11): 1832-1841. [Shan Yuhong, Zhu Xinyan. Scenario analysis of urban residential land use utility based on multi-agents' spatial decision. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(11): 1832-1841.]
- [26] 欧金明, 王如松, 阳文锐, 等. 基于CA的城市形态扩展多解模拟: 以北京市东部平原区情景分析为例. *城市环境与城市生态*, 2007, 20(1): 5-8. [Ou Jinming, Wang Rusong, Yang Wenrui et al. Alternative future of urban form growing simulation basing on CA model - the scenario analysis of eastern plain area in Beijing. *Urban Environment and Urban Ecology*, 2007, 20(1): 5-8.]
- [27] 龙瀛, 沈振江, 毛其智, 等. 基于约束性CA方法的北京城市形态情景分析. *地理学报*, 2010, 65(6): 643-655. [Long Ying, Shen Zhenjiang, Mao Qizhi et al. Form scenario analysis using constrained Cellular Automata. *Acta Geographic Sinica*, 2010, 65(6): 643-655.]
- [28] 昆明市统计局. 昆明统计年鉴. 北京: 中国统计出版社. 2009. [Bureau of Statistics of Kunming. *Kunming Statistical Yearbook*. Beijing: China Statistics Press, 2009.]
- [29] Chen Y, Yang H, Zhang Z et al. Application of equilibrium partitioning approach to the derivation of sediment quality guidelines for metals in Dianchi Lake. *Pedosphere*, 2007, 17(3): 284-294.
- [30] Wang K, Liu Y D, Li D H. Biosorption of copper by cyanobacterial bloom-derived biomass harvested from the eutrophic Lake Dianchi in China. *Current Microbiology*, 2010, 61(4): 340-345.
- [31] 祐元蒙. 滇池富营养化现状、趋势及其综合防治对策. *云南环境科学*, 2002, (1): 35-38. [Tuo Yuanmeng. Eutrophication of Dianchi and its trend and treatment. *Yunnan Environmental Science*, 2002, (1): 35-38.]
- [32] 孙鸿雁, 周红斌. 滇池流域生态环境现状及保护对策探讨. *林业建设*, 2010, (2): 45-48. [Sun Hongyan, Zhou Hongbin. Discussion on the status of ecology and protection countermeasure in the Dianchi Watershed. *Forestry Construction*, 2010, (2): 45-48.]
- [33] 罗民波, 段昌群, 沈新强, 等. 滇池水环境退化与区域内物种多样性的丧失. *海洋渔业*, 2006, 28(1): 71-78. [Luo Minbo, Duan Changqun, Shen Xinqiang et al. Environmental degradation and loss of species diversity in Dianchi Lake. *Marine Fisheries*, 2006, 28(1): 71-78.]
- [34] 袁国林, 贺彬. 滇池流域地理特征对滇池水污染的影响研究. *环境科学导刊*, 2008, 27(5): 21-23. [Yuan Guolin, He Bin. Impact of geographical character on water pollution in Dianchi Lake Basin. *Environmental Science Survey*, 2008, 27(5): 21-23.]
- [35] Clarke K C, Hoppen S, Gaydos L. A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area. *Environment and Planning B*, 1997, 24: 247-261.
- [36] Silva E A, Clarke K C. Calibration of the SLEUTH urban growth model for Lisbon and Porto, Portugal. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2002, 26(6): 525-552.
- [37] Herold M, Goldstein N C, Clarke K C. The spatiotemporal form of urban growth: measurement, analysis and modeling. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86(3): 286-302.
- [38] Clarke K C, Gaydos L J. Loose-coupling a cellular automaton model and GIS: Long-term urban growth prediction for San Francisco and Washington/Baltimore. *International Journal of Geographical Information Science*, 1998, 12: 699-714.
- [39] Dietzel C, Clarke K C. Towards optimal calibration of the SLEUTH land use change model. *Transactions in GIS*, 2007, 11(1): 29-45.
- [40] Jantz C A, Goetz S J. Analysis of scale dependencies in an urban land-use-change model. *International Journal of Geographical Information Science*, 2005, 19(2): 217-241.
- [41] Yang X, Lo C. Modeling urban growth and landscape changes in the Atlanta metropolitan area. *International Journal of Geographical Information Science*, 2003, 17: 463-488.
- [42] LEE D R, Sallee G T. A method of measuring shape. *Geographical Review*, 1970, 60(4): 555-563.
- [43] Clarke K C. A decade of cellular urban modeling with SLEUTH: Unresolved issues and problems. In: *Planning Support Systems for Cities and Regions*, R K Brail (Ed.), Cambridge: Lincoln Institute of Land Policy, 2008: 47-60.
- [44] 鲍家伟. 城镇化推进中的土地文章: 云南省嵩明县全域城镇化调查. *中国土地*, 2011, (4): 54-56. [Bao Jiawei. Land in the process of urbanization-investigation on global urbanization of Songming county, Yunnan province. *China Land*, 2011, (4): 54-56.]

