

# 耦合MOP与GeoSOS-FLUS模型的县级土地利用结构与布局复合优化

曹 帅<sup>1</sup>, 金晓斌<sup>1,2,3</sup>, 杨绪红<sup>1,2,3</sup>, 孙 瑞<sup>1</sup>, 刘 晶<sup>1</sup>,  
韩 博<sup>1</sup>, 徐伟义<sup>1</sup>, 周寅康<sup>1,2,3</sup>

(1. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023; 2. 国土资源部海岸带开发与保护重点实验室, 南京 210023; 3. 江苏省土地开发整理技术工程中心, 南京 210023)

**摘要:** 在自然资源整合不断加强, 土地利用结构日趋复杂的形势下, 采用单一土地利用结构优化方式难以有效满足区域土地利用合理规划的需求。综合考虑生态文明、乡村振兴、城乡融合等土地可持续利用目标, 构建土地利用结构优化与布局优化的集成体系, 对提升规划适用性具有积极作用。选取常州市金坛区为研究区, 以经济效益与生态效益为优化目标, 设置自然演变、经济优先和生态优先三种发展情景, 在通过MOP(多目标规划)模型进行土地利用结构优化的基础上, 利用GeoSOS-FLUS模型实现土地利用布局优化。结果表明: 通过集成MOP和GeoSOS-FLUS模型, 采用“结构+约束+布局+准则”研究模式探索县域单元下的土地利用结构布局优化, 对调整土地利用结构, 优化土地利用空间布局有一定帮助。从案例分析结果看, 城镇工矿用地数量在自然演变和经济效益优先情景下分别增加了39%和95%; 林地生态效益优先情景下增加了40%; 农村居民点在三种情景下分别减少33%、66%和66%。在三种发展情景下, 空间格局都将面临城镇空间与生态空间两级分化的现象, 后期区域发展中应加强城乡土地利用与生态保护协调发展, 促进空间布局均衡化。

**关键词:** 土地利用结构; 土地利用布局; MOP模型; GeoSOS-FLUS模型; 优化; 金坛

如何基于有限的土地资源, 通过结构优化与布局调控, 利用多目标决策, 促进经济发展、社会进步、生态保护等多重目标发展, 实现区域综合效益最大化, 是土地利用规划的重要任务<sup>[1]</sup>。土地利用结构优化与布局优化是土地利用规划的核心内容, 其中按照不同目标对区域的土地资源进行数量配置是土地利用结构优化的侧重点, 而土地利用布局优化则强调在土地资源数量目标的基础上, 按照适宜性或发展性潜力进行空间配置。县级规划作为中国五级土地利用总体规划体系的核心, 既是乡镇土地利用总体规划规划的指导内容, 又是省、市土地利用总体规划的基础内容, 同时也是未来落实国土空间用途管制的关键。当前土地利用规划编制面临资源重组、部门整合的新形势, 复杂的土地利用方式要求规划约束更系统、管控法则更全面、编制方法更科学, 县级土地利用规划编制面临更大的挑战。

通过多目标综合决策实现土地利用效益最大化是土地利用规划领域的研究热点<sup>[2]</sup>。相

收稿日期: 2018-11-12; 修订日期: 2019-04-09

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2015BAD06B02)

作者简介: 曹帅 (1996-), 男, 黑龙江鹤岗人, 硕士, 主要从事土地资源管理研究。E-mail: caoshuai\_nju@126.com

通讯作者: 金晓斌 (1974-), 男, 甘肃兰州人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土地资源管理研究。

E-mail: jinxb@nju.edu.cn

关学者围绕土地利用结构和布局优化从方法创新<sup>[3-4]</sup>、约束控制<sup>[5-6]</sup>、尺度调整<sup>[7-8]</sup>、目标耦合<sup>[9-10]</sup>等方面进行了大量研究。在土地利用结构优化方法探索阶段,张明等<sup>[11]</sup>利用典型相关分析,判别土地利用类型分布与其影响因子的相关关系;张旻等<sup>[12]</sup>考虑到土地利用数据间的多重相关性,将偏最小二乘法引入土地利用结构优化。在土地利用结构优化模型构造阶段,Stoorvogel<sup>[13-14]</sup>通过构造包含地理信息系统、土地生产力分析、专家评价与线性规划的综合模型对土地利用结构展开优化。在土地利用结构优化理念调整阶段,Zhou<sup>[15]</sup>将未来土地利用参数作为模糊变量,对多目标条件下的县域土地利用结构进行了优化;Lu等<sup>[16]</sup>采用随机变量约束模型分析了不同约束条件下对优化结果的影响,确定了土地利用的最优结构。随着计算机和人工智能技术的发展,更为复杂的智能模型及算法被引入土地利用布局优化和空间配置研究。郑荣宝等<sup>[17]</sup>利用元胞自动机与神经网络耦合模型,在逐步宽容约束的基础上,实现了土地资源的空间配置与模拟;李鑫等<sup>[18]</sup>以Logistic回归方式提取不同用地类型的优化分布规则,利用CLUE-S模型模拟了区域土地利用布局动态演变;陈影等<sup>[19]</sup>以土地生态服务功能和经济功能提升为目标,对比分析了CLUE-S模型和综合MOP与CLUE-S模型在土地利用布局优化的效果;Stewart等<sup>[20]</sup>利用理想点法处理多目标决策问题,使用遗传算法对土地资源进行了空间优化配置;郭小燕等<sup>[21]</sup>基于混合蛙跳算法,利用青蛙群体空间分布模拟了区域土地利用空间格局,在多目标控制下搜索最优解,验证了算法的全局优化能力和有效性。综上所述,当前研究侧重于对技术方法和优化目标的思考,所构建的约束条件和优化准则多集中于土地利用规划数值的宏观约束,而面对新时期生态文明、乡村振兴、城乡融合等发展导向与政策要求,相关约束条件、优化目标与土地利用规划的内在联系仍有待深入。尤其随着土地资源愈发稀缺,城乡土地利用愈加复杂,导致一定的经济社会结构失衡,亟待构建新型的土地利用规划编制范式。

本文在自然资源统筹管理的背景下,以统筹经济发展与生态保护为目标,结合区域发展目标与实现路径,设定了自然演变、经济优先和生态优先三种发展情景。在利用MOP模型(多目标规划模型)分析区域最优土地利用结构的基础上,基于GeoSOS-FLUS模型,引入自然条件、交通区位、社会经济、耕地质量等驱动力因子,叠加地类转换限制性图层,对金坛区2030年土地利用进行布局优化,以期对促进区域土地资源的优化配置提供参考和借鉴。

## 1 研究方法与数据来源

### 1.1 研究区概况

金坛区地处江苏省南部,为宁沪杭三角地带之中枢。位于119°17'45"~119°44'59"E、31°33'42"~31°53'22"N之间,南濒洮湖,与溧阳、宜兴依水相望,北与丹阳毗邻,东与武进相连,西以茅山为界,与句容接壤。全区现辖3个街道、6个镇,土地总面积为975.46 km<sup>2</sup>。

