

引用格式: 杨小艳, 凌宇, 李龙, 等. 基于最坏情景理论的连云港土地利用变化情景模拟[J]. 资源科学, 2019, 41(6): 1082-1092.
[Yang X Y, Ling Y, Li L, et al. Worst case scenario-based methodology for simulating land-use change in coastal city in China: A case study of Lianyungang[J]. Resources Science, 2019, 41(6): 1082-1092.] DOI :10.18402/resci.2019.06.07

基于最坏情景理论的连云港土地利用变化情景模拟

杨小艳¹, 凌宇³, 李龙², 陈龙高¹, 陈龙乾²

(1. 江苏师范大学地理测绘与城乡规划学院, 徐州 221116; 2. 中国矿业大学环境与测绘学院, 徐州 221116; 3. 江苏省土地开发整理中心, 南京 210024)

摘要: 预测和模拟土地利用情景变化对于进一步评估土地利用变化的生态环境影响以及优化土地利用规划方案具有重要作用。本文基于最坏情景理论, 以基于人工神经网络(ANN)和元胞自动机(CA)的FLUS模型为支持, 模拟了最坏情景模式(WSB)和非最坏情景模式下(NWSB)的沿海城市连云港2020年土地利用变化。结果表明: ①基于生态因子耐受度测算得出研究区最坏情景区域共计489.67 km², 该区域主要包括连云港中部云台山国家自然保护区内海拔较高、坡度较大、分布大量天然林地的区域以及重要的河流湖泊水库等生态水体; ②两种情景模式下城镇用地均有较大程度的扩张, 在WSB情景下城镇用地扩张避开了最坏情景区域; ③由于村庄的存量利用率较高, 因此在WSB模式下对于耕地的占用相对较小, 表明该模式下可在一定程度上减少村庄建设对耕地的占用, 从而提高了存量建设用地的使用效率; ④由于最坏情景区域的约束和限制转化作用, 城镇用地扩张在WSB模式下不得不占用更多的耕地, 从而对耕地保护工作提出了更高的要求。基于最坏情景理论进行土地利用变化模拟对于生态环境保护及区域可持续发展具有重要的支撑作用, 因而既可为区域土地规划和管理提供支持, 也可其他地区土地利用模拟提供参考和借鉴。

关键词: 最坏情景理论; 生态因子耐受度; 土地利用变化; 情景模拟; 连云港

DOI :10.18402/resci.2019.06.07

1 引言

土地利用变化因其对区域乃至全球生态系统和环境的影响一直是科学研究的重点领域^[1-4]。从区域尺度来看, 预测和模拟土地利用变化对于土地利用环境影响评估及土地利用规划方案优化等具有重要作用^[5,6]。因此, 国内外众多学者对土地利用变化模拟与预测开展了广泛深入的研究。研究内容涉及土地利用变化的驱动机理与约束机制、土地利用变化模拟模型等方面, 还包括不同尺度、区域以及不同主导土地利用类型区的实证研究, 并取得

了较为理想的成果。

在驱动机理与约束机制方面, 主要从自然和社会两大角度研究了不同驱动与限制因素对土地利用变化的引导与约束作用, 从而为土地利用变化模拟预测提供了理论基础。在模拟方法方面既包括传统的基于统计和系统分析的模拟方法, 也有基于空间与数学模型的模拟方法。随着计算机与GIS技术的发展, 很多学者尝试将多种方法与GIS技术相结合预测土地利用时空变化, 如基于人工神经网络(Artificial Neural Nets, ANN)和元胞自动机(Cel-

收稿日期: 2018-10-17, 修订日期: 2019-02-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41601087); 江苏高校优势学科建设工程资助项目; 江苏高校人文社会科学校外研究基地(特色镇村建设与土地管理研究基地)项目。

作者简介: 杨小艳, 女, 四川简阳人, 副教授, 博士, 研究方向为土地利用及规划。E-mail: yangxy0705@163.com

通讯作者: 陈龙高, 男, 安徽宿州人, 教授, 博士, 研究方向为土地利用及规划。E-mail: chenlonggao@163.com

2019年6月

lular Automata, CA)^[7,8]、基于CA-Markov模型^[5,8]、基于系统动力学模型(System dynamics, SD)和CLUE-S^[9]、基于多智能体和CA^[10]的土地利用模拟模型等,均可有效地模拟土地利用的时空变化。在模拟情景设定方面,大量研究多基于政策目标设置^[11,12]或自然生态等条件的限制^[5,13,14]进行设定,设定情景时多根据某一目标确定一种或几种模式,如生态优先、经济发展优先等,缺乏理论支撑。土地利用不当不仅可能对生态环境产生一定不利影响,导致生态灾难和环境严重污染事件等,甚至可能造成严重人财损失^[15]。情景设定时若不采用科学合理的方法,充分考虑土地利用的极端不利影响,可能导致模拟的结果对于区域相关政策的制定起不到有效的参考作用。

McCready^[16]将最坏情景定义为规则或政策制定者在既定情景下合理产生的最严重的后果。最坏情景的设定需满足两个条件:首先,最严重后果的发生必须满足情景的客观存在性,即不能设定不具备可能性的情景;其次,这种最严重后果的发生具有合理性和可能性。对于土地利用而言:土地利用布局优化和调整具有客观存在性,不合理的土地利用方式导致严重的人财伤亡损失或生态风险具有合理性和可能性。因此,将最坏情景理论应用于土地利用管理领域^[17,18],可有效地避免因土地利用不合理而可能出现的人财损失或生态风险。

沿海地区土地利用变化剧烈,生态环境对土地利用变化的响应明显,对人类的环境安全和生存质量产生严重影响。本文依据最坏情景理论,以基于ANN-Cellular Automata, CA的FLUS模型为支持,分别开展了最坏情景模式(Worst-case Scenario Based model, WSB)和非最坏情景模式下(Non-WSB, NWSB)的连云港土地利用变化模拟和预测,以便提出一种科学可行并具有实际意义的情景设定方法,从而使模拟的结果能为区域土地利用规划及管理提供具有实际意义的支持,并为其他地区开展此类工作提供参考。

2 研究方法与技术流程

2.1 基于土地利用生态因子耐受度的最坏情景区域测算

生态因子耐受度为区域某一生态因子对外部干扰的容忍程度,对土地利用活动而言,当某种土

地利用方式因生态因子限制而出现严重的人财损失或者导致区域生态风险增加,从而有可能出现重大的生态环境灾难时,即认为该土地利用方式超出了生态因子的耐受程度。生态因子对该土地利用类型的耐受程度即为土地利用生态因子耐受度(Land-use Ecological Tolerance Index, LETI)^[15]。

