

基于生态价值与生态产品价值实现潜力权衡的全域土地综合整治用地优化

游和远, 张津榕, 夏舒怡

(浙江财经大学公共管理学院, 杭州 310018)

摘要: 全域土地综合整治用地优化是满足不同整治目标下差异化的用地需求, 缓解潜在用地冲突的重要途径。以海南省儋州市全域土地综合整治起步区国家级试点项目区为研究区, 基于生态价值增长目标与生态产品价值实现目标之间的权衡, 为全域土地综合整治用地设定生态价值优先和生态产品价值实现潜力优先两种整治情景, 以2019年试点项目区三调成果为现状, 运用多目标规划模型和GeoSOS-FLUS模型分析两种整治情景下的用地结构优化和用地布局优化。结果表明: 生态价值优先整治情景下, 与现状相比, 试点项目区红树林地和水田规模增加明显; 整体景观分离程度较高, 分布更加均衡且破碎。生态产品价值实现潜力优先整治情景下, 与生态价值优先整治情景相比, 试点项目区红树林地和水田增加规模有所变小, 但商业服务业用地规模明显增加; 整体景观进一步破碎化。两种整治情景的用地布局与《儋州市全域土地综合整治起步区国家级试点实施方案》中的全域土地综合整治建设项目布局相似与差异并存。因此全域土地综合整治若增加生态价值与提高生态产品价值实现潜力需要统筹配置各用地类型, 同时也要关注优化用地后可能对景观格局产生的影响。

关键词: 生态产品价值; 全域土地综合整治; 多目标规划模型; GeoSOS-FLUS模型; 用地优化; 儋州市

全域土地综合整治源于“千村示范、万村整治”工程, 通过调整全域地类结构与布局优化农村生产、生活、生态空间, 促进乡村空间重构、产业重整、环境重生^[1]。当前全域土地综合整治普遍开展了生态修复, 促进生态价值增长。但生态价值增长并非必然转换为经济收益增长, 因此需要通过多样化的模式和路径将生态价值转化为经济价值, 推动生态产品价值实现^[2]。只是全域土地综合整治以生产物质产品、提供生态服务与生态衍生权利交易等途径发掘生态产品价值实现潜力, 特别是增加建设用地发展旅游、商业、教育等产业, 很可能制约生态修复增加生态价值^[3]。因此对不同整治目标的权衡会导致全域土地综合整治用地需求的差异, 甚至潜在的用地冲突^[4,5]。那么当全域土地综合整治在生态价值增长目标与生态产品价值实现目标之间做出权衡时, 需要针对性地优化土地利用结构与布局, 并弄清其规律。

依托土地利用优化, 全域土地综合整治通过“人口—土地—产业”等要素整合, 优化调整乡村空间^[4]。土地利用优化作为全域土地综合整治的主要工具, 指在土地利用变化的基础上, 通过调整土地利用结构和布局, 以适应经济、社会和环境可持续发展的需要^[6]。土地利用结构优化中, 线性规划^[7]、模糊数学^[8]、神经网络算法^[9]、多目标规划^[10]等被广泛

收稿日期: 2023-04-14; 修订日期: 2023-07-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(71874151); 浙江省自然科学基金重点项目(LZ22G030005)

作者简介: 游和远(1983-), 男, 浙江温州人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为土地利用管理。

E-mail: youheyuan@gmail.com

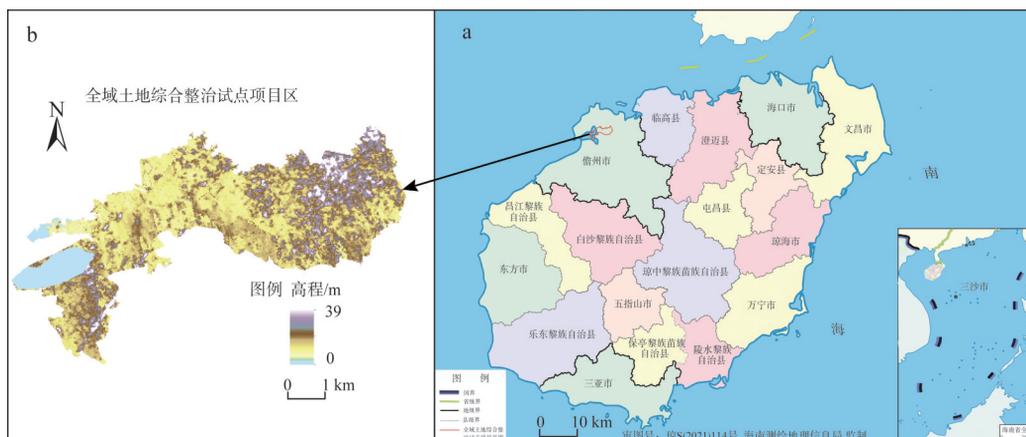
使用。土地利用结构优化通过优化配置各种地类的数量实现了土地利用中的经济利益—生态系统服务平衡、城市土地生态适宜化利用、碳排放总量控制、生态优先、生态—经济协调发展等方面的目标^[7-11]。土地利用布局优化通过运用GIS技术实现了土地资源配资从数量优化向空间优化的深化。土地利用布局优化中,元胞自动机^[12]、多智能体模型^[13]、CLUE-S模型^[14,15]、FLUS模型^[16]、GeoSOS-FLUS模型^[17]等为代表的空间模拟工具被广泛使用。模拟工具在多情景土地利用格局优化^[10,14,18]、城市增长边界划定^[16]、三生空间功能格局优化^[19]、轨道交通影响分析^[20]等土地利用布局优化领域进行了运用。因此运用现有的工具,也可以实现基于生态价值与生态产品价值实现潜力权衡的全域土地综合整治用地优化。

全域土地综合整治应该均衡配置生产、生活、生态空间。生态空间通过提供生态产品或生态系统服务保障了生产空间与生活空间效用的发挥,而生产和生活空间则承载了生态空间发挥功能所需的生产过程和配套公共服务^[21]。全域土地综合整治中生产、生活、生态空间的功能互补、有效融合可以实现增加生态价值与促进生态产品价值。只是全域土地综合整治中将生态产品价值通过市场化或非市场化手段转换为经济收益这一过程能否实现,不仅需要国土空间的优化,也受制于市场需求、基础设施配套、体制机制要求等条件。因此本文用生态产品价值实现潜力来表征全域土地综合整治建设项目实施后可能实现的生态产品价值大小。以海南省儋州市全域土地综合整治起步区国家级试点项目区为研究区(起步区国家级试点项目区简称“试点项目区”,下同),根据儋州市全域土地综合整治起步区国家级试点实施方案》中的儋州市全域土地综合整治试点项目区主要建设项目,探究如何基于不同整治目标合理安排各地类的数量与位置来完成整治建设项目。一方面,试点项目区全域土地综合整治中推进滨海湿地生态系统修复和退塘还林还湿,期望增加生态价值。另一方面,试点项目区又得增加建设用地来发展旅游、商业、教育等产业,促进生态产品价值实现。那么在有限的土地面积约束下,全域土地综合整治用地的结构与布局调整就面临着增加生态价值与促进生态产品价值实现之间的权衡。为此,本文多目标全域土地综合整治用地布局优化通过设置生态价值与生态产品价值实现潜力之间不同的优先序来描述这种权衡关系,分为两种整治情景:一种是生态价值优先于生态产品价值实现潜力,全域土地综合整治建设项目实施中首先确保生态价值最大化(生态价值优先);另一种是生态产品价值实现潜力优先于生态价值,全域土地综合整治建设项目实施中首先确保生态产品价值实现潜力最大化(生态产品价值实现潜力优先)。通过观察两种情景下全域土地综合整治用地优化结果,揭示不同整治情景下全域土地综合整治中湿地、耕地、园地、商业服务业用地等布局的差异,以及生产、生活、生态空间演化特征。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