“十一五”以来金坛区经济社会发展迅速,由此带来土地利用巨大变化<sup>[22]</sup>(表1)。在快速城镇化进程中,随着基础设施建设和农村人口迁居,建设用地急剧扩张,但金坛水域面积较大,后备耕地资源开发殆尽,土地利用效率提升停滞不前,经济效益增长与耕地保护的矛盾逐渐显著。同时,金坛区在发展过程中以“建设长三角山水生态城市与

表1 2006年与2017年经济社会与土地利用变化情况

Table 1 Economic, social and land use changes in 2006 and 2017

年份	经济社会			土地利用/km <sup>2</sup>				
	城市化率 /%	GDP /亿元	人均GDP /(万元/人)	建设用地		耕地	林地	水域
				城镇工矿用地	农村居民点			
2006	32.72	182.01	3.34	62.60	67.00	390.94	39.63	131.38
2017	62.06	708.34	12.65	70.64	68.54	337.46	39.12	130.62

现代农业示范区”为目标，并成为全国生态示范区的建设试点区（图1），但建设用地扩张正逐步压缩生态用地空间，影响整体生态环境，降低区内生态效益。面对保持发展经济、保障社会进步和保护生态环境的多重矛盾，优化土地利用结构与布局、协调土地利用经济及生态目标、统筹城市发展与生态保护至关重要。

1.2 数据来源

本文数据分为统计数据、土地利用数据、基础地理数据及其他数据四部分，相关数据说明见表2。为了使数据可计算，首先统一数据的范围与格式为100 m×100 m栅格，然后将矢量数据基于土地利用现状图进行配准并转换为栅格，最后通过投影变换、重采样等方法对DEM数据进行处理；利用欧式距离计算不同地类到城镇中心、高速公路、主干道以及铁路的距离；采用空间配准、矢量化的操作对城市规划与生态保护区要素进行提取。

1.3 研究思路

本研究总体思路可以分为土地利用结构优化、土地利用布局优化与案例分析三部

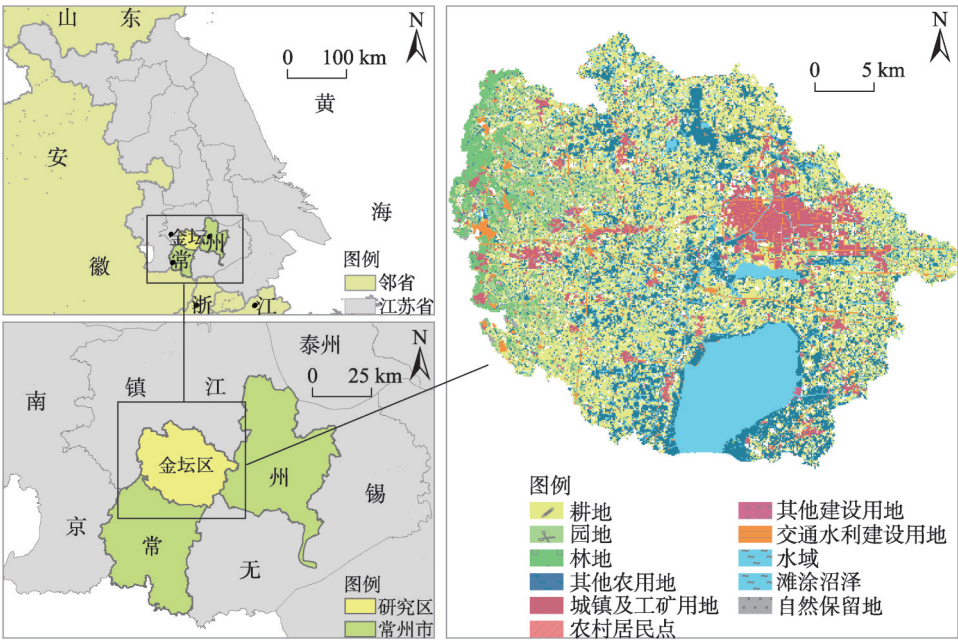


图1 研究区区位示意与土地利用现状

Fig. 1 The location of the study area and its land use status

表2 数据说明  
Table 2 Data description

数据类型	数据来源	数据说明	数据用途
土地利用数据	2015金坛区土地变更调查成果数据库	比例尺1:1万	模型基础输入数据
统计数据	《金坛年鉴》	2007-2017年	相关统计数据获取
	《常州统计年鉴》	2007-2017年	相关统计数据获取
农用地分等数据	2015年金坛区农用地分等定级成果更新数据库	比例尺1:1万	耕地质量驱动力因子
规划数据	《金坛城市总体规划2013-2030》	文本及图件	约束条件确定
	《金坛市土地利用总体规划2006-2020》	文本及图件	约束条件确定
	《江苏省生态红线区域保护规划》	文本及图件	限制转化区域确定
DEM	ASTER GDEM V2版	100 m×100 m	自然地形驱动力因子
夜间灯光数据	Version 4 DMSP-OLS Nighttime Lights Time Series, <a href="http://www.noaa.gov/">http://www.noaa.gov/</a>	1 km×1 km	景观阻力面修正社会经济驱动力因子
常州市交通图	百度地图, <a href="http://map.baidu.com/">http://map.baidu.com/</a>	比例尺1:1万	交通区位驱动力因子
月均降水量/mm	国家气象科学数据共享服务平台	4 km×4 km	自然地形驱动力因子

分。(1) 土地利用结构优化。首先, 根据城市发展方式的不同侧重, 设置三种发展情景, 分别代表自然演变、经济效益优先和生态效益优先, 以此作为多目标规划模型的目标函数; 其次, 通过灰色预测模型分别预测目标年的经济效益系数和生态效益系数, 基于宏观规划控制、土地可持续利用、乡村振兴与城乡融合等约束条件, 求取三种发展情景下经优化的土地利用结构。(2) 土地利用布局优化。首先, 以自然地形、交通区位、社会经济、耕地质量作为土地利用转换的驱动力因子; 其次, 在协同发展、城乡融合、可持续发展的管控法则背景下, 基于神经网络模型获取各地类间转换的适宜性概率; 最后, 采用元胞自动机模型, 以适宜性概率作为规则输入端、优化后的土地利用结构作为变化数量目标输入端, 根据限制转化约束控制, 通过空间优化配置模拟, 得到三种发展情景下的土地利用优化布局。(3) 案例分析。以金坛区为案例, 通过耦合 MOP 与 GeoSOS-FLUS 模型求取县域单元尺度的土地利用结构与布局优化结果, 进行定性与定量分析。