可利用LETI开展最坏情景区域的测算。LETI计算的关键在于确定生态因子的耐受区间以及最优指标值/区间,某一评价单元的生态因子指标值距离最优指标值/区间越远,其耐受度越差。如超出了其对于某一土地利用类型的耐受区间时,即表明该区域不能容忍相应的土地利用类型,可能会产生严重的人财损失或生态风险。据此,LETI以该生态因子的指标值与该土地利用类型最优指标值/区间的距离 d_{ji} 表示。对于最优区间型生态因子 i 而言,某一土地利用类型 j 关于该生态因子的耐受度可采用下式测算:

$$\begin{cases} LETI_{ji} = \frac{x-a}{a_0-a} \times 100 & a < x < a_0 \\ LETI_{ji} = \frac{b-x}{b-b_0} \times 100 & b_0 < x < b \\ LETI_{ji} = \frac{x-a}{b-a} \times 100 \text{ or } \frac{b-x}{b-a} \times 100 & x < a \text{ or } x > b \\ LETI_{ji} = \frac{\frac{(b_0-a_0)}{2} - \left| x - \frac{(a_0+b_0)}{2} \right|}{b_0-a_0} \times 100 & x \in (a_0, b_0) \end{cases}$$

式中: (a, b) 为该生态因子关于土地利用类型 j 的耐受度范围, (a_0, b_0) 为相应的最优区间, x 为该生态因子具体指标值。对于最优值型(其最优值为 x_0)生态因子,耐受度计算公式为:

$$\begin{cases} LETI_{ji} = \frac{x-a}{x_0-a} \times 100 & a < x \leq x_0 \\ LETI_{ji} = \frac{b-x}{b-x_0} \times 100 & x_0 \leq x < b \\ LETI_{ji} = \frac{x-a}{b-a} \times 100 \text{ or } \frac{b-x}{b-a} \times 100 & x < a \text{ or } x > b \end{cases}$$

若某一生态因子值为次序或等级变量,如等级越大生态风险越大,则可用下式测算:

$$LETI_{ji} = \frac{n-m}{n} \times 100$$

式中: m 为该生态因子具体等级, n 为生态因子等级数量。由上述公式可知,当 $LETI_{ji}$ 值小于等于0时,即可认为该土地利用类型超出了生态因子 i 对其的耐受度范围。上述LETI测算公式主要基于物元可拓理论中的距离测算方法设计,该方法具有直观易

理解的特点,并能测算出基于区间的距离^[19,20],可以满足LETI关于区间距离测算的需要。

2.2 基于最坏情景理论的土地利用变化模拟技术流程

基于最坏情景理论的土地利用变化模拟主要包括基础数据处理、最坏情景区域确定、ANN测算适宜性概率、模型校准与检验、WSB和NWSB情景下的土地利用变化模拟预测等方面,具体实现过程见图1。

3 实证应用

3.1 研究区概况与基础数据收集处理

连云港是江苏重要的沿海城市之一,土地总面积7500 km²。土地利用类型中既包括常见的城镇、村庄、耕地、林地、水域等类型,也包括具有沿海特色的滩涂与盐田类型。此外,连云港还进行了大量的围海造地活动,为城市发展拓展了大量的空间。

本文收集获取了以下数据用于连云港市土地利用变化模拟:研究区2005及2010年度土地利用数据,数据来源于当地国土资源部门;地形地势数

据(采用地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>)下载并经过修正后的30 m分辨率ASTER GDEM第2版(GDEM2)数据^[21,22]);自然保护与风景名胜区核心保护区域、水源地保护核心区域、洪水调蓄区域、清水通道维护区域、重要生态湿地区域等数据;崩塌、滑坡、地面沉降等地质灾害数据,数据来源于当地环境保护部门;人口与经济数据来源于连云港2001—2017年统计年鉴^[23],土壤数据来源于中国科学院南京土壤所、交通用地及高速公路数据来源于当地交通与规划部门。

数据预处理工作包括以下步骤:首先,统一研究区内的数学基础,统一采用基于通用横轴墨卡托50N投影的WGS84坐标系统和EGM96高程基准;通过坐标变换与几何校正及配准实现相关数据的配准处理,对于栅格数据,采用图像对图像模式的配准处理,配准精度控制在0.5个像素以内,矢量数据则通过几何校正进行配准;采用数据格式转换和重采样方法分别对矢量和栅格数据进行处理,从而生成200 m分辨率的栅格数据(由于连云港市域面积达到7000多km²,该分辨率可以满足本课题研究的需要);最后,将有关数据导入地理空间数据库。数据预处理工作主要在ArcGIS平台上实现。

3.2 最坏情景区域确定

3.2.1 生态限制因子确定与土地利用类型划分

地质灾害通常是土地利用的主要限制因素,连云港地质灾害类型主要包括崩塌、滑坡、地面塌陷、地面沉降和特殊类岩土(软土)灾害;高程、坡度等地形地势因素也会对土地利用具有很强的限制作用;此外,饮用水源地、泄洪通道等对于人类安全具有重要保障作用,大面积水域、林地及自然保护区等则为生物提供重要的栖息地。在上述区域安排不合理的土地利用类型一旦超出耐受程度极易出现严重的人财损失或生态风险。基于此,本文确定了研究区土地利用的生态限制因素主要包括:地形地势(以高程和坡度因子表征)、地质灾害(以崩塌滑坡、地面沉降及软土灾害指标表征)、生物多样性(由生态湿地与水体、自然保护区及森林因子指标表征)、人类安全(由饮用水源地、洪水调蓄及清水通道维护因子指标表征)。