本文研究区为儋州市天角潭—北门江—新英湾全域土地综合整治起步区国家级试点项目区(图1)。试点项目区位于儋州市中北部地区,包括黄江村、长村、五里村、七里村、黄玉村、攀步村、新地村、兰田村等八个行政村,土地面积为30.98 km²。2019年末整治前试点项目区土地利用结构如图2所示:水田、旱地、园地、林地与草地分别占总



注：本图基于海南测绘地理信息局标准地图服务系统下载的标准地图制作，底图无修改。

图1 研究区区位图

Fig. 1 Location of the research area

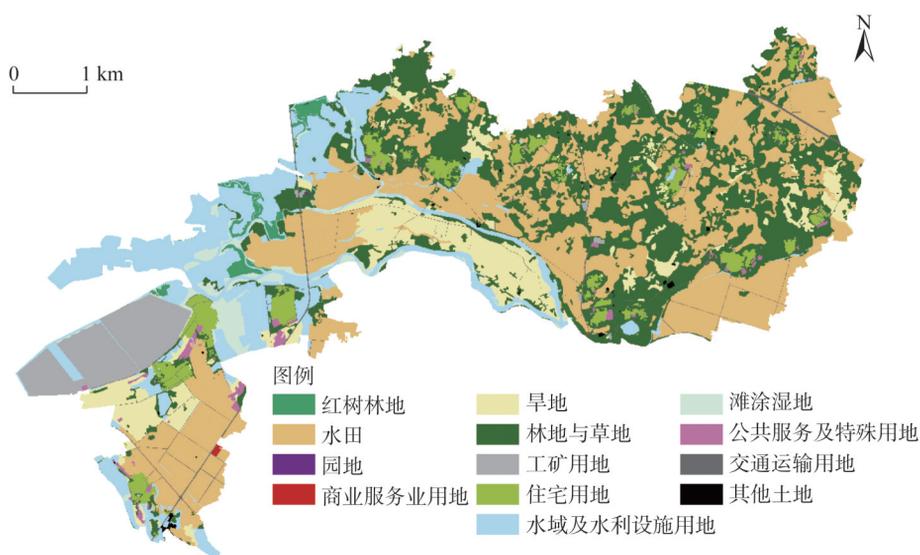


图2 2019年试点项目区土地利用现状

Fig. 2 Land use status in the pilot project zone in 2019

面积的33.60%、9.73%、0.01%、26.29%；商业服务业用地、住宅用地、工矿用地、水域及水利设施用地、公共服务及特殊用地、交通运输用地占总面积的0.04%、4.44%、5.22%、14.79%、0.77%、1.52%；红树林地、滩涂湿地、其他土地占总面积的1.12%、2.27%、0.19%。试点项目区土地集中连片，地势平坦，大部分坡度小于6%，局部坡度在25%~90%之间，补充耕地资源潜力大，可以通过农用地整理提高耕地质量和数量。试点范围内村庄存在零星建设用地和150 hm²已经废弃多时的新英盐场，可以通过建设用地整理改善人居环境。试点项目区生态本底较好，田、林、水、湿地要素齐备，生物资源丰富，但受当地盐场建设和坑塘养殖的破坏，试点项目区红树林地的面积萎缩严重，可以通过生态保护修复提升湿地资源质量。

根据《儋州市全域土地综合整治起步区国家级试点实施方案》，试点项目区通过实施农用地整理项目垦造耕地项目可新增耕地 114.30 hm²；旱地改水田项目规模 126.65 hm²。通过建设用地复垦项目拆旧总面积 123.76 hm²，预计复垦为水田 2.10 hm²，复垦为林地与园地 121.67 hm²。通过生态保护修复项目拟退塘还林（还滩）面积共计 296.13 hm²，通过养殖塘平整和生境改造，修复红树林 268.33 hm²。通过产业布局和引入，配套建设 5 个产业项目，建设总规模为 41.43 hm²。试点项目区全域土地综合整治建设项目布局见图 3。



图 3 试点项目区全域土地综合整治建设项目布局

Fig. 3 Construction project layout of comprehensive land consolidation in the pilot project zone

1.2 数据来源

数据说明见表 1。首先基于 2016 年试点项目区土地变更调查成果数据库以及试点项目区三调成果数据库（2019 年），统一矢量数据的范围以及地理与投影坐标系，并转换为 10 m×10 m 的栅格数据，生成试点项目区 2016 年和 2019 年的土地利用现状栅格数据。其次将其余矢量数据基于试点项目区三调成果数据库（2019 年）进行配准并转换为统一格式的栅格数据。再次基于 ASTER GDEM V3 提取试点项目区 DEM 数据，并生成试点项目区的坡度、坡向数据；基于 OpenStreetMap 开源地图，提取 2019 年儋州市交通路网数据，并通过欧氏距离计算不同地类到乡镇中心、等级公路的距离；基于中国长时间序列逐年人造夜间灯光数据集提取 2019 年儋州市的夜间灯光数据，综合上述成果作为试点项目区土地利用驱动因子。最后采用空间配准和镶嵌的操作将生态红线内土地提取为土地利用的限制转换面。

1.3 研究方法

1.3.1 生态价值评估

全域土地综合整治后的生态价值评估核算期为一年。多数生态价值的评估为静态评估^[22,23]，因此本文生态价值评估对象为全域土地综合整治后形成了稳定生态系统服务功能