- [45] Herold M, Couclelis H, Clarke K C. The role of spatial metrics in the analysis and modeling of urban land use change. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2005, 29(4): 369-399.
- [46] Shannon C, Weaver W. *The Mathematical Theory of Communication*. Urbana: University of Illinois Press, 1964.
- [47] Mendelbrot B B. *The Fractal Geometry of Nature*. New York: W.H. Freeman and Company, 1983.
- [48] McGarigal K, Cushman S A, Neel M C et al. 2002, Spatial pattern analysis program for categorical maps. Available online at: <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html> (accessed 2nd June 2007).
- [49] Gustafson E J. Quantifying landscape spatial pattern: What is the state of the art? *Ecosystems*, 1998, 1(2): 143-156.

Scenario analysis of urban growth in Kunming based on geosimulation system

ZHAO Yaolong¹, ZHANG Ke¹, PENG Yongjun¹, FU Yingchun¹, ZHANG Hong²

(1. School of Geography, South China Normal University, Guangzhou 510631, China;

2. School of Urban and Environmental Studies, Yunnan University of Finance and Economics,
Kunming 650221, China)

Abstract: Cities in the lake watershed on the plateau of western China have experienced a rapid urbanization process and greatly changed land-use/land-cover since 1978 when China started the reform and opening up policy. The great land-use/land-cover change (LULCC) brought serious ecosystem and environmental problems to the lake watershed. Regional and urban development policies should be adjusted to improve human-friendly ecosystem and environment. This paper uses LULCC data derived from remote sensing images to calibrate geosimulation system for grasping the mechanism of LULCC in a case study of Kunming city in the Lake Dianchi watershed of Yunnan-Guizhou Plateau. Six kinds of urban development policies are set to forecast land-use/land-cover pattern of Kunming through calibrated geosimulation system. Spatial metrics and spatial analysis methods are adopted to assess the impact of policies scenarios on the Lake Dianchi watershed. The results show that LULCC in Kunming city was characterized by typical urban sprawl since 1974. Urban road network played an important role in land-use/land-cover pattern. Urban landscape of Kunming in the future shows a characteristic of intensive and compact development trend. The integrated policy scenario of environmental protection and urban development control has positive impact on the watershed. The policy also advantages the share of urban public facilities and concentrated process of urban garbage. When the integrated policy scenario of multi-centers and urban development control has notable effect on urban size control, the policy is not appropriate in the near shore area of Lake Dianchi. Landscape preservation area should be set in the near shore area of Lake Dianchi to prohibit the transformation of agricultural land to urban built-up area. The integrated policy of environmental protection and urban development control should be carried out in the area except the near shore of Lake Dianchi.

Key words: geosimulation system; urban growth; scenario analysis; SLEUTH model; spatial metrics