土地利用类型主要以现行土地利用分类标准并适当考虑研究区特点和土地利用生态环境作用

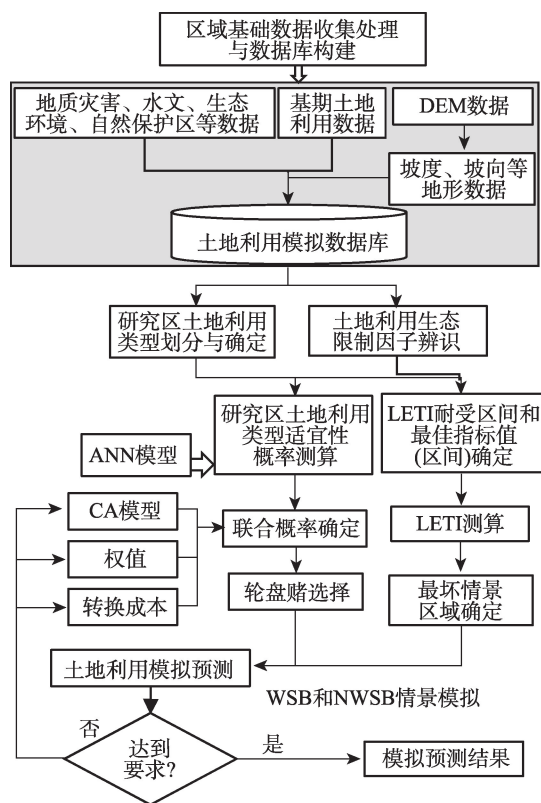


图1 基于最坏情景土地利用变化情景模拟流程

Figure 1 Framework for the worst case scenario-based land-use change simulation

2019年6月

为基础划分为:耕地、园地、林地、城镇、村庄、海域、河湖库(包括河流湖泊水库等永久性水域)、其他水体、滩涂、盐田。

3.2.2 耐受区间和最佳指标值(区间)确定

依据相关成果、技术标准^[24-27]等,确定不同生态因子对任一土地利用类型的耐受度区间以及最优指标值/区间(表1)。

坡度过大易产生水土流失风险或者增加工程施工难度,但是地形过于平坦也会导致雨水自流灌排困难,需采用额外方式加以处理,从而增加工程施工成本。中国土地利用现状调查技术规程、退耕还林政策以及相关研究也确定了耕地坡度应小于25°,其中最适宜坡度小于3°。据此这里确定了耕地坡度因子的耐受度区间为0~25°;建设用地耐受度区间则依据城市用地竖向规划规范^[24](CJJ 83-1999)和相关研究成果确定为1~15°;园地坡度耐受度区间通过咨询专家和当地技术人员确定为0~35°;林地对坡度并无特殊要求,这里确定坡度耐受度区间为0~90°;基于区域灌溉和排水的要求,并参照耕地坡度适宜性等级的相关规定,各土地利用类型的坡度最优区间统一确定为1~3°。

研究区高程指标因子根据研究区地势特点、洪涝灾害风险以及相关研究成果^[28-30]综合确定:连云港高程最高为625 m,平均高程仅2.5 m,其中现状建设用地的高程最大值为228 m,四分位差为2~26 m

之间,表明50%的建设用地布局于高程2~26 m之间。由于现状建设用地体现了基于现实的建设用地布局选择,考虑到连云港地区特殊低海拔地形和现状建设用地高程分布特征,这里最终确定建设用地高程因子耐受度区间和最优区间分别为0~228 m和0~26 m;基于上述原则,同样确定了耕地高程因子耐受度区间和最优区间。林地和园地对于高程通常无特殊要求,故耐受度区间为研究区高程值范围。

其他因子则根据研究区不同级别管制标准确定耐受度区间和最优指标。需要指出:由于海域、河湖库、其他水域、滩涂多具有不同程度的生态功能,因此其布局区域并不受生态限制因素的影响。此外,连云港虽然有大量盐田,但已基本废弃,生态因子对废弃盐田的限制作用也可以忽略。所以这里重点确定了耕地、园地、林地、城镇、村庄等土地利用类型的生态因子耐受区间和最优区间。

3.2.3 LETI耐受度测算

应用上文公式测算出每一生态因子对不同土地利用类型的LETI值。由于任意一种土地利用方式一旦超出生态因子耐受程度均有可能导致严重风险,因此对于具体区域而言,LETI值应由最有可能产生风险的土地利用类型LETI值确定,即LETI的最小值应为该区域最终LETI值。尔后获取LETI值小于等于0的区域,该区域即为最坏情景区域。

表1 研究区不同土地利用类型生态因子最优指标值/区间和耐受区间表

Table 1 Indicators for land-use ecological tolerance index and their tolerance intervals and optimal value intervals for individual land use types

土地利用类型	生态因素	地形因素		地质灾害因素		生物多样性因素		水质与水文条件因素	
	因子指标	高程因子/m	坡度因子/°	崩塌滑坡因子/级	地面沉降及软土灾害因子/级	生态湿地与水体因子/级	自然保护区及森林因子/级	饮用水源地因子/级	洪水调蓄及清水通道维护因子/级
耕地	耐受区间	0~100	0~25	0~2	0~2	0~1	0~1	0~1	0~1
	最优区间	0~50	1~3	0	0	0	0	0	0
园地	耐受区间	0~625	0~35	0~3	0~3	0~1	0~2	0~2	0~2
	最优区间	0~625	1~3	0	0	0	0	0	0
林地	耐受区间	0~625	0~90	0~3	0~3	0~1	0~3	0~2	0~2
	最优区间	0~625	1~3	0	0	0	0	0	0
城镇	耐受区间	0~228	0~15	0~2	0~2	0~1	0~1	0~1	0~1
	最优区间	0~26	1~3	0	0	0	0	0	0
村庄	耐受区间	0~228	0~15	0~2	0~2	0~1	0~1	0~1	0~1
	最优区间	0~26	1~3	0	0	0	0	0	0

注:崩塌滑坡因子、地面沉降及软土灾害因子为0~3级,对应非风险到高度风险级别;生态湿地与水体因子、饮用水源地因子、洪水调蓄及清水通道维护因子为0~3级,对应从非管制到最高管制级别;自然保护区及森林因子为0~3级,对应非保护及市级、省级及国家保护级。

3.3 土地利用情景模拟与预测

土地利用模拟采用GeoSOS-FLUS模型平台实现,GeoSOS-FLUS基于ANN-CA模型构建,该模型提出了一种基于轮盘赌选择的自适应惯性竞争机制,将其与不同土地利用类型的转换成本及权值等共同确定CA模型的单元转换规则,从而实现土地利用变化模拟。模型具体原理见开发者文献及软件手册^[31-33]。

本文分别设定了WSB和NWSB模式并基于GeoSOS-FLUS平台模拟土地利用变化。WSB模式下要求最坏情景区域内禁止从事任何形式的开发建设,这里设定为不可转换区域。NWSB模式下则不考虑最坏情景区域对土地利用的风险约束,任何区域均可以自由转化。