1.4 研究方法

1.4.1 MOP模型

MOP即多目标规划模型, 是土地利用优化研究的重要模型, 基于约束数据与客观规律进行预测较为科学, 是研究地理学、区域经济发展的基本数学模型<sup>[23]</sup>。多目标规划模型包含决策变量、目标函数、约束条件三部分, 聚焦于在主观或客观条件下, 使得某个或多个目标达到最值的决策。

$$F_1(x)=\max \sum_{j=1}^n c_j x_j$$

(1)

$$F_2(x)=\max \sum_{j=1}^n d_j x_j$$

(2)

$$s.t.=\begin{cases} \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j=(\geq, \leq) b_j, (i=1, 2, \cdots, m) \\ x_j \geq 0, (j=1, 2, \cdots, n) \end{cases}$$

(3)



式中:  $F_1(x)$ 、 $F_2(x)$  分别表示经济效益和生态效益;  $x_j$  为第  $j$  类决策变量 ( $j=1, 2, \dots, 11$ );  $c_j$  和  $d_j$  分别为单位面积下不同用地的经济、生态效益系数; 约束条件  $s.t.$  中,  $a_{ij}$  为第  $i$  个约束条件中第  $j$  个变量对应的系数;  $b_j$  为约束值。

结合研究区土地利用特点, 为与《县级土地利用总体规划编制规程》(TD/T 1024-2010) 相衔接, 以规划地类为基础, 将土地利用类型 (共 11 类) 作为决策变量, 分别为:  $x_1$  耕地、 $x_2$  园地、 $x_3$  林地、 $x_4$  其他农用地、 $x_5$  城镇工矿用地、 $x_6$  农村居民点、 $x_7$  其他建设用地 (包括风景名胜设施用地、特殊用地和盐田)、 $x_8$  交通水利建设用地、 $x_9$  水域、 $x_{10}$  滩涂沼泽、 $x_{11}$  自然保留地 (包括盐碱地、沙地、裸地、荒草地以及未利用地)。

#### 1.4.2 GeoSOS-FLUS 模型

GeoSoS-FLUS 模型是由黎夏团队<sup>[24]</sup>开发, 适用于未来土地利用变化情景模拟研究, 是进行地理空间模拟、空间优化、辅助决策制定的有效模型。该模型首先利用神经网络算法 (ANN) 获取各类用地的适宜性概率, 然后通过耦合系统动力学模型 (SD) 和元胞自动机 (CA) 模型以提高模型的适用性, 其中在 CA 模型中, 引入一种自适应惯性竞争机制, 以处理多种土地利用类型在自然与人类活动共同影响下发生相互转化时的复杂性和不确定性。主要计算模块如下:

##### (1) 基于神经网络的适宜性概率计算

神经网络算法 (ANN) 包括预测与训练阶段, 由输入层、隐含层、输出层组成, 计算公式为:

$$\begin{aligned} sp(p, k, t) &= \sum_j \omega_{j,k} \times \text{sigmoid}(net_j(p, t)) \\ &= \sum_j \omega_{j,k} \times \frac{1}{1 + e^{-net_j(p, t)}} \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $sp(p, k, t)$  为  $k$  类型用地在时间  $t$ 、栅格  $p$  下的适宜性概率;  $\omega_{j,k}$  是输出层与隐藏层之间的权重;  $\text{sigmoid}()$  是隐藏层到输出层的激励函数;  $net_j(p, t)$  表示第  $j$  个隐藏层栅格  $p$  在时间  $t$  上所接到的信号。神经网络算法输出的各个用地类型适宜性概率总和一直为 1 即:

$$\sum_k sq(p, k, t) = 1 \quad (5)$$

##### (2) 自适应惯性竞争机制

土地利用转化概率不仅取决于神经网络输出的分布概率, 还受到邻域密度、惯性系数、转换成本及地类竞争等因素的影响。当前土地数量与土地需求的差距会在迭代过程中自适应调整, 决定了不同类型用地的惯性系数。第  $k$  种地类在  $t$  时刻的自适应惯性系数  $Intertia'_k$  为:

$$Intertia'_k \begin{cases} Intertia_k^{t-1} & |D_k^{t-2}| \leq |D_k^{t-1}| \\ Intertia_k^{t-1} \times \frac{D_k^{t-2}}{D_k^{t-1}} & 0 > D_k^{t-2} > D_k^{t-1} \\ Intertia_k^{t-1} \times \frac{D_k^{t-1}}{D_k^{t-2}} & D_k^{t-1} > D_k^{t-2} > 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $D_k^{t-1}$ 、 $D_k^{t-2}$  分别为  $t-1$ 、 $t-2$  时刻需求数量与栅格数量在第  $k$  种类型用地的差值。

在计算出不同栅格的概率后, 采用 CA 模型迭代的方式, 确定各用地类型。在  $t$  时刻, 栅格  $p$  转化为  $k$  用地类型的概率  $TProb_{p,k}^t$  可表示为:

$$TProb_{p,k}^t = sp(p, k, t) \times \Omega_{p,t}^t \times Intertia_k^t \times (1 - sc_{c \rightarrow k}) \quad (7)$$

式中:  $sc_{c \rightarrow k}$  为  $c$  用地类型改变为  $k$  用地类型的成本;  $1 - sc_{c \rightarrow k}$  为转换发生的困难程度;  $\Omega_{p,t}^t$  为邻域作用, 其公式为:

$$\Omega_{p,t}^t = \frac{\sum_{N \times N} con(c_p^{t-1} = k)}{N \times N - 1} \times \omega_k \quad (8)$$

式中:  $\sum_{N \times N} con(c_p^{t-1} = k)$  表示在  $N \times N$  的 Moore 邻域窗口, 上一次迭代结束后第  $k$  种地类的栅格总数, 本文  $N=3$ ;  $\omega_k$  为各类用地的邻域作用权重。

模型的精度验证主要观察 OA、ROC 及 Kappa 三个参数, 值越接近 1, 精度越高。有研究表明, GeoSOS-FLUS 模型的模拟精度高于 CLUE-S、ANN-CA 等常用模型<sup>[28]</sup>。

当前 GeoSOS-FLUS 模型多用于土地利用变化模拟。本文通过综合 MOP 模型对其进行优化, 使其具有在一定约束和目标的条件下, 耦合相关驱动力因子与限制性因素, 在土地利用布局优化研究中使用。

## 2 结果分析

### 2.1 发展情景设定

考虑到研究区土地利用结构及其空间配置受政策影响较大, 根据经济效益与生态效益相统一、因地制宜、分级指导和宏观控制相结合、保护和利用并重、开发与整治并举、统筹兼顾、全面安排和积极保护等原则, 以 2030 年为目标年, 设定三种发展情景:

发展情景 1 (自然演变情景): 在《金坛区土地利用总体规划 (2006-2020)》变化趋势下, 根据宏观政策调控要求, 在确保耕地面积不减少的基础上, 综合考虑经济发展和生态保护, 遵循土地利用结构自然演变规律, 实现经济效益与生态效益协同发展;