表1 数据说明

Table 1 Data description

数据类型	数据来源	数据说明	数据用途
土地利用数据	2016年试点项目区土地变更调查成果数据库	比例尺1:1万	基础数据
	试点项目区三调成果数据库(2019年)	比例尺1:1万	基础数据
统计数据	儋州市统计年鉴	2020年	相关统计数据
	海南统计年鉴	2015—2019年	相关统计数据
规划数据	《儋州市全域土地综合整治起步区国家级试点区域发展策划》文本	文本	约束条件参考
	《儋州市全域土地综合整治起步区国家级试点区域发展策划》规划图	图件	空间布局参考
	《儋州市全域土地综合整治起步区国家级试点实施方案》文本	文本	约束条件参考
	儋州市全域土地综合整治起步区国家级试点项目区生态红线	矢量图	限制转化区域
DEM数据	ASTER GDEM V3版(2019年)	30 m高程数据	自然地形驱动因子
夜间灯光数据	中国长时间序列逐年人造夜间灯光数据集(2019年)	1 km×1 km	社会经济驱动因子
交通图	OpenStreetMap 开源地图(2019年)	比例尺1:1万	交通区位驱动因子

的生态系统。采用由谢高地等^[24]改进过的当量因子法估算全域土地综合整治主要建设项目的生态价值。谢高地等^[24]在 Costanza 等^[25]和谢高地等^[26]的研究基础上,更新了中国的单位面积价值当量表。1个标准单位的生态系统服务价值当量因子为研究区1公顷平均产量的农田每年自然粮食产量的经济价值(即农田食物生产的经济价值)。多数研究中1个生态服务价值当量因子的经济价值量等于研究区当年平均粮食单产市场价值的1/7^[26,27]。一般基于稻米、小麦和玉米三大主要粮食估算1个生态服务价值当量因子的经济价值量。但儋州市本地基本不生产小麦和玉米,因此基于稻谷来计算1个生态服务价值当量因子的经济价值量。根据国家粮食海南交易中心的平台成交价格结果,2019年海南省稻米的成交价格为2.3~3元/kg之间,本文取中位数为2.65元/kg。根据《儋州市统计年鉴2020年》,2019年儋州市粮食总产量为135191 t,粮食播种面积为352799亩(1亩≈667 m²)。根据《海南统计年鉴》,2015—2019年海南省复种指数为179.1%、171.3%、161.5%、162.4%、158.7%。本文取算数平均值为166.6%。最终计算得到儋州市1个生态服务价值当量因子的经济价值量为3625元/(hm²·年)。

将《儋州市全域土地综合整治起步区国家级试点实施方案》中安排的主要建设项目进行整理后(表2),估算主要建设项目地类改变后的生态价值。该实施方案中的地类标准为第三次全国国土调查土地分类标准,因此对第三次全国国土调查土地分类标准与谢高地等^[24]成果中的生态价值地类进行归类匹配,以满足生态价值计算的需要。基于中国单位面积生态服务价值当量表^[24]以及儋州市1个生态服务价值当量因子的经济价值量,以儋州市各地类单位面积价值当量表表征其单位面积生态价值,即生态价值系数。考虑到儋州市当地植被以阔叶林和灌草丛为主,因此以阔叶林与灌草丛生态价值系数的平均值来估算园地的生态价值系数。考虑到篇幅限制,并未列出试点项目区有关地类生态价值系数的详细计算过程。

结合建设项目实施后形成的各最终地类面积,求出建设项目实施后获得的生态价值

表2 儋州市全域土地综合整治试点项目区主要建设项目

Table 2 Main construction projects of the pilot project zone in comprehensive land consolidation in Danzhou city

类型	主要建设项目	最终地类	对应生态价值地类
农用地整理	农用地整理实施“旱改水”	水田	水田
	农用地整理实施耕地开垦	水田	水田
建设用地整理	宅基地复垦为水田	水田	水田
	盐场建设用地整理为红树林	红树林地	湿地
	矿山复垦为园地	果园或其他园地	阔叶林与灌草丛平均值
	建设热带花卉苗木产业园	其他园地	阔叶林与灌草丛平均值
产业引入与生态保护修复	发展高效果林发展区	果园	阔叶林与灌草丛平均值
	建设红树林生态旅游体验区项目	红树林地	湿地
	建设儒学耕读书院、儒学养生庄园、儿童萌宠庄园和田园文创庄园	商业服务业设施用地	—
	建设历史文化与乡村民俗商业街	商业服务业设施用地	—

总量，计算公式如下：

$$V = \sum_{j=1}^m A_j T_j \quad (1)$$

式中： V 为全域土地综合整治建设项目实施后获得的生态价值总量（万元/年）； A_j 为第 j 种全域土地综合整治建设项目最终地类面积（ hm^2 ）； T_j 为第 j 种地类的全部生态系统服务功能的单位面积生态价值 [元/（ $\text{hm}^2 \cdot \text{年}$ ）]。

1.3.2 生态产品价值实现潜力评估

基于儋州市全域土地综合整治试点项目区主要建设项目，确定了试点项目区的生态产品价值实现方式。将全域土地综合整治生态产品价值实现潜力分为生态产品转换为物质产品、生态产品转换为生态服务和生态产品转换为生态衍生权利三类（表3）。

全域土地综合整治生态产品价值实现潜力计算公式如下：

表3 儋州市全域土地综合整治生态产品价值实现潜力

Table 3 Realization potential of ecological product value in comprehensive land consolidation in Danzhou city

潜力内容	生态产品价值实现方式	产出结果
转换为物质产品	开发水田发展生态农业	粮食、水产
	建设热带花卉苗木产业园	热带兰花卉
	发展高效果林发展区培育特色果蔬产业	蜜柚、冬季瓜菜、精品果蔬、烟草、菠萝、槟榔、胡椒等高附加值林果产品
	依托沿海红树林湿地发展红树林特色产业	红树林果实、树皮、渔业产品
转换为生态服务	建设红树林生态旅游体验区项目	生态旅游服务
	建设儒学耕读书院、儒学养生庄园、儿童萌宠庄园和田园文创庄园	文化教育服务
	建设历史文化与乡村民俗商业街	商业经营服务
	通过海洋生态保护修复项目修复红树林湿地	灾害防护价值
转换为生态衍生权利	红树林固碳结果参与碳排放交易	碳排放权
	红树林水体净化结果参与交易	排污权

$$P = \sum_{i=1}^n S_i U_i \quad (2)$$

式中： P 为全域土地综合整治建设项目实施后的生态产品价值实现潜力（万元/年）； S_i 为第*i*种生态产品价值实现方式涉及的地类面积（ hm^2 ）； U_i 为第*i*种生态产品价值实现方式中单位土地面积的生态产品价值实现潜力 [元/（ $\text{hm}^2 \cdot \text{年}$ ）]，即生态产品价值实现潜力系数。

试点项目区生态产品价值实现潜力评估涉及的地类主要有水田、湿地、园地、商业服务业用地。按照不同地类生态产品价值实现中各方式单位面积潜在收益，涉及新增水田粮食收益潜力、种植花卉园地的热带兰花卉收益潜力、果蔬林果种植用途土地的果蔬林果产品收益潜力、红树林果实收益潜力、红树林渔业增产收益潜力、红树林生态旅游体验区的旅游服务门票生态补偿收益潜力、儒学耕读书院/儒学养生庄园/儿童萌宠庄园和田园文创庄园的生态补偿收益潜力、商业经营设施用地的生态补偿收益潜力、红树林灾害防护价值生态补偿收益潜力、红树林固碳价值转换为碳排放权交易收入潜力、红树林净化价值转换为排污权交易收入潜力，最终确定各地类生态产品价值实现潜力系数（表4）。