以2010年度栅格数据为模拟用地转换的数量目标,根据2005年度土地利用数据模拟出2010年度土地利用格局后,结合真实土地利用数据校准并验证模型精度。经过多轮参数调整以及精度评价,最终获取连云港土地利用模拟模型相关参数和精度评价结果。其他参数主要包括迭代次数设置为1000;邻域大小采用默认值3;模型加速因子取值为0.3。成本矩阵设置中,根据对研究区域的经验,限制城镇用地及河湖库向其他类型的转变,其他类型

之间则可相互转化;将城镇用地邻域因子设置为1,其他因子均设定为0.5。

随后以2010年土地利用数据作为土地利用变化预测的初始年份;适宜性概率数据和限制区域数据与模拟模块数据一致。以2020年土地利用数量预测结果作为用地转换的数量阈值。其他参数设置均与模拟过程中的参数保持一致,据此预测连云港2020年两种情景下的土地利用模式。

4 结果及分析

基于不同土地利用类型测算出的研究区 $LETI$ 值,如图2所示。可以看出:除了地面沉降及软土灾害因子外,研究区内其他生态因子对土地利用的耐受度值均有部分区域 ≤ 0 。表明该区域内不适宜布局耕地及城镇村庄等有较强人类活动的土地利用类型,否则易产生严重的风险。

利用地图代数功能测算出的最坏情景区域共计489.67 km²(图3),主要包括连云港中部云台山大部分山体,该区域拥有云台山国家自然保护区,也是海拔较高、坡度较大且布局大量天然林地的区域,该区域内共计有高程、坡度、崩塌滑坡、自然保护区及森林等4种生态因子的 $LETI$ 值小于0,充分表明该区域具有极度的生态敏感性。此外,北部部

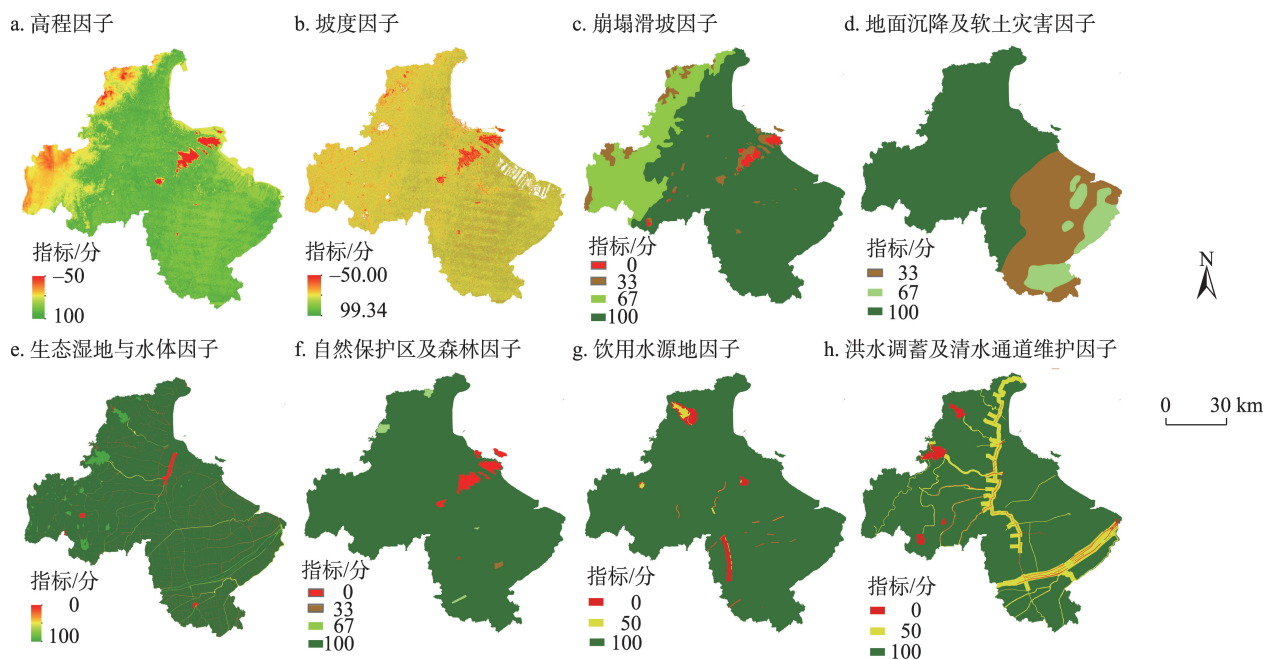


图2 连云港不同生态因子 $LETI$ 值分布图

Figure 2 Land-use ecological tolerance index ($LETI$) values for individual ecological factors in Lianyungang City

2019年6月

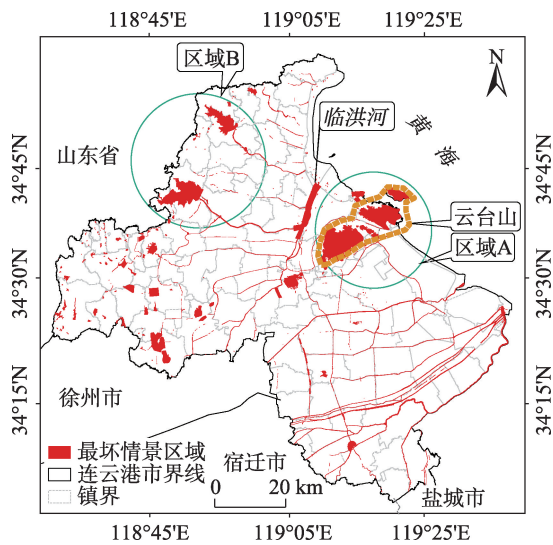


图3 连云港最坏情景区域图

Figure 3 "Worst case" areas in Lianyungang City

分山体、全市重要的河流湖泊水库等生态水体也属于最坏情景区域。其中北部部分山体主要为高程及坡度地形因子的 $LEFI$ 值小于 0, 而河流湖泊水库范围内大多为饮用水源地、洪水调蓄及清水通道维护或生态湿地与水体等因子的 $LEFI$ 值小于 0。最坏情景区域也可作为土地利用规划生态红线区域划定的依据。

2010 年度土地利用模拟结果及 2010 年度土地利用现状如图 4 所示。模拟精度评定以 2010 年土地利用数据为依据, 通过采样的方式进行评价, 采

样比例为栅格类型土地利用数据的 10%, 运用 FLUS 精度评估模块进行评价, 获取土地利用模拟结果的误差矩阵、各分类精度系数、总体精度系数、分类 $Kappa$ 系数以及总体 $Kappa$ 系数等(表 2)。