发展情景 2 (经济优先情景): 在城镇快速发展背景下, 充分发挥经济产出潜力较高的土地利用效益, 以经济效益优先作为优化目标, 加速城乡融合, 促进城镇化率稳步提升, 加大城市基础设施建设, 提高交通水利建设用地面积;

发展情景 3 (生态优先情景): 加强自然资源综合整治力度, 保障生态功能, 保护环境质量安全, 合理利用自然资源, 以生态效益优先作为优化目标, 强化生态用地保护, 适量减少农村居民点用地, 促进村容村貌与乡村环境改善。

#### 2.1.1 经济效益目标

根据 2006-2016 年的单位面积产出, 基于时间序列与灰色预测模型, 计算出目标年份的经济效益系数。其中采用种植业与桑茶果产值之差表征耕地; 园地以桑茶果产值表示; 林地以林业产值表示; 其他农用地参考冯长春等<sup>[23]</sup>的研究; 第二、三产业产值表征城镇工矿及交通水利建设用地; 渔业产值表征水域; 旅游业收入表征其他建设用地; 农林牧渔服务产值表征农村居民点; 不考虑滩涂沼泽及自然保留地。以上不同用地类型的经济效益均为增加值 (已减去中间过程的消耗), 以单位面积增加值表示。考虑到三种发

展情景下的目标各有侧重,故采用德尔菲法确定权重,在咨询城市规划、土地规划、生态学领域专家的基础上,结合专家意见,确定三种发展情景下的相应权重分别为0.5、0.8和0.2,具体计算公式为:

$$Z_1 = \max \sum_{i=1}^n K_i x_i \quad (9)$$

式中:  $Z_1$  为区域土地利用经济总效益;  $x_i$  为第  $i$  类土地利用类型的面积;  $K_i$  为第  $i$  类土地利用类型单位面积经济产出系数。

### 2.1.2 生态效益目标

根据燕守广等<sup>[25]</sup>计算出的江苏省陆地生态服务价值结果,采用生物量参数修正法修正,以减少区域生态服务价值的差异,计算得到金坛区各类用地单位面积的生态服务价值。耕地的生态效益采用农田生态服务价值表示;采用森林与农田的平均生态效益表征园地的生态效益;林地以森林生态服务价值表示;其他农用地以耕地、园地、林地、牧草地的平均生态效益表示;水域、滩涂沼泽以中国陆地生态系统中水体和湿地的生态服务价值表示;城镇工矿用地、农村居民点、交通水利建设用地因受城镇污染排放、农村面源污染、大气水面污染等影响,生态服务价值均为负,相应的生态效益也为负;其他建设用地以间接功能价值表示其生态效益;自然保留地以中国陆地生态系统中荒漠的生态服务价值表示<sup>[26]</sup>。采用德尔斐法并综合专家意见,不同发展情景下的相应权重分别设为0.5、0.2和0.8,具体公式为:

$$Z_2 = \max \sum_{i=1}^n p_i x_i \quad (10)$$

式中:  $Z_2$  为区域土地利用生态总效益;  $x_i$  为第  $i$  类土地利用类型的面积;  $p_i$  为第  $i$  类土地利用类型单位面积生态系统服务价值。

通过计算,2030年金坛区各类用地单位面积的经济效益和生态效益系数见表3。

表3 金坛区各类用地单位面积经济、生态效益系数

Table 3 Economic and ecological efficiency coefficient per unit area in Jintan district (万元/hm<sup>2</sup> 年)

效益系数	耕地	园地	林地	其他农用地	城镇工矿用地	农村居民点	其他建设用地	交通水利建设用地	水域	滩涂沼泽	自然保留地
经济系数	6.3	30.5	1.7	10.4	2738.3	18.9	4125.6	2738.3	25.34	0	0
生态系数	0.61	1.27	1.93	1.1	-2.11	-2.11	1.2	-2.51	4.07	5.55	0.04

## 2.2 约束条件

### 2.2.1 宏观控制约束

基于《金坛市土地利用总体规划(2006-2020)》和《金坛城市总体规划(2013-2030)》,参考相关国家标准,对目标年研究区各地类数量进行限定。其中,其他建设用地(包含风景名胜设施用地)和滩涂沼泽具有较高的经济效益或生态效益,但难以通过其他地类转化得到,故其数量设为常数,取2020年金坛区土地利用总体规划中的目标值。

### 2.2.2 土地可持续利用约束

参考谢花林等<sup>[27]</sup>的研究,从自然生态环境与经济发展相协调的角度,利用“压力—状态—响应”框架构建土地可持续利用综合指数( $S$ ),以此反映土地利用的可持续性。

所包含的评价指标包括：人均建设用地、耕地压力指数、城市化水平、单位耕地化肥负荷、单位土地面积GDP、生态用地占比、生物多样性指数、土地结构多样性指数、水土协调度、土地保护政策、基本农田面积控制指标、土地污染处理率、环境污染治理本年投资占GDP的比例和农田有效灌溉率。通过层次分析法与熵值法确定各指标的权重，计算土地可持续利用综合指数，设定阈值0.6~0.7为基本可持续利用，0.7~0.8为较好可持续利用，0.8~1.0为最优可持续利用。

2.2.3 乡村振兴与城乡融合约束

乡村振兴是推进城乡融合的重大战略，也是全面建成小康社会的必然要求。城乡融合应以明确村镇地位、调整空间结构、强化中心功能为基础，实现城镇与村庄空间融合、功能契合，达到城乡发展可持续<sup>[28]</sup>。土地利用结构优化作为城乡发展的基础，需要综合考虑城乡用地比例约束、配套协调约束、开发强度约束等内容。研究区土地利用结构优化约束集见表4。

2.3 不同发展情景下的土地利用结构优化结果

在不同发展情景下，基于本研究设定的经济效益与生态效益权重，分别得到3种发展情景下的目标函数，通过Lingo 12软件，在宏观控制、土地可持续利用、乡村振兴与产业融合三大类约束下，求取三种发展情景下的土地利用优化结构，见表5。

2.3.1 自然演变情景

自然演变情景下可产生经济效益 $3.71 \times 10^7$ 万元、生态效益 $7.82 \times 10^4$ 万元，与2020年

表4 金坛区土地利用结构优化约束条件  
Table 4 The optimization conditions of land use structure optimization in Jintan district