表4 试点项目区有关地类生态价值系数及生态产品价值实现潜力系数

Table 4 Coefficients of ecological value and realization potential of ecological product value related to land type in the pilot project zone [元/（ $\text{hm}^2 \cdot \text{年}$ ）]

系数	to land type in the pilot project zone [元/（ $\text{hm}^2 \cdot \text{年}$ ）]						
	红树林地	水田	园地		商业服务业用地		
			花卉苗木用途	果蔬林果用途	生态旅游服务用途	文化教育服务用途	商业经营服务用途
生态价值系数	188572.80	14101.60	77285.20	77285.20	0	0	0
生态产品价值实现潜力系数	40740.00	7500.00	57975.00	53280.00	62355.00	81033.00	79215.00

1.3.3 多目标规划模型

多目标规划模型（Multi-objective Programming, MOP）用于全域土地综合整治用地结构优化分析。MOP模型包含目标函数与约束条件，实现在主观或客观条件下，规划某个或多个目标达到最值的决策。本文设置生态价值优先以及生态产品价值实现潜力优先两种整治情景和约束条件。

（1）整治情景设定

基于生态价值增长目标与生态产品价值实现目标之间的权衡，全域土地综合整治用地设定两种整治情景。①生态价值优先整治情景：全域土地综合整治以试点项目区生态价值总量最大化为优先目标，扩张生态价值量较高的土地面积，修复与维护当地的生态环境。②生态产品价值实现潜力优先整治情景：全域土地综合整治，在保护生态环境的前提下，合理利用自然资源，提高生态产品的转换效率和实现潜力，以生态产品价值的实现潜力最大化为优先目标，适量扩张有利于生态产品价值实现的地类。基于式（1），生态价值优先情景下，建设项目实施后优先获得最大生态价值总量的公式如下，式中变量内涵与式（1）一致：

$$\text{Max} V = \text{Max} \sum_{j=1}^m A_j T_j \quad (3)$$

基于式（2），生态产品价值实现潜力优先情景下，建设项目实施后优先获得最大生态产品价值实现潜力的公式如下，式中变量内涵与式（2）一致：

$$\text{Max}P = \text{Max} \sum_{i=1}^n S_i U_i \quad (4)$$

(2) 约束条件设定

MOP模型约束条件见表5，具体解释如下。

① 整治目标约束

旱地、林地与草地、住宅用地、水域及水利设施用地优化后将出现面积的减少，但这四种地类必须保留适当的面积来维持其功能，因此按照现状用地面积的比例根据设置下限。试点项目区内工矿用地约为160 hm²，其中占地150 hm²的新英废弃盐场，在蓝色海湾红树林修复任务中明确将工矿用地整治为红树林湿地，因此设置优化后工矿用地不大于10 hm²。除此之外，滩涂湿地、公共服务及特殊用地、交通运输用地以及其他土地的空间分布与用途转换受土地管理政策、自然地形限制，因此将其数量设置为土地利用现状值，不再改变。

② 用途转换约束

根据《儋州市全域土地综合整治起步区国家级试点实施方案》，土地综合整治中新增的红树林地、水田、园地、商业服务业用地总规模约为500 hm²。试点项目区现状园地面积仅为0.37 hm²，因此优化为花卉苗木用途和果蔬林果用途的园地面积之和为优化后园地面积。同理，商业服务业用地现状面积仅为1.37 hm²，因此优化为生态旅游服务用途、文化教育服务用途、商业经营服务用途的商业服务业用地面积之和为优化后商业服务业用地面积。

③ 用地保护约束

《海南省人民政府办公厅关于开展全域土地综合整治试点的意见》中要求新增耕地面积原则上不少于原有耕地面积的5%，因此设置约束表达式“ $X_2 + Z_1 \geq 1.05 \times (\text{现状水田面积} + \text{现状旱地面积})$ ”，要求优化后耕地面积不少于现状耕地面积的1.05倍。试点项目要全面落实蓝色海湾红树林修复任务，规划中明确将工矿用地整治为红树林湿地，因此设置“ $X_1 - \text{现状红树林地面积} \geq \text{现状工矿用地面积} - Z_3 + 0.5 \times (\text{现状水域及水利设施用地面积} - Z_5)$ ”，要求新增红树林面积需不少于工矿用地减少面积和水域及水利设施用地减少面积的一半之和。此外，设置“ $X_1 - \text{现状红树林地面积} \geq X_2 - \text{现状水田面积} + X_3 - \text{现状园地面积}$ ”，期望红树林地新增面积不少于新增水田和园地面积之和。

④ 用地配套约束

全域土地综合整治要满足不同类型的建设项目用地需要。根据试点项目区的相关建设方案，在园地、商业服务业用地以及相对的花卉苗木用途、果蔬林果用途、生态旅游服务用途、文化教育服务用途、商业经营服务用途等用地面积之间建立一定比例的配套关系。

1.3.4 GeoSOS-FLUS模型

元胞自动机、多智能体模型等经典空间模拟工具存在着难以确定合适的空间分辨率和地类转换规则等不足。黎夏等^[17]、Liu等^[28]改进了FLUS模型，建立了GeoSOS-FLUS模型用于模拟和预测人类活动与自然影响下的土地利用变化。本文中GeoSOS-FLUS模型步骤和处理如下：(1) 将2016年试点项目区土地变更调查成果数据库地类转换为三调地类，从而匹配2019年试点项目区三调成果数据库，用于模型精度验证。(2) 选择高程、

表5 试点项目区全域土地综合整治用地结构优化约束条件

Table 5 Constraint conditions of land structure optimization for comprehensive land consolidation in the pilot project zone