从表 2 可以看出, 研究区 2010 年土地利用模拟结果总体精度达到 94.12%, 总体 $Kappa$ 系数达到 0.91, 说明整体来看应用本方法模拟的结果与 2010 年度实际土地利用现状吻合度较高。从土地利用变化较为剧烈且集约程度较高的土地利用类型来看, 包括城镇、村庄、耕地等在内的土地利用类型用户精度和分类器精度均超过 80%, 表明基于 ANN 获取土地利用类型出现概率结果可以用于研究区土地情景模拟预测。

WSB 和 NWSB 模式下 2020 年土地利用模拟结果和土地利用转移矩阵分别如图 5 和表 3 所示:

(1) 城镇用地变化中, 在两种情景模式下城镇用地均有较大程度的扩张。NWSB 模式下有 4220 hm^2 的其他土地利用类型转变为城镇用地, 其中滩涂、盐田、园地及林地转换像元数目超过了 400 hm^2 ; 在 WSB 模式下有 3672 hm^2 的其他土地利用类型转变为城镇用地。从扩张空间格局来看, WSB 模式由于有最坏情景区域的约束, 城镇用地主要在连云港中心城区以及所属县区及重点中心镇区周边扩张, 且避开最坏情景区域。特别是连云港中部云台山区紧靠连云港市中心城区, 由于最坏情景区域规则

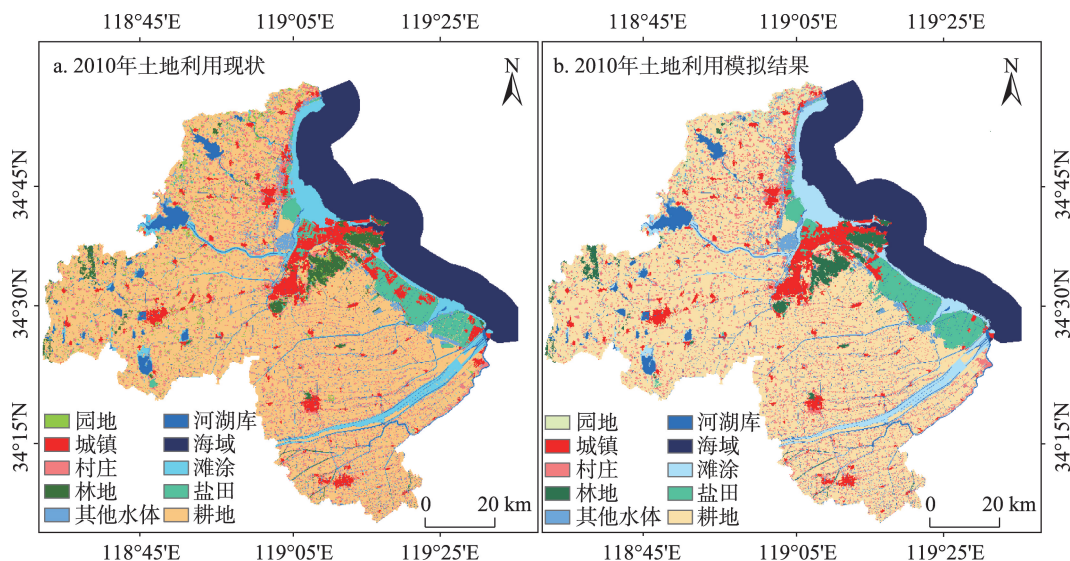


图4 连云港 2010 年土地利用现状及模拟结果

Figure 4 Actual and simulated land use in Lianyungang City, 2010

表2 研究区土地利用模拟精度评价结果

各土地利用类型的样点数/个											参考 总数	分类器 精度/%	用户精 度/%
城镇	村庄	耕地	海域	河湖库	林地	其他水体	滩涂	盐田	园地				
城镇	849	6	62	0	12	17	31	14	9	17	1016	82.59	83.56
村庄	5	1612	5	1	3	1	9	3	0	6	1645	97.93	97.99
耕地	68	17	11444	0	6	45	119	41	29	57	11826	96.70	96.77
海域	6	0	0	2752	2	1	0	17	0	0	2778	98.60	99.06
河湖库	1	1	17	0	862	0	10	7	0	1	899	95.46	95.88
林地	10	3	24	0	7	397	10	1	10	14	475	82.71	83.58
其他水体	5	1	118	0	1	1	489	22	38	10	685	70.97	71.39
滩涂	12	0	66	38	1	5	3	1122	9	1	1257	90.92	89.26
盐田	65	0	23	0	3	2	2	0	801	0	896	88.41	89.40
园地	7	6	75	0	6	11	16	7	10	293	431	73.43	67.98
参考总数	1028	1646	11834	2791	903	480	689	1234	906	399	21910		
总体精度:94.12%											总体Kappa系数:0.91		

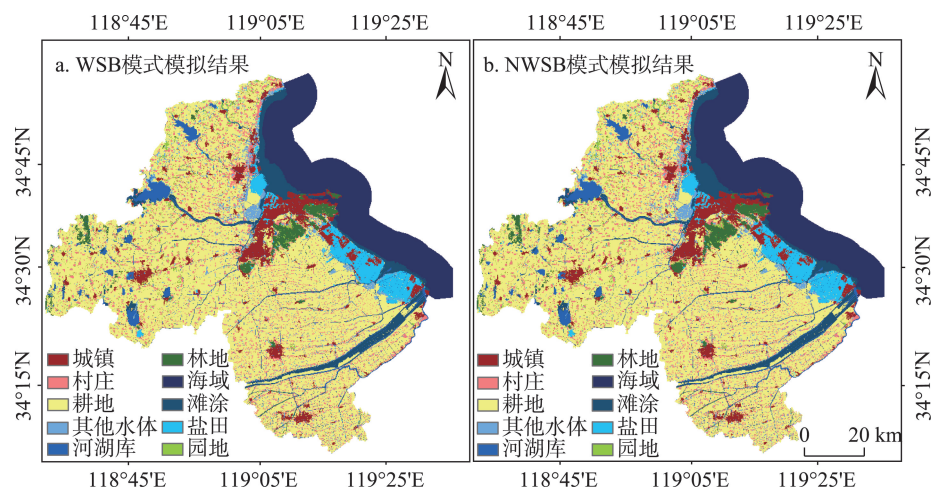


图5 连云港2020年WSB和NWSB模式下土地利用模拟结果

Figure 5 Simulation results of land use in Lianyungang City using the worst case scenario-based (WSB) constraint and non-worst case scenario-based (NWSB) models, 2020