约束名称	约束因素	约束表达式	约束条件解释
总量约束	土地面积	$x_1 + x_2 + \cdots + x_{11}$ = 总面积	土地总面积不变
规划目标约束	耕地面积	$x_1 \geq$ 耕地保有量	约束性指标
	园地面积	$0.5 \times 2020\text{年规划值} \leq x_2$ $x_2 \leq 1.5 \times 2020\text{年规划值}$	约束性指标
	林地面积	$x_3 \geq 2020\text{年规划值}$	约束性指标
	其他农用地面积	$x_4 \geq 2020\text{年规划值}$	约束性指标
	城镇工矿用地面积	$x_5 > 2020\text{年规划值}$	约束性指标
	农村居民点面积	$x_6 > 2020\text{年规划值}$	约束性指标
	其他建设用地面积	$x_7 = 2020\text{年规划值}$	恒定指标
	交通水利建设用地面积	$x_8 > 2020\text{年规划值}$	约束性指标
	水域面积	$2020\text{年规划值} \leq x_9$ $x_9 \leq 1.2 \times 2020\text{年规划值}$	约束性指标
	滩涂沼泽	$x_{10} = 2020\text{年规划值}$	恒定指标
土地可持续利用约束	自然保留地	$x_{11} > 2020\text{年规划值}$	约束性指标
	土地可持续利用综合指数	$0.6 \leq S \leq 1$	弹性指标
城乡用地比例约束 <sup>[1]</sup>	城乡用地比例	$1.5 \leq R \leq 5$	弹性指标
配套协调约束 <sup>[1]</sup>	交通水利建设用地面积	$x_8 = x_5 \times 0.79$	发展规律数据
开发强度约束 <sup>[2]</sup>	土地开发强度	$(x_5 + x_6 + x_8) / \text{土地总面积} \leq 0.2$	环境最宜居

注：1. 城乡用地比例约束范围和配套协调约束系数参考《江苏省土地利用总体规划2006-2020》中城乡用地面积比例和交通水利建设用地占城镇工矿用地面积比例，根据历史变化趋势，结合城乡融合发展理念确定；2. 开发强度约束系数参考国际宜居标准中的土地开发强度比例。



表5 不同情景下金坛区土地利用优化结构及目标

Table 5 Land use optimization structure and target in Jintan district under different scenarios

变量符号	变量名称	2020 规划值	情景 1(自然演变)	情景 2(经济优先)	情景 3(生态优先)
$x_1$	耕地/hm <sup>2</sup>	42810.00	42810.00	42810.00	42810.00
$x_2$	园地/hm <sup>2</sup>	4676.41	3818.39	2110.08	5110.09
$x_3$	林地/hm <sup>2</sup>	9255.30	8604.51	8114.34	12925.65
$x_4$	其他农用地/hm <sup>2</sup>	10989.02	10989.02	10409.02	10989.02
$x_5$	城镇工矿用地/hm <sup>2</sup>	5219.16	7235.64	10175.31	5219.16
$x_6$	农村居民点/hm <sup>2</sup>	6110.08	4076.80	2073.46	2073.46
$x_7$	其他建设用地/hm <sup>2</sup>	163.72	163.72	163.72	163.72
$x_8$	交通水利建设用地/hm <sup>2</sup>	4122.94	5716.15	8038.50	4123.14
$x_9$	水域/hm <sup>2</sup>	13680.27	13680.27	13200.07	13680.27
$x_{10}$	滩涂沼泽/hm <sup>2</sup>	225.35	157.75	157.75	157.75
$x_{11}$	自然保留地/hm <sup>2</sup>	340.01	340.01	340.01	340.01
$\sum_{i=1}^{11} x_i$	土地总面积/hm <sup>2</sup>	97592.26	97592.26	97592.26	97592.26
$F_1(x)$	经济效益/万元	$2.73 \times 10^7$	$3.71 \times 10^7$	$5.14 \times 10^7$	$2.72 \times 10^7$

规划值相比,经济效益提高了36%、生态效益降低了8%。就土地利用结构而言,城镇工矿用地和交通水利建设用地均增加了39%,由于这两类用地的经济系数较高,故经济效益提升较为显著;园地和林地均有所降低,导致生态效益降低;在建设用地规模总量控制下,城镇工矿用地面积的增加导致农村居民点面积下降了2000 hm<sup>2</sup>。自然演变背景下的土地利用结构变化体现了当前发展模式下的惯性趋势,区域经济社会发展的同时将带来一定的生态环境损失,经济与生态总体处于折中发展状态。

2.3.2 经济优先情景

经济优先情景下,城乡融合现象明显,城镇工矿用地与交通水利用地面积显著增加,经济效益提高至 $5.14 \times 10^7$ 万元,较2020年规划值增长88%,生态效益降低为 $6.47 \times 10^4$ 万元,降低了24%。与情景一相比可以理解为,通过牺牲17%的生态效益换取了39%的经济效益。此情景下,园地、林地、其他农用地、水域、滩涂沼泽的面积均小幅减小,而农村居民点减幅度较大。此时城市发展所需的用地空间主要通过城乡用地增减挂钩、拆村并点、废弃工矿用地及低效闲置用地复垦等方式获取。

2.3.3 生态优先情景

在自然资源统筹发展与综合管制的背景下,生态效益成为区域发展的优先目标。该情景下生态效益大幅提升,增加至 $10.07 \times 10^4$ 万元,分别较2020规划值、情景一和情景二提高了19%、29%和56%。同时经济效益降低至 $2.72 \times 10^7$ 万元,与上述不同情景相比,分别降低0.4%、27%和47%。该情景下,园地、林地面积分别提高到5110.09 hm<sup>2</sup>和12925.65 hm<sup>2</sup>,城镇工矿用地以及交通水利建设用地与2020规划值相差别不大,这也从侧面反映出,在生态效益最大化的目标,城市规模扩张将受到遏制,基于当前城市规划、土地规划乃至多规合一的技术环境,经济效益与生态效益实现共赢存在较大难度。

2.4 土地利用布局优化法则

选择高程、坡度、坡向、降水等自然因子,与城市距离、与镇中心距离、与水体距

离、与等级道路距离、与乡村道路距离等交通区位因子,联合利用夜间灯光数据差值形成的栅格化GDP<sup>[29]</sup>、人口密度<sup>[30]</sup>等社会经济因子,以及耕地质量因子作为驱动因子,在GeoSOS-FLUS模型中进行神经网络计算,逐栅格分析各土地类型的出现概率。

在土地利用布局优化模拟时,需要保持现有生态廊道不受破坏,并考虑自然保护区、宽阔水面等自然保留地对区域土地利用的控制作用。在生态廊道构建中,选取生物多样性保护、水资源安全和土壤保持等三项指标进行生态重要性评价,将研究区生态用地划分为非常重要、重要、较重要、一般和不重要等5级,提取非常重要级别的生态用地作为生态源地;利用最小累积阻力面模型划定生态保护区,使用Linkage Mapper计算最小累积耗费距离路径,进而确定潜在生态廊道<sup>[31]</sup>。各发展情景下对生态廊道的规避率有所不同,自然演变情景、经济效益优先情景和生态效益优先情景下,生态廊道的规避率分别为80%、60%和100%。