约束类型	约束因素	约束表达式
整治目标约束	土地总面积 S	$X_1+X_2+X_3+X_4+Z_1+Z_2+Z_3+Z_4+Z_5+B_1+B_2+B_3+B_4=S$
	红树林地 X_1 、水田 X_2 、园地 X_3 、商业服务业用地 X_4	$X_1 \geq$ 现状用地面积、 $X_2 \geq$ 现状用地面积、 $X_3 \geq$ 现状用地面积、 $X_4 \geq$ 现状用地面积
	旱地面积 Z_1	$0.8 \times$ 现状用地面积 $Z_1 \leq$ 现状用地面积
	林地与草地 Z_2	$0.7 \times$ 现状用地面积 $Z_2 \leq$ 现状用地面积
	工矿用地 Z_3	$Z_3 \leq 10 \text{ hm}^2$
	住宅用地 Z_4	$0.7 \times$ 现状用地面积 $Z_4 \leq$ 现状用地面积
	水域及水利设施用地 Z_5	$0.65 \times$ 现状用地面积 $Z_5 \leq$ 现状用地面积
	滩涂湿地 B_1 、公共服务及特殊用地 B_2 、交通运输用地 B_3 、其他土地 B_4	$B_1=$ 现状用地面积、 $B_2=$ 现状用地面积、 $B_3=$ 现状用地面积、 $B_4=$ 现状用地面积
	用途转换约束	土地增减平衡
全域土地整治地类转换总面积		$X_1 - \text{现状红树林地面积} + X_2 - \text{现状水田面积} + X_3 - \text{现状园地面积} + X_4 - \text{现状商业服务业用地面积} = 500 \text{ hm}^2$
花卉苗木用途与果蔬林果用途转换总面积		$X_3 = X_{31} + X_{32}$
生态旅游服务用途、文化教育服务用途、商业经营服务用途转换总面积		$X_4 = X_{41} + X_{42} + X_{43}$
用地保护约束	耕地保护	$X_2 + Z_1 \geq 1.05 \times (\text{现状水田面积} + \text{现状旱地面积})$
	红树林保护1	$X_1 - \text{现状红树林地面积} \geq \text{现状工矿用地面积} - Z_3 + 0.5 \times (\text{现状水域及水利设施用地面积} - Z_5)$
	红树林保护2	$X_1 - \text{现状红树林地面积} \geq X_2 - \text{现状水田面积} + X_3 - \text{现状园地面积}$
用地配套约束	园地与水田配套	$X_3 - \text{现状园地} \geq (X_2 - \text{现状水田}) \times 0.25$
	园地、商业服务业用地与水田配套	$X_3 - \text{现状园地} + X_4 - \text{现状商业服务业用地} \geq X_2 - \text{现状水田面积}$
	商业服务业用地与住宅用地、林地与草地配套	$X_4 - \text{现状商业服务业用地} \geq \text{现状住宅用地面积} - Z_4 + 0.2 \times (\text{现状林地与草地面积} - Z_2)$
	花卉苗木用途与林地与草地、水域及水利设施用地配套	$X_{31} \geq 0.1 \times (\text{现状林地与草地面积} - Z_2) + 0.1 \times (\text{现状水域及水利设施用地面积} - Z_5)$
	果蔬林果用途与花卉苗木用途配套	$X_{32} \geq X_{31} \times 2$
	生态旅游服务用途与红树林地配套	$X_{41} \geq (X_1 - \text{现状红树林地}) \times 0.1$
	文化教育服务用途与商业经营服务用途配套	$X_{42} \geq X_{43} \times 0.5$
	商业经营服务用途与生态旅游服务用途配套	$X_{43} \geq X_{41} \times 1.5$

注：(1) 变量 X 、 Z 、 B 为优化后地类面积 (hm^2)，其中 X 为优化后面积增加地类， Z 为优化后面积减少地类， B 为优化后面积不变地类。(2) X_{31} 与 X_{32} 分别为花卉苗木用途与果蔬林果用途用地面积 (hm^2)， X_{41} 、 X_{42} 、 X_{43} 分别为生态旅游服务用途、文化教育服务用途、商业经营服务用途用地面积 (hm^2)。

坡度、坡向等作为自然地形驱动因子。选择与乡镇中心距离、高等级公路距离等交通区位因子和人造夜间灯光数据作为社会经济因子。运用神经网络进行适宜性分析，逐栅格计算试点项目区内各地类出现概率。(3) 因生态红线内实施特殊保护，因此提取生态保护区域图层作为限制转换面予以保护。(4) 叠加生态保护区域图层，结合不同情景设置基础系数以及地类间转换矩阵，再对2019年土地利用现状分别进行生态价值优先整治情景和生态产品价值实现潜力优先整治情景的模拟优化。(5) 因“蓝色海湾”工程，试点项目区西南部原新英盐场作为废弃工矿用地必须恢复为红树林地，但大面积集中的工矿用地会显著影响适宜性分析结果，因此在进行适宜性分析前，先将原新英盐场所属工矿用地转换为红树林地。

2 结果分析

2.1 全域土地综合整治用地结构优化结果

全域土地综合整治建设项目实施后的最终地类面积若导致了该地类面积的增加，那么优化后的该地类面积为现状地类面积与全域土地综合整治建设项目最终地类面积之和。基于Lingo 18平台，在整治目标、用途转换、用地保护、用地配套四类约束下，求取生态价值优先和生态产品价值实现潜力优先两种整治情景下的全域土地综合整治用地结构优化结果(表6)。

生态价值优先整治情景下，试点项目区红树林地、水田、园地、商业服务业用地比

表6 试点项目区全域土地综合整治用地结构优化

Table 6 Land use structure optimization of comprehensive land consolidation in the pilot project zone

变量	变量名称	2019年现状	整治情景1 (生态价值优先)	整治情景2(生态产品 价值实现潜力优先)	
X_1	红树林地/hm ²	34.86	250.51	220.17	
X_2	水田/hm ²	1040.90	1169.05	1145.62	
X_3	园地/hm ²	0.31	花卉苗木用途/hm ²	29.27	26.97
			果蔬林果用途/hm ²	58.53	53.93
X_4	商业服务业用地/hm ²	1.37	生态旅游服务用途/hm ²	21.56	40.23
			文化教育服务用途/hm ²	16.17	30.17
			商业经营服务用途/hm ²	32.35	60.35
Z_1	旱地/hm ²	301.40	262.87	263.79	
Z_2	林地与草地/hm ²	814.42	570.09	570.09	
Z_3	工矿用地/hm ²	161.52	10.00	10.00	
Z_4	住宅用地/hm ²	137.35	120.08	96.15	
Z_5	水域及水利设施用地/hm ²	458.27	409.92	432.93	
B_1	滩涂湿地/hm ²	70.39	70.39	70.39	
B_2	公共服务及特殊用地/hm ²	23.69	23.69	23.69	
B_3	交通运输用地/hm ²	47.18	47.18	47.18	
B_4	其他土地/hm ²	5.98	5.98	5.98	
V	建设项目实施后获得的生态价值总量/(万元/年)	—	4923.34	4264.99	
P	建设项目实施后的生态产品价值实现潜力/(万元/年)	—	1966.05	2238.67	

现状均有较大幅度的增加,而旱地、林地与草地、工矿用地、住宅用地、水域及水利设施用地比现状均有较大幅度的减少。生态产品价值实现潜力优先整治情景下,试点项目区红树林地、水田、园地增加规模比生态价值优先整治情景有所降低,而商业服务业用地规模则明显增加。生态价值整治优先情景下,建设项目实施后获得的生态价值总量为4923.34万元/年,比生态产品价值实现潜力优先整治情景增加了15.44%。生态产品价值实现潜力优先整治情景下,全域土地综合整治建设项目实施后的生态产品价值实现潜力为2238.67万元/年,比生态价值优先整治情景增加了13.87%。