的制约,城镇用地扩张的趋势得到有效的约束并严格限制在最坏情景区域之外。但在NWSB模式下城镇用地扩张有一部分突破了最坏情景区域的限制,表明城镇用地的自发扩张可能会产生较为严重的风险。图6即为连云港东部连岛及云台山东北部区域WSB和NWSB模式下土地利用模拟结果与最坏情景区域叠加示意。可以看出东部连岛和云台山东北部边界区域(图6中黄色圆形区域内)在WSB模式下相比NWSB模式有更多的城镇用地转入。实际上,2010年上述两区域均有一定数量的城镇用地分布于最坏情景区域,该部分区域即为WSB

模式下的最坏情景范围内城镇用地,并不是WSB模式下城镇扩张模拟的结果。图6中两种模式下最坏情景区域内城镇用地扩张差异则体现了最坏情景模式对土地利用变化的限制与约束作用。

对于两种模式下的城镇扩张,NWSB大于WSB模式下的城镇用地增长幅度(表3),NWSB模式下有更多的林地、河湖库、滩涂及园地转入城镇用地(图6)。而WSB模式下有更多的村庄、耕地和水体转入城镇用地。由于最坏情景区域包括了大部分的河湖库以及林地等具有生态维护功能的土地利用类型,因此在WSB模式下,这3类土地转入城镇

表3 连云港2020年WSB和NWSB模式下土地利用模拟转移矩阵

Table 3 Land transformation matrices for the simulation of land use in Lianyungang City using the worst case scenario-based (WSB) constraint and non-worst case scenario-based (NWSB) models, 2020 (hm ²)											
	城镇	村庄	耕地	海域	河湖库	林地	水体	滩涂	盐田	园地	基期合计
城镇	47584	0	0	0	0	0	0	0	0	0	47584
村庄	300	64372	604	0	4	72	444	12	36	320	66164
耕地	328	1348	470048	0	68	400	200	0	0	72	472464
海域	76	0	0	114860	0	4	0	0	0	0	114940
河湖库	272	0	48	0	35484	68	32	20	12	188	36124
林地	712	0	260	0	0	17120	220	76	148	116	18652
其他水体	92	0	1532	0	152	60	23392	84	752	332	26396
滩涂	592	4	592	316	76	28	328	44664	0	116	46716
盐田	1352	0	0	0	32	304	288	0	29172	248	31396
园地	496	32	768	0	24	304	184	12	16	14104	15940
NWSB 合计	51804	65756	473852	115176	35840	18360	25088	44868	30136	15496	876376
城镇	47584	0	0	0	0	0	0	0	0	0	47584
村庄	420	64436	568	0	0	24	392	4	36	284	66164
耕地	392	1288	470608	0	48	436	196	0	0	76	473044
海域	64	0	0	114868	0	4	4	0	0	0	114940
河湖库	64	0	8	0	36016	8	8	8	0	12	36124
林地	396	0	236	0	0	17536	176	36	176	96	18652
其他水体	120	0	1548	0	148	76	23516	88	560	340	26396
滩涂	548	4	512	368	72	20	284	44796	0	112	46716
盐田	1336	4	0	0	24	196	320	0	28732	204	30816
园地	332	40	880	0	36	60	192	20	8	14372	15940
WSB 合计	51256	65772	474360	115236	36344	18360	25088	44952	29512	15496	876376

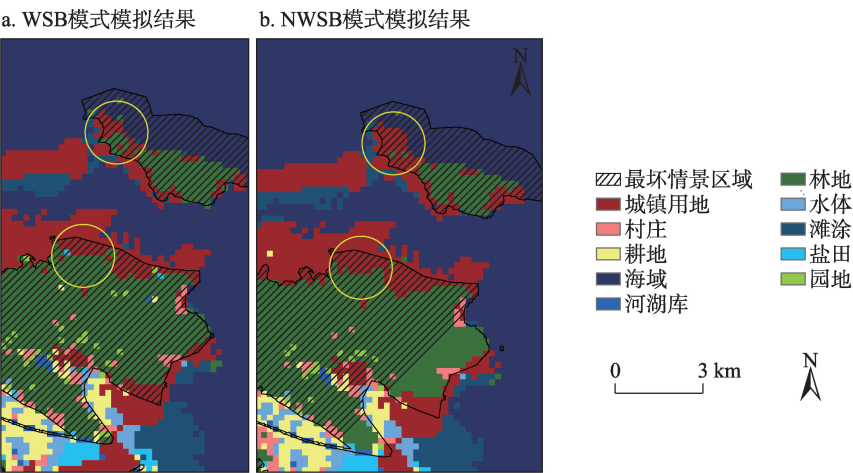


图6 WSB和NWSB模式下土地利用模拟结果与最坏情景区域叠加局部图

Figure 6 Simulation results and “worst case” areas of land use in Lianyungang City using the worst case scenario-based (WSB) constraint and non-worst case scenario-based (NWSB) models in a sample area, 2020

用地的数量相对较小；

(2)村庄变化中,城镇用地及耕地为主要转出类型。其中,WSB模式下有420 hm²、而NWSB模式

下有300 hm²的村庄转化为城镇用地。表明在城镇用地需求增长的背景下,基于最坏情景模式的土地利用变化模拟将会引导更多的村庄转换为城镇用

地,因此更能适应中国建设用地节约集约利用管理的需要。相较于NWSB模式,WSB模式下维持不变的村庄面积更大,表明该模式下村庄变化格局相对较小。此外,两种模式下新增村庄用地的主要来源均为耕地,但WSB模式下耕地转入量相对较少,且有少量盐田转入村庄,表明该模式下可在一定程度上减少村庄建设对耕地的占用,从而提高了存量建设用地的使用效率。

(3)耕地变化中,两种模式下坑塘水面及沟渠等非生态水体转化为耕地的数量最大,此外村庄也是耕地转入的重要来源。其他耕地转入来源中,滩涂、林地及河湖库等重要的生态水体在两种情景模式下有明显的差异;NWSB模式下这3种土地利用类型转化为耕地数量明显高于WSB模式,体现了基于最坏情景模式模拟的作用。耕地转出中,城镇用地、村庄、林地以及其他水体为主要的转出类型;其中相比NWSB模式,WSB模式下有更多的耕地转入城镇用地。表明在WSB模式下由于最坏情景区域的约束和限制转化作用,城镇用地扩张不得不占用更多的耕地,从而对耕地保护工作提出了更高的要求。