在GeoSOS-FLUS模型中叠加限制转换地类图层和生态廊道图层,根据土地利用历史变化趋势,结合不同发展情景设定基础系数,确定地类转换矩阵,以作为地类扩张水平确定的依据,对目标年土地利用进行二次优化。

## 2.5 土地利用布局优化结果

以2005年为基础,利用GeoSOS-FLUS模型,在自然演变情景下对研究区2015年的土地利用布局进行模拟,经与实际情况对比,ROC值为0.9516、Kappa指数为0.7743,模型精度满足要求。故以2015年土地利用现状图为基础,在相应的数量控制和准则控制下,对2030年研究区三种发展情景下的土地利用布局进行优化,结果见图2。

### 2.5.1 自然演变情景

该情景下,面对兼顾经济社会发展和生态保护要求,研究区农村居民点大幅减少,其空间为城镇工矿用地、林地与园地所替换。同时,水域面积也减小了1%,均转换为耕地。在该情景下,城市规模有所扩张,进而带来经济效益增加。采用Fragstats 4软件对研究区土地利用空间格局进行景观指数计算,平均分维数为1.13、景观分离度为0.96、香农多样性指数为1.35、聚合度指数为93.83。此时中心城镇布局较为规则,整体破碎化程度适中,不同景观类型的空间聚合度适中。从空间布局角度,城镇空间在中心城镇区略微扩张的同时生态空间有所增加,土地利用整体布局由集中化发展转向均衡化发展,城镇空间与生态空间处于协同发展态势。

### 2.5.2 经济优先情景

该情景下,研究区内的园地和林地均有所减少,城镇用地扩张未出现向城镇中心集聚的现象,呈现分散的“满天星”布局。由于城市建设需求,部分自然保留地被开发为城镇工矿用地和交通水利用地。该情景景观类型下的景观指数计算结果是:平均分维数为1.44、景观分离度为0.97、香农多样性指数为1.24、聚合度指数为92.13。此时中心城镇布局较为分散,整体破碎化程度较高,不同景观类型在空间上的聚合程度较低。从空间布局角度,城镇空间呈扩张态势,城镇化水平进一步提升,扩张区域多集中在非城镇中心区,生态空间功能发挥欠佳,绿色斑块面积减小,土地利用整体布局呈“城镇空间>生态空间”态势,两极分化现象较为明显。

### 2.5.3 生态优先情景

生态优先发展情景下,研究区城镇工矿用地与交通水利建设用地增加有限,大多由

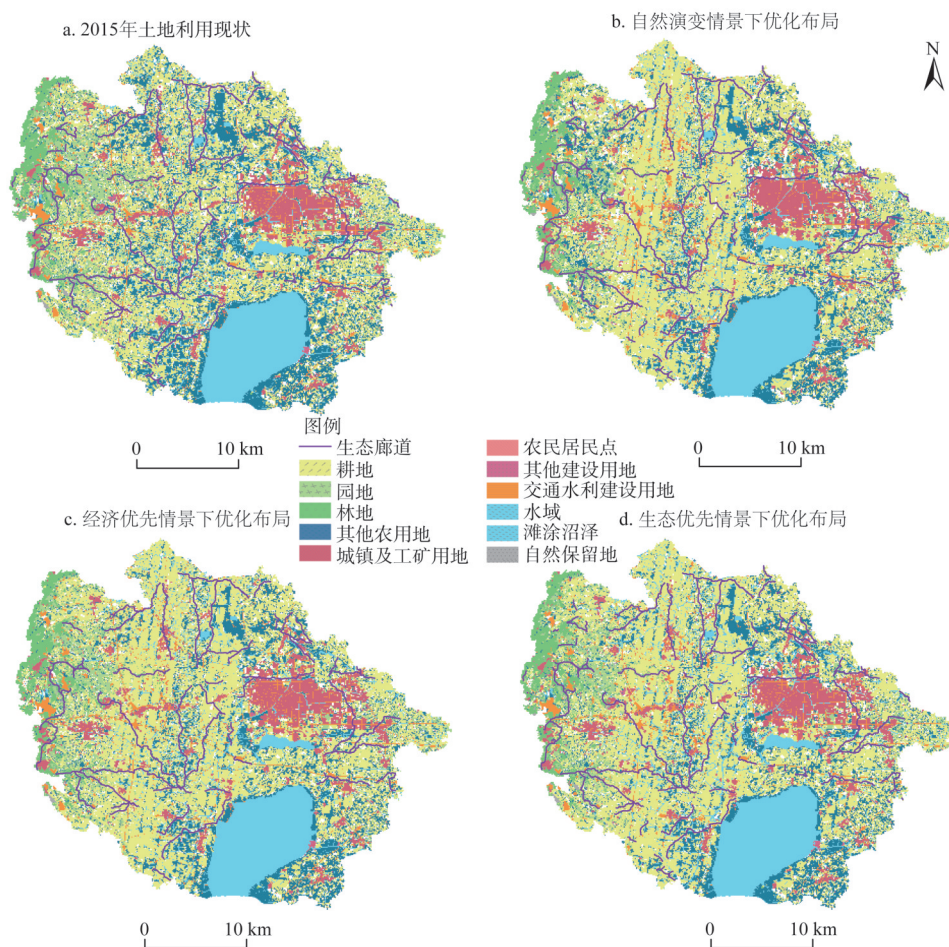


图2 金坛区不同情景下土地利用优化布局

Fig. 2 Land use optimization layout in Jintan District under different scenarios

零散的农村居民点经过“拆村并点”所替换；耕地空间布局未发生明显变化，部分其他农用地和少量坑塘水面经整治成为优质耕地；区内林地、园地、滩涂沼泽和水域均有所增加，生态效果改善明显，为提升研究区整体生态服务价值提供了支撑。该情景下研究区景观指数计算结果是：平均分维数为1.11、景观分离度为0.94、香农多样性指数为1.61、聚合度指数为95.46。此时中心城镇布局较为规则，整体破碎化程度较低，不同景观类型的空间聚合度较高。从空间布局角度，城镇空间改善较弱但生态空间功能作用明显，区域内绿色斑块显著增加，土地利用整体布局呈“生态空间>城镇空间”态势。

## 2.6 不同情景综合评判

经过优化后，金坛区土地利用的经济—生态整体效益都有所提高。通过对比三种情景下的土地利用结构与布局优化结果发现：在经济优先情景下，土地利用的经济效益最大而生态效益最小，城镇工矿用地和交通水利建设用地面积虽然显著增加，但中心城镇布局较为分散、整体破碎化程度高；相反，在生态优先情景下，土地利用结构朝着生态效益大的用地类型变动，林地、园地等面积增加明显，但此时随着生态效益增长，尽管