2.2 全域土地综合整治用地布局优化结果

GeoSOS-FLUS模型经过训练与模拟,OA指数为0.936,Kappa指数为0.918,模型精度满足后续分析要求。因此以2019年土地利用现状数据库为基础数据,对试点项目区全域土地综合整治用地进行布局优化。试点项目区生态价值优先布局优化模拟与生态产品价值实现潜力优先布局优化模拟见图4。

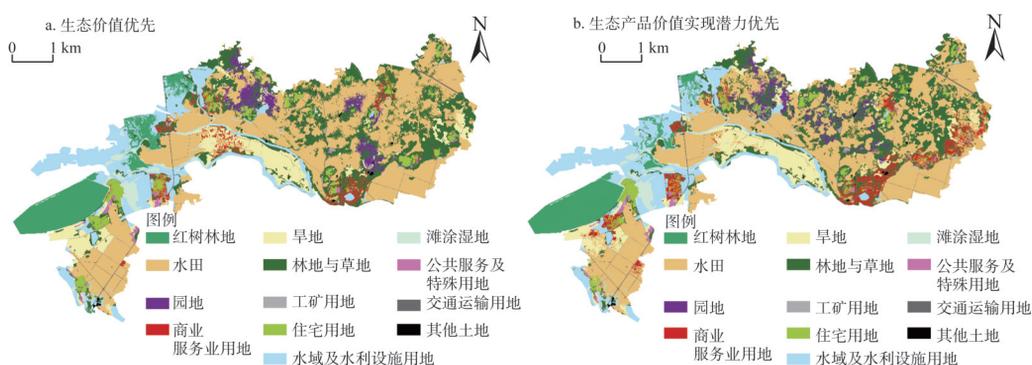


图4 儋州市试点项目区全域土地综合整治用地布局优化

Fig. 4 Land use layout optimization of comprehensive land consolidation in Danzhou city

采用Fragstats 4.2软件对试点项目区2019年土地利用现状及两种整治情景下的土地利用景观格局进行景观指数计算,得出试点项目区土地利用整体景观指数(表7)。两种整治情景与现状比较,景观分离度指数无明显变化,均表现出较高的景观分离程度;生态产品价值实现潜力优先情景的香浓多样性指数高于生态价值优先情景,两种整治情景的香浓多样性指数均高于现状,表明两种整治情景下各地类的分布比现状更加均衡;生态价值优先情景的聚合度指数高于生态产品价值实现潜力优先情景,两种整治情景的聚合度指数均低于现状,表明两种整治情景下各地类的分布更加破碎。

对各地类聚合度指数进一步分析(表8),分析不同景观类型内部斑块的聚合程度,并结合各地类的空间分布解释两种情景下地类间的相互转换。生态价值优先情景相比现状,红树林地和园地的聚合度指数有所提高,其余地类的聚合度指数均有不同幅度的减

表7 试点项目区土地利用整体景观指数

Table 7 Overall landscape index of land use in the pilot project zone

景观指数	土地利用现状	生态价值优先情景	生态产品价值实现潜力优先情景
景观分离度指数	0.95	0.96	0.97
香浓多样性指数	1.77	1.87	1.89
聚合度指数	90.30	86.28	85.14

表8 试点项目区主要地类的景观聚合度指数

Table 8 Aggregation index of different types of land in the pilot project zone

地类	土地利用现状	生态价值优先情景	生态产品价值实现潜力优先情景
红树林地	86.25	94.94	94.87
水田	93.71	91.91	91.05
园地	69.39	75.18	63.14
商业服务业用地	90.16	58.93	66.31
旱地	91.76	88.36	87.77
林地与草地	88.38	78.92	78.40
工矿用地	98.58	87.42	87.42
住宅用地	87.34	82.85	76.81
水域及水利设施用地	91.69	90.09	90.64

少。而生态产品价值实现潜力优先情景相比现状及生态价值优先情景，红树林地的聚合度指数高于现状但低于生态价值优先情景，商业服务业用地与水域及水利设施用地的聚合度指数高于生态价值优先情景但低于现状，工矿用地的聚合度指数与生态价值优先情景相同但低于现状，其余地类的聚合度指数均低于土地利用现状及生态价值优先情景。

生态价值优先整治情景下，红树林地聚合度指数为94.94，与现状相比集聚程度有较大提高，景观分布高度集中，主要分布在西部水域及沿海的原工矿用地，面积上较现状有显著扩张，新增红树林地主要由水域及水利设施用地以及西南部的工矿用地转换而来。水田聚合度指数为91.91，与现状相比集聚程度有所降低，景观分布高度集中，分布范围仍主要位于试点项目区的东部、中部和西南部，面积较现状有所扩张，新增水田主要由分布在东部、北部的林地和旱地转换而来。园地聚合度指数为75.18，与现状相比集聚程度有所提高，景观分布较为离散，分布范围主要集中在试点项目区的东部和北部，面积上较现状有显著扩张，新增园地主要由林地与草地、旱地以及少量住宅用地转换而来。商业服务业用地聚合度指数为58.93，与现状相比集聚程度有较大降低，景观分布高度破碎，主要分布在中部交通线路及居民点附近，面积较现状有显著扩张，新增商业服务业用地主要由住宅用地、林地与草地和旱地转换而来。旱地聚合度指数为88.36，与现状相比集聚程度有所下降，景观分布较为集中，中部地区旱地缩减面积主要转换为商业服务业用地，东部及北部地区旱地缩减面积则主要转换为水田与园地。林地与草地聚合度指数为78.92，与现状相比集聚程度有较大降低，景观分布较为离散，东部及北部林地与草地缩减面积主要转换为水田、园地和商业服务业用地。工矿用地聚合度指数为87.42，与现状相比集聚程度有较大降低，景观分布较为集中，西南部集中连片的工矿用地转换为红树林地，面积较现状有显著缩减。住宅用地聚合度指数为82.85，与现状相比集聚程度有所降低，景观分布较为集中，东部、北部住宅用地缩减面积主要转换为商业服务业用地和林地与草地。水域及水利设施用地聚合度指数为90.09，与现状相比集聚程度有所下降，景观分布高度集中，缩减面积主要转换为红树林地。

生态产品价值实现潜力优先整治情景下，红树林地聚合度指数为94.87，与生态价值优先整治情景相比集聚程度有所降低，面积有所缩减，但景观分布状况及扩张来源基本一致。水田聚合度指数为91.05，与生态价值优先整治情景相比集聚程度有所降低，面积有所缩减，景观分布高度集中，新增面积主要由北部林地与草地及旱地转换而来。园地