5 结论

土地利用变化模拟预测可以为土地利用环境效应评价以及土地利用规划方案的编制提供基础数据以及相应的依据和参考。由于土地利用变化尤其城镇空间扩张具有一定的不确定性,不加约束地自发扩张易使城镇等建设用地突破生态红线的控制进行蔓延,不仅会对区域生态环境产生重要的影响,也会对人类的生命财产安全造成严重的威胁。

本文构建了基于最坏情景理论的土地利用变化模拟方法并以连云港为例开展了实证研究。结果显示:研究区最坏情景区域主要包括中部云台山区域以及重要的河流湖泊水库等生态水体;WSB模式下城镇用地扩张避开了最坏情景区域,且对于耕地的占用相对较小;而NWSB模式下滩涂、林地和河湖库等土地利用类型转化为耕地数量明显高于WSB模式。这充分体现了基于最坏情景模式模拟的作用。

需要指出的是,本文对于高程因子耐受度区间以及最优区间的确定主要基于研究区各土地利用类型高程分布的统计学特征,而高程对于土地利用类型限制的作用机理尚缺乏深入研究。虽然如此,这种

基于统计学的确定方法具有一定的参考价值和区域适用性。本方法特别适用于基于底线保护原则的特殊生态环境敏感区域土地利用变化模拟与预测,也可应用于其他区域相关工作,从而为区域土地规划和管理提供支持。

参考文献(References):

- [1] 路云阁,蔡运龙,许月卿. 走向土地变化科学: 土地利用/覆被变化研究的新进展[J]. 中国土地科学, 2006, 20(1): 55-61. [Lu Y G, Cai Y L, Xu Y Q. Towards land change science: The progress of LUCC[J]. China Land Science, 2006, 20(1): 55-61.]
- [2] 李亦秋,邓欧,张冬有,等. 丹江口库区土地利用及其生态系统服务价值情景模拟[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 329-335. [Li Y Q, Deng O, Zhang D Y, et al. Land use and ecosystem service value scenarios simulation in Danjiangkou Reservoir Area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(5): 329-335.]
- [3] Chen L G, Yang X Y, Chen L Q, et al. Impact assessment of land use planning driving forces on environment[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2015, 55: 126-135.
- [4] Chen L G, Yang X Y, Chen L Q, et al. A state-impact-state methodology for assessing environmental impact in land use planning [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2014, 46(4): 1-12.
- [5] 许小娟,刘会玉,林振山,等. 基于CA-MARKOV模型的江苏沿海土地利用变化情景分析[J]. 水土保持研究, 2017, 24(1): 213-218. [Xu X J, Liu H Y, Lin Z S, et al. Scenario Analysis of land use change in Jiangsu coast based on CA-Markov model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(1): 213-218.]
- [6] 曾永年,靳文凭,王慧敏,等. 青海高原东部土地利用变化模拟与景观生态风险评价[J]. 农业工程学报, 2014, 30(4): 185-194. [Zeng Y N, Jin W P, Wang H M, et al. Simulation of land-use changes and landscape ecological assessment in eastern part of Qinghai Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(4): 185-194.]
- [7] 刘明皓,李东鸿. ANN-CA模型改进及城市用地动态模拟[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2014, 26(5): 720-726. [Liu M H, Li D H. Simulation of urban land use change based on the improved ANN-CA[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2014, 26(5): 720-726.]
- [8] 何丹,金凤君,周璟. 基于Logistic-CA-Markov的土地利用景观格局变化: 以京津冀都市圈为例[J]. 地理科学, 2011, 31(8): 903-910. [He D, Jin F J, Zhou J. The changes of land use and landscape pattern based on Logistic-CA-Markov model: A case study of Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan region[J]. Scientia Geographica Sinica, 2011, 31(8): 903-910.]
- [9] 邓祥征,刘纪远,战金艳,等. 区域土地利用变化的多情景分