整体效益增加,但经济效益大幅下降;由于金坛区具备“全国生态示范区”和“全国工业百强区”的双重角色,故选取土地利用结构和布局优化方案时,应保证区域发展目标相对均衡,在保证生态效益增加的基础上兼顾经济效益。在自然演变情景下,经济发展和生态保护处于折中状态,城镇工矿用地面积的增加保证了经济效益的提升,而林地、园地面积的增加则维护了金坛区的生态平衡。所以,建议在自然演变情景下进行土地利用结构与布局优化,加强城乡土地利用与生态保护协调发展,促进空间布局均衡化。

### 3 结论与讨论

针对当前土地利用规划理论和实践中存在的数量结构约束不系统、空间管控法则不全面、模型精度不理想等问题,本研究通过集成MOP与GeoSOS-FLUS模型,设定三种发展情景,采用“上下结合”的建模方法,在数量约束中引入宏观控制约束、土地可持续利用约束、乡村振兴与城乡融合约束,在空间管控法则中综合考虑区域发展特点及生态廊道规避等实际问题,通过案例研究得到以下主要结论:(1)通过集成MOP和GeoSOS-FLUS模型,采用“结构+约束+布局+准则”方式进行县域土地利用结构与布局优化,有利于优化土地利用数量结构,完善土地利用空间布局,提升土地利用优化效率。(2)在土地利用结构优化方面,城镇工矿用地数量在自然演变和经济效益优先情景下分别增加了39%和95%;林地在生态效益优先情景下增加了40%,而在自然演变和经济效益优先情景下分别减少了7%和12%;农村居民点在3种情景下分别减少33%、66%和66%。在土地利用布局优化方面,自然演变情景下,中心城镇布局较规则,整体破碎化程度适中,土地利用整体布局由集中化发展转向均衡化发展;经济效益优先情景下,中心城镇布局分散加剧,区域景观破碎度提升,土地利用整体布局呈“城镇空间>生态空间”态势;生态效益优先情景下,中心城镇布局较为规则,整体破碎化程度有所改善,整体生态效益明显提升,土地利用整体布局呈“生态空间>城镇空间”态势。(3)金坛区在城市化进程中,应关注土地利用可持续问题,在保障经济效益提高的基础上加强生态保护,通过自然资源整合、国土综合整治等途径,促进土地结构与布局优化。

由于基础数据的限制和对建模复杂性的控制,目前研究内容中数量结构约束条件和空间布局管控法则的考虑仍较为简单,并且假设政策调控方式不发生变化,这可能导致研究结果的全面性与时效性存在偏差。后期研究中,将在模型运算中进一步补充基础数据、控制标准、政策调控等内容,以便更好地实现对区域土地利用规划结构与布局优化的全局控制。

#### 参考文献(References):

- [1] 许小亮,李鑫,肖长江,等.基于CLUE-S模型的不同情景下区域土地利用布局优化.生态学报,2016,36(17): 5401-5410. [XU X L, LI X, XIAO C J, et al. Land use layout optimization under different scenarios by using the CLUE-S model. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(17): 5401-5410.]
- [2] 龚建周,刘彦随,张灵.广州市土地利用结构优化配置及其潜力.地理学报,2010,65(11): 1391-1400. [GONG J Z, LIU Y S, ZHANG L. The optimal allocation of land use and its potential appraisal in Guangzhou city. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(11): 1391-1400.]
- [3] 赵丹,李锋,王如松.基于生态绿当量的城市土地利用结构优化:以宁国市为例.生态学报,2011,31(20): 6242-6250.



- [ZHAO D, LI F, WANG R S. Optimization of urban land structure based on ecological green equivalent: A case study in Ningguo city, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(20): 6242-6250.]
- [4] 王观湧, 张乐, 于化龙, 等. 基于生态安全的土地利用结构优化研究. *土壤通报*, 2015, 46(6): 1321-1327. [WANG G Y, ZHANG L, YU H L, et al. Research on optimization of land use structure in Baoding urban agglomeration based on ecological security. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46(6): 1321-1327.]
- [5] 黄海. 基于改进粒子群算法的低碳型土地利用结构优化: 以重庆市为例. *土壤通报*, 2014, 45(2): 303-306. [HUANG H. Optimization of low-carbon land use structure based on improved particle swarm optimization algorithm: A case study in Chongqing Municipality. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(2): 303-306.]
- [6] 赵荣钦, 黄贤金, 揣小伟. 区域土地利用结构的碳效应评估及低碳优化. *农业工程学报*, 2013, 29(17): 220-229. [ZHAO R Q, HUANG X J, CHUAI X W. Carbon effect evaluation and low-carbon optimization of regional land use. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(17): 220-229.]
- [7] 曾永年, 王慧敏. 以低碳为目标的海东市土地利用结构优化方案. *资源科学*, 2015, 37(10): 2010-2017. [ZENG Y N, WANG H M. Optimization of land use structure for low-carbon targets in Haidong city, Qinghai Plateau. *Resources Science*, 2015, 37(10): 2010-2017.]
- [8] NEWLAND C P, MAIER H R, ZECCHIN A C, et al. Multi-objective optimisation framework for calibration of Cellular Automata land-use models. *Environmental Modelling & Software*, 2018, 100: 175-200.
- [9] WANG Q, LIU R, MEN C, et al. Application of genetic algorithm to land use optimization for non-point source pollution control based on CLUE-S and SWAT. *Journal of Hydrology*, 2018, 560: 86-96.
- [10] KAIM A, CORD A F, VOLK M. A review of multi-criteria optimization techniques for agricultural land use allocation. *Environmental Modelling & Software*, 2018, 105: 79-93.
- [11] 张明, 朱会义, 何书金. 典型相关分析在土地利用结构研究中的应用: 以环渤海地区为例. *地理研究*, 2001, 20(6): 761-767. [ZHANG M, ZHU H Y, HE S J. An application of canonical correlation analysis to research on land-use patterns: Taking Bohai Rim as an example. *Geographical Research*, 2001, 20(6): 761-767.]
- [12] 张旻, 周成虎, 戴锦芳, 等. 偏最小二乘回归方法在土地利用结构研究中的应用. *自然资源学报*, 2004, 19(6): 804-810. [ZHANG Y, ZHOU C H, DAI J F, et al. An application of partial least-squares regression method to the study of land use patterns. *Journal of Natural Resources*, 2004, 19(6): 804-810.]
- [13] STOOORVOGEL J J. Linking GIS and models: Structure and operationalization for a Costa Rican case study. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 1995, 43: 19-29.
- [14] STOOORVOGEL J J. Usted: A methodology for a quantitative analysis of land use scenarios. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 1995, 43: 5-18.
- [15] ZHOU M. An interval fuzzy chance-constrained programming model for sustainable urban land-use planning and land use policy analysis. *Land Use Policy*, 2015, 42: 479-491.
- [16] LU S, GUAN X, ZHOU M, et al. Land resources allocation strategies in an urban area involving uncertainty: A case study of Suzhou, in the Yangtze River Delta of China. *Environmental Management*, 2014, 53(5): 894-912.
- [17] 郑荣宝, 董玉祥, 陈梅英. 基于 GEOM 与 CA+ANN 模型的土地资源优化配置与模拟. *自然资源学报*, 2012, 27(3): 497-509. [ZHENG R B, DONG Y X, CHEN M Y. Simulation on optimized allocation of land resource based on GEOM and CA+ANN model. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(3): 497-509.]
- [18] 李鑫, 马晓冬, 肖长江, 等. 基于 CLUE-S 模型的区域土地利用布局优化. *经济地理*, 2015, 35(1): 163-172. [LI X, MA X D, XIAO C J, et al. The regional land use layout optimization based on the CLUE-S model. *Economic Geography*, 2015, 35(1): 163-172.]
- [19] 陈影, 张利, 何玲, 等. 基于多模型结合的土地利用结构多情景优化模拟. *生态学报*, 2016, 36(17): 5391-5400. [CHEN Y, ZHANG L, HE L, et al. Multi-scenario simulation of land use structure based on dual combined models. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(17): 5391-5400.]
- [20] STEWART T J, JANSSEN R. A multiobjective GIS-based land use planning algorithm. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2014, 46: 25-34.