聚合度指数为63.14,与生态价值优先整治情景相比集聚程度有所降低,面积有所缩减,景观分布较为破碎,新增面积主要由北部、中部的林地与草地、旱地及少量住宅用地转换而来,形态上更加破碎。商业服务业用地聚合度指数为66.31,与生态价值优先整治情景相比集聚程度有较大提高,面积有显著扩张,景观分布较为破碎,新增面积主要由林地与草地、旱地及住宅用地转换而来,并在东部、中部与西部沿交通线路和居民点扩张。旱地聚合度指数为87.77,与生态价值优先整治情景相比集聚程度有所降低,面积略有扩张,景观分布较为集中,中部的旱地得到更多保留而东部与北部的旱地则更多转换为园地及商业服务业用地。林地与草地聚合度指数为78.40,与生态价值优先整治情景相比集聚程度略有下降,面积保持不变,景观分布较为离散,北部的林地与草地得到更多保留,而东部的林地与草地更多转换为商业服务业用地。工矿用地聚合度指数为87.42,与生态价值优先整治情景相比面积和集聚程度均无变化且景观分布状况一致。住宅用地聚合度指数为76.81,与生态价值优先整治情景相比集聚程度有所降低,面积有所缩减,景观分布较为离散,东部和西部的住宅用地更多转换为商业服务业用地。水域及水利设施用地聚合度指数为90.64,与生态价值优先整治情景相比集聚程度有所提高,面积有所扩张。

两种整治情景的用地布局与《儋州市全域土地综合整治起步区国家级试点实施方案》中的全域土地综合整治建设项目布局(图3)相似与差异并存。两种整治情景下,红树林的布局位置与建设项目布局图大致相同,但其布局规模则小于建设项目布局中的规模。其主要原因是在多目标规划当中限制了全域土地综合整治中新增地类的总规模。此外,本文突出了全域土地综合整治中生态产品价值实现目标,因此需要优先布局足够数量的生态产品价值实现潜力系数较大的地类。两种整治情景下,旱地改水田项目规模都要小于建设项目布局中的规模,且布局位置与建设项目布局图存在差异。其主要原因是以当量因子法估算的生态价值中,水田由于水资源的消耗,生态价值要低于旱地,而建设项目布局中“旱改水”的规模一般较大,但以生态价值优先甚至生态价值次优的整治则需要限制旱地向水田的转换。两种整治情景下,新增产业项目(商业服务业用地)的布局规模均大于建设项目布局图,不同之处在于生态产品价值实现潜力优先整治情景下,新增产业项目布局范围同建设项目布局图中的规划较为接近,东、中、西部均有分布,而生态价值优先情景下,新增产业项目布局范围主要集中在中部。其主要原因是产业项目在实现生态产品价值转换当中发挥着重要作用,因而本文更加突出了产业项目与各用地类型之间的布局配套,这也使得产业项目的规模扩大。

3 结论与讨论

3.1 结论

全域土地综合整治在增加生态价值与提高生态产品价值实现潜力之间的权衡,将导致差异化的用地需求。本文以儋州市全域土地综合整治试点项目区为研究区,通过集成MOP与GeoSOS-FLUS模型,分析了生态价值优先和生态产品价值实现潜力优先两种整治情景下,全域土地综合整治用地优化结果。研究结论如下:(1)生态价值和生态产品价值实现潜力优先序的不同,会导致差异化的全域土地综合整治用地优化结果。(2)全域土地综合整治用地结构优化中,生态价值优先整治情景下,与现状相比,试点项目区红树林地和水田规模明显增加。生态产品价值实现潜力优先整治情景下,与生态价值优先整治情景相比,试点项目区红树林地和水田增加规模有所变小但仍大于现状,而商业

服务业用地规模明显增加。(3) 全域土地综合整治用地布局优化中, 两种整治情景与现状比较, 整体景观均表现出较高的景观分离程度, 分布比现状更加均衡且破碎。(4) 两种整治情景的用地布局与《儋州市全域土地综合整治起步区国家级试点实施方案》中的全域土地综合整治建设项目布局相似与差异并存。

3.2 讨论

本文提供了重要政策启示:(1) 全域土地综合整治应统筹配置各用地类型以辅助增加生态价值与提高生态产品价值实现潜力。本文发现不论是增加生态价值还是提高生态产品价值实现潜力, 都需要不同地类的保障, 但实现不同目标会导致不同地类的此消彼长。因此全域土地综合整治应按照“区域—功能—项目”有针对性配置满足生产、生活、生态各类需求的土地, 利用生态空间保障生产空间与生活空间效用的发挥, 利用生产空间与生活空间提供生态空间中生态产品价值实现所需的生产和交换功能。(2) 全域土地综合整治应耦合社会经济要素优化用地布局。本文发现不同情景下的全域土地综合整治, 在差别化的空间安排了各类整治建设项目来增加生态价值与促进生态产品价值实现。这些整治建设项目统筹“山水林田湖草沙”生命共同体系统治理, 但其项目布局仍受经济水平、交通条件、文化习俗等社会经济要素的制约。因此全域土地综合整治应实现土地要素与社会经济要素协同治理, 基于特定的整治目标, 厘清用地布局与社会—经济系统相互影响, 追求经济、社会、生态三者的协同最优。(3) 全域土地综合整治应合理确定“旱改水”规模。本文发现两种整治情景下的“旱改水”规模要小于实施方案中的建设项目“旱改水”规模, 其主要原因是水田需要消耗大量的水资源从而损害生态价值。因此全域土地综合整治中“旱改水”要从土地适宜性出发, 提前做好水资源调查, 宜水则水, 宜旱则旱。

参考文献(References):