2019年6月

- 析:以内蒙古自治区太仆寺旗为例[J]. 地球信息科学, 2004, 6(1): 81-88. [Deng X Z, Liu J Y, Zhan J Y, et al. Scenarios analyses on the spatio-temporal patterns of land use change: A case study in Taips County of Inner Mongolia[J]. Geo-information Science, 2004, 6(1): 81-88.]
- [10] 刘小平, 黎夏, 艾彬, 等. 基于多智能体的土地利用模拟与规划模型[J]. 地理学报, 2006, 61(10): 1101-1112. [Liu X P, Li X, Ai B, et al. Multi-agent systems for simulating and planning land use development[J]. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(10): 1101-1112.]
- [11] 马金卫, 吴晓青, 周迪, 等. 海岸带城镇空间扩展情景模拟及其生态风险评价[J]. 资源科学, 2012, 34(1): 185-194. [Ma J W, Wu X Q, Zhou D, et al. Scenario simulation of urban spatial expansion and its ecological risks assessment in coastal zones[J]. Resources Science, 2012, 34(1): 185-194.]
- [12] 刘瑾, 田永中, 田林, 等. 快速城镇化区域用地扩张模拟的规划约束对比研究[J]. 地理与地理信息科学, 2019, 35(1): 82-88. [Liu J, Tian Y Z, Tian L, et al. A comparative study on planning constraints of the rapid urbanization area expansion simulation[J]. Geography and Geo-Information Science, 2019, 35(1): 82-88.]
- [13] 李靖, 廖和平, 蔡进. 基于风险评价的低丘缓坡土地开发建设适宜性情景模拟: 以重庆市巴南区为例[J]. 资源科学, 2018, 40(5): 967-979. [Li J, Liao H P, Cai J. Simulation of utilization and construction suitability of gentle hillsides based on risk evaluation in Banan District of Chongqing[J]. Resources Science, 2018, 40(5): 967-979.]
- [14] 李益敏, 管成文, 郭丽琴, 等. 基于生态敏感性分析的江川区土地利用空间格局优化配置[J]. 农业工程学报, 2018, 34(20): 267-276. [Li Y M, Guan C W, Guo L Q, et al. Optimization of land use spatial pattern in Jiangchuan District based on ecological sensitivity analysis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(20): 267-276.]
- [15] 陈龙高, 李英奎, 陈龙乾, 等. 土地生态利用视角下的连云港空间管制分区研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014, 22(4): 685-697. [Chen L G, Li Y K, Chen L Q, et al. Spatial regulation zoning of Lianyungang City: A perspective from the ecological land-use management[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2014, 22(4): 685-697.]
- [16] Mccready D. Development and communication of worst-case scenarios for the EPA risk management program[J]. Process Safety Progress, 1996, 15(2): 95-103.
- [17] Schneider S. The worst-case scenario[J]. Nature, 2009, 458(7242): 1104-1105.
- [18] Chen L G, Li L, Yang X Y, et al. A worst-case scenario based methodology to assess the environmental impact of land use planning[J]. Habitat International, 2017, 67: 148-163.
- [19] 张斌, 雍岐东, 肖芳淳. 模糊物元分析[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997. [Zhang B, Yong Q D, Xiao F C. Fuzzy-Material Element Analysis[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997.]
- [20] 蔡文. 物元分析[M]. 广州: 广东高等教育出版社, 1987. [Cai W. Matter Element Analysis[M]. Guangzhou: Guangdong Higher Education Publishing House, 1987.]
- [21] 赵海涛, 张兵, 左正立, 等. 中国及周边区域 ASTER GDEM 与 SRTM DEM 高程对比分析及互补修复[J]. 测绘科学, 2012, 37(1): 8-11. [Zhao H T, Zhang B, Zuo Z L, et al. Elevation comparison and complementary repair of ASTER GDEM and SRTM DEM in China and surrounding areas [J]. Science of Surveying and Mapping, 2012, 37(1): 8-11.]
- [22] Yang X Y, Li L, Chen L G, et al. Improving ASTER GDEM accuracy using land use-based linear regression methods: A case study of Lianyungang, east China[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2018, DOI: 10.3390/ijgi7040145.
- [23] 连云港市统计局. 连云港统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001-2017. [Lianyungang Statistical Bureau. Lianyungang Statistical Year Report[M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 2001-2017.]
- [24] 中华人民共和国住房和城乡建设部. CJJ 83-2016 城乡建设用地竖向规划规范[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016. [Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. CJJ 83-2016 China's Criterion for Vertical Planning of Urban Land Use[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.]
- [25] 全国农业区划委员会. 土地利用现状调查技术规程[EB/OL]. (1984-09-08) [2018-10-17]. <https://wenku.baidu.com/view/5b1411a8905f804d2b160b4e767f5acfa0c78306.html>. [National Commission for Agricultural Regionalization. China's Technical Regulation for Land Use Investigation[EB/OL]. (1984-09-08) [2018-10-17]. <https://wenku.baidu.com/view/5b1411a8905f804d2b160b4e767f5acfa0c78306.html>.]
- [26] 苏珊. 基于 GIS 的海口市建设用地区生态适宜性评价[D]. 海口: 海南师范大学, 2013. [Su S. GIS Based Evaluation on Ecological Suitability of Construction Land Use in Haikou City[D]. Haikou: Hainan Normal University, 2013.]
- [27] 张丽娟, 姜蓝齐, 张学珍, 等. 19 世纪末黑龙江省的耕地覆盖重建[J]. 地理学报, 2014, 69(4): 448-458. [Zhang L J, Jiang L Q, Zhang X Z, et al. Reconstruction of cropland over Heilongjiang Province in the late 19th century[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(4): 448-458.]
- [28] 岑湘荣. 基于 GIS 的城镇建设用地生态适宜性评价研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008. [Cen X R. Evaluating Ecological Suitability for Construction Land Using Geographical Information System[D]. Changsha: Central South University, 2008.]
- [29] 陈静. 连云港市城市洪涝灾害特点分析及对策[J]. 治淮, 2014, (1): 8-9. [Chen J. Analyzing the characteristics of flood disaster in Lianyungang City[J]. Harnessing the Huai River, 2014, (1): 8-9.]
- [30] 叶高斌, 苏伟忠, 陈维肖. 太湖流域城乡建设用地扩张的高程特征变化[J]. 自然资源学报, 2015, 30(6): 938-950. [Ye G B, Su W Z, Chen W X. The elevation characteristics variation of urban and rural construction land expansion in Taihu lake basin[J]. Jour-

- nal of Natural Resources, 2015, 30(6): 938–950.]
- [31] Li X, Yeh A G. Neural-network-based cellular automata for simulating multiple land use changes using GIS[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2002, 16(4): 323–343.
- [32] GeoSOS-FLUS 开发者团队. 未来土地利用变化情景模拟模型 [EB/OL]. (2017–10–18) [2018–11–23]. http://www.geosimulation.cn/FLUS/GeoSOS-FLUS%20Manual_CHS.pdf. [GeoSOS-FLUS Team. The Model of GeoSOS-FLUS [EB/OL]. (2017–10–18) [2018–11–23]. http://www.geosimulation.cn/FLUS/GeoSOS-FLUS%20Manual_CHS.pdf.]
- [33] Liu X P, Liang X, Li X, et al. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects[J]. Landscape and Urban Planning, 2017, 168: 94–116.

Worst case scenario-based methodology for simulating land-use change in coastal city in China: A case study of Lianyungang

YANG Xiaoyan¹, LING Yu³, LI Long², CHEN Longgao¹, CHEN Longqian²

(1. School of Geography, Geomatics and Planning, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China; 2. School of Environment and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;
3. Land Consolidation Center in Jiangsu Province, Nanjing 210024, China)

Abstract: Simulating and predicting future land-use pattern is of great importance for supporting land-use eco-environmental impact assessment and optimizing land-use planning schemes. Using artificial neural network (ANN) and cellular automata (CA) based future land use simulation (FLUS) model, we proposed a land-use change simulation methodology and applied it for predicting the land-use pattern in a coastal city of China, Lianyungang, in 2020 using the worst case scenario-based (WSB) constraint and non-worst case scenario-based (NWSB) models. The results indicate that: (1) The “worst case” areas are mainly identified in the central-eastern part of the city with a national nature reserve, high elevation and steep slope, natural forests, and water bodies such as rivers, lakes, and reservoirs, and the area is 489.67 km²; (2) With or without the constraint of prohibiting factors or “worst case”, urban land would both expand to a large extent; and with the WSB constraint urban expansion would avoid the “worst case” areas; (3) More arable land would convert into rural residential land in the simulation based on NWSB than with WSB constraint, indicating that the land use simulation with WSB constraint can decrease the occupation of arable land when additional rural residential land is needed; However, (4) the overall area of arable land converting to urban land is larger in the simulation based on the WSB constraint due to the restriction of land use conversion in the “worst case” areas, which challenges the arable land protection strategy in the city. The simulation and prediction of future land-use pattern based on the “worst case” constraint can support eco-environmental protection and regional sustainable development as well as local land-use planning and management. It may also provide a reference for land-use change simulation in other areas.

Key words: worst case constraint; ecological tolerance index; land-use change; simulation; Lianyungang City