- [21] 郭小燕, 刘学录, 王联国. 基于混合蛙跳算法的土地利用格局优化. 农业工程学报, 2015, 31(24): 281-288. [GUO X Y, LIU X L, WANG L G. Land use pattern optimization based on shuffled frog leaping algorithm. Transactions of the CSAE, 2015, 31(24): 281-288.]
- [22] 冉娜, 金晓斌, 范业婷, 等. 基于土地利用冲突识别与协调的“三线”划定方法研究: 以常州市金坛区为例. 资源科学, 2018, 40(2): 284-298. [RAN N, JIN X B, FAN Y T, et al. "Three Lines" delineation based on land use conflict identification and coordination in Jintan district, Changzhou. Resources Science, 2018, 40(2): 284-298.]
- [23] 冯长春, 曹敏政, 谢婷婷. 不同生态保育尺度下铜陵市土地利用结构优化. 地理研究, 2014, 33(12): 2217-2227. [FANG C C, CAO M Z, XIE T T. Optimization of land use structure in Tongling city based on different ecological conservation scales. Geographical Research, 2014, 33(12): 2217-2227.]
- [24] LIU X, 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. Landscape and Urban Planning, 2017, 168: 94-116.
- [25] 燕守广, 张慧, 李海东, 等. 江苏省陆地和生态红线区域生态系统服务价值. 生态学报, 2017, 37(13): 4511-4518. [YAN S G, ZHANG H, LI H D, et al. Ecosystem service values of the entire land area and ecological redlines in Jiangsu province. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(13): 4511-4518.]
- [26] 李鑫, 欧名豪, 刘建生, 等. 基于不确定性理论的区域土地利用结构优化. 农业工程学报, 2014, 30(4): 176-184. [LI X, OU M H, LIU J S, et al. Regional land use structure optimization under uncertain theory. Transactions of the CSAE, 2014, 30(4): 176-184.]
- [27] 谢花林, 刘曲, 姚冠荣, 等. 基于PSR模型的区域土地利用可持续性水平测度: 以鄱阳湖生态经济区为例. 资源科学, 2015, 37(3): 449-457. [XIE H L, LIU Q, YAO G R, et al. Measuring regional land use sustainability of the Poyang Lake Eco-economic Zone based on PSR modeling. Resources Science, 2015, 37(3): 449-457.]
- [28] 刘彦随. 中国新时代城乡融合与乡村振兴. 地理学报, 2018, 73(4): 637-650. [LIU Y S. Research on the urban-rural integration and rural revitalization in the new era in China. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(4): 637-650.]
- [29] ELVIDGE C D, SUTTON P C, GHOSH T, et al. A global poverty map derived from satellite data. Computers & Geosciences, 2009, 35(8): 1652-1660.
- [30] 柏中强, 王卷乐, 杨雅萍, 等. 基于乡镇尺度的中国25省区人口分布特征及影响因素. 地理学报, 2015, 70(8): 1229-1242. [BAI Z Q, WANG J L, YANG Y P, et al. Characterizing spatial patterns of population distribution at township level across the 25 provinces in China. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(8): 1229-1242.]
- [31] 王千, 金晓斌, 周寅康. 江苏沿海地区耕地景观生态安全格局变化与驱动机制. 生态学报, 2011, 31(20): 5903-5909. [WANG Q, JIN X B, ZHOU Y K. Dynamic analysis of coastal region cultivated land landscape ecological security and its driving factors in Jiangsu. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(20): 5903-5909.]

## Coupled MOP and GeoSOS-FLUS models research on optimization of land use structure and layout in Jintan district

CAO Shuai<sup>1</sup>, JIN Xiao-bin<sup>1,2,3</sup>, YANG Xu-hong<sup>1,2,3</sup>, SUN Rui<sup>1</sup>, LIU Jing<sup>1</sup>,

HAN Bo<sup>1</sup>, XU Wei-yi<sup>1</sup>, ZHOU Yin-kang<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. Ministry of Land and Resources Key Laboratory of Coastal Zone Development and Protection, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 3. Natural Resources Research Center of Nanjing University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** Faced with the background of natural resources integration and the more complex land use structure, it is difficult to effectively meet the demand for rational land use planning with a single land use structure optimization method. Considering the objectives of sustainable utilization of land use, ecological civilization, rural development, and urban-rural integration, we constructed an integrated system for land use structure and layout optimization, which will play a positive role in improving the applicability of planning. This study first sets three scenarios of natural evolution, economic priority, and ecological priority, and then uses the MOP model (multi-objective planning model) to calculate the optimal land use structure under different scenarios. Finally, it can carry on land use layout optimization based on the GeoSOS-FLUS model in 2030, Jintan district, Jiangsu province, China. Results show that, by integrating the MOP and GeoSOS-FLUS models and adopting the "Structure + Constraint + Layout + Criterion" approach to optimize the land use structure and layout in the county, it is conducive to optimize the quantitative land use structure and improve the land use spatial distribution; from the results of the case analysis, the area of industrial and mining land in cities and towns has increased by 39% and 95% under the natural evolution and economic efficiency priority scenarios; the forest land has increased by 40% under the eco-efficiency priority scenario; rural settlements decreased by 33%, 66% and 66%, respectively in the three scenarios. Under the three development scenarios, the spatial pattern will face the two-level differentiation of urban space and ecological space. In the later period of regional development, it is necessary to strengthen the coordinated development of urban and rural land use and ecological protection, and promote a balanced spatial distribution.

**Keywords:** land use structure; land use layout; MOP model; GeoSOS-FLUS model; optimization; Jintan