- [1] 董祚继, 韦艳莹, 任聪慧, 等. 面向乡村振兴的全域土地综合整治创新: 公共价值创造与实现. 资源科学, 2022, 44(7): 1305-1315. [DONG Z J, WEI Y Y, REN C H, et al. Comprehensive land improvement innovation for rural revitalization: Public value creation and realization. Resources Science, 2022, 44(7): 1305-1315.]
- [2] 谢花林, 陈倩茹. 生态产品价值实现的内涵、目标与模式. 经济地理, 2022, 42(9): 147-154. [XIE H L, CHEN Q R. The connotation, goal and mode of realizing the value of ecological products. Economic Geography, 2022, 42(9): 147-154.]
- [3] 王晨旭, 刘焱序, 于超月, 等. 国土空间生态修复布局研究进展. 地理科学进展, 2021, 40(11): 1925-1941. [WANG C X, LIU Y X, YU C Y, et al. Research progress on the arrangement of territorial ecological restoration. Progress in Geography, 2021, 40(11): 1925-1941.]
- [4] 范业婷, 金晓斌, 张晓琳, 等. 乡村重构视角下全域土地综合整治的机制解析与案例研究. 中国土地科学, 2021, 35(4): 109-118. [FAN Y T, JIN X B, ZHANG X L, et al. Mechanism analysis and case study of comprehensive land consolidation from the perspective of rural restructuring. China Land Science, 2021, 35(4): 109-118.]
- [5] 王威, 胡业翠. 改革开放以来我国国土整治历程回顾与新构想. 自然资源学报, 2020, 35(1): 53-67. [WANG W, HU Y C. The new conception and review of territory consolidation based on the past years of reform and opening-up. Journal of Natural Resources, 2020, 35(1): 53-67.]
- [6] SUN X, YANG P, TAO Y, et al. Improving ecosystem services supply provides insights for sustainable landscape planning: A case study in Beijing, China. Science of the Total Environment, 2022, 802: 149849, Doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.149849.
- [7] MA S H, WEN Z Z. Optimization of land use structure to balance economic benefits and ecosystem services under uncertainties: A case study in Wuhan, China. Journal of Cleaner Production, 2021, 311: 127537, Doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127537.
- [8] RAHMAN M M, SZABÓ G. Multi-objective urban land use optimization using spatial data: A systematic review. Sustainable Cities and Society, 2021, 74, 103214, Doi: 10.1016/j.scs.2021.103214.
- [9] 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.]
- [10] 曹帅, 金晓斌, 杨绪红, 等. 耦合MOP与GeoSOS-FLUS模型的县级土地利用结构与布局复合优化. *自然资源学报*, 2019, 34(6): 1171-1185. [CAO S, JIN X B, YANG X H, et al. Coupled MOP and GeoSOS-FLUS models research on optimization of land use structure and layout in Jintan district. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(6): 1171-1185.]
- [11] 马冰滢, 黄姣, 李双成. 基于生态—经济权衡的京津冀城市群土地利用优化配置. *地理科学进展*, 2019, 38(1): 26-37. [MA B Y, HUANG J, LI S C. Optimal allocation of land use types in the Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration based on ecological and economic benefits trade-offs. *Progress in Geography*, 2019, 38(1): 26-37.]
- [12] LAU K H, KAM B H. A cellular automata model for urban land-use simulation. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2005, 32(2): 247-263.
- [13] 张鸿辉, 曾永年, 谭荣, 等. 多智能体区域土地利用优化配置模型及其应用. *地理学报*, 2011, 66(7): 972-984. [ZHANG H H, ZENG Y N, TAN R, et al. A model for regional land use optimization allocation based on multi-agent system and its application. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(7): 972-984.]
- [14] 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): 162-167, 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): 162-167, 172.]
- [15] 戴声佩, 张勃. 基于CLUE-S模型的黑河中游土地利用情景模拟研究: 以张掖市甘州区为例. *自然资源学报*, 2013, 28(2): 336-348. [DAI S P, ZHANG B. Land use change scenarios simulation in the middle reaches of the Heihe River Basin based on CLUE-S model: A case of Ganzhou district of Zhangye city. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(2): 336-348.]
- [16] LIANG X, LIU X P, LI X, et al. Delineating multi-scenario urban growth boundaries with a CA: Based FLUS model and morphological method. *Landscape and Urban Planning*, 2018, 177: 47-63.
- [17] 黎夏, 李丹, 刘小平, 等. 地理模拟优化系统GeoSOS软件构建与应用. *中山大学学报: 自然科学版*, 2010, 49(4): 1-5, 15. [LI X, LI D, LIU X P, et al. The implementation and application of geographical simulation and optimization systems (GeoSOS). *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2010, 49(4): 1-5, 15.]
- [18] 耿鑫, 胡实, 肖玉, 等. 基于生态系统服务价值的东北农牧交错区土地利用格局优化与评价. *自然资源学报*, 2022, 37(7): 1799-1814. [GENG X, HU S, XIAO Y, et al. Land use pattern optimization and evaluation based on ESV of agropastoral ecotone in Northeast China. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(7): 1799-1814.]
- [19] 付晶莹, 郜强, 江东, 等. 黑土保护与粮食安全背景下齐齐哈尔市国土空间优化调控路径. *地理学报*, 2022, 77(7): 1662-1680. [FU J Y, GAO Q, JIANG D, et al. Optimal regulation of spatial planning in the context of black soil preservation and food security in Qiqihar. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(7): 1662-1680.]
- [20] 王家丰, 王蓉, 冯永玖, 等. 顾及轨道交通影响的浙中城市群土地利用多情景模拟与分析. *地球信息科学学报*, 2020, 22(3): 605-615. [WANG J F, WANG R, FENG Y J, et al. Simulating land use patterns of the Mid-Zhejiang Urban Agglomeration considering the effects of urban rail transit. *Journal of Geo-information Science*, 2020, 22(3): 605-615.]
- [21] 游和远, 夏舒怡, 林宁. 全域土地综合整治中生态产品价值实现的逻辑分析. *中国土地*, 2022, (11): 18-21. [YOU H Y, XIA S Y, LIN N. Logical analysis on the realization of ecological product value in comprehensive land consolidation. *China Land*, 2022, (11): 18-21.]
- [22] 赵泳春, 苏方林. 经济差异化增长下生态系统服务价值的时空演变特征: 以珠江—西江经济带为例. *自然资源学报*, 2022, 37(7): 1782-1798. [ZHAO Y C, SU F L. Spatio-temporal dynamic characteristics of the ecosystem service values under differential economic growth: A case study of the Pearl River-West River Economic Belt. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(7): 1782-1798.]
- [23] MARTÍN-LÓPEZ B, GÓMEZ-BAGGETHUN E, GARCÍA-LLORENTE M, et al. Trade-offs across value-domains in ecosystem services assessment. *Ecological Indicators*, 2014, 37: 220-228.
- [24] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进. *自然资源学报*, 2015, 30(8): 1243-1254. [XIE G D, ZHANG C X, ZHANG L M, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(8): 1243-1254.]
- [25] COSTANZA R, D'ARGE R, DE GROOT R S, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(15): 253-260.
- [26] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法. *自然资源学报*, 2008, 23(5): 911-919. [XIE G D, ZHEN L, LU C X, et al. Expert knowledge based valuation method of ecosystem services in China. *Journal*

of Natural Resources, 2008, 23(5): 911-919.]

- [27] 高振斌, 王小莉, 苏婧, 等. 基于生态系统服务价值评估的东江流域生态补偿研究. 生态与农村环境学报, 2018, 34(6): 563-570. [GAO Z B, WANG X L, SU J, et al. Ecological compensation of Dongjiang River Basin based on evaluation of ecosystem service value. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018, 34(6): 563-570.]
- [28] 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.

Land use optimization of comprehensive land consolidation based on the trade-off between the ecological value and realization potential of ecological product value

YOU He-yuan, ZHANG Jin-rong, XIA Shu-yi

(College of Public Administration, Zhejiang University of Finance & Economics, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Land use optimization in comprehensive land consolidation can meet the different demands for land under different objectives and alleviate potential land use conflicts. The national pilot project of comprehensive land consolidation in Danzhou city in Hainan province is selected as a case in this study. This paper sets two scenarios for comprehensive land consolidation including ecological value priority and realization potential of ecological product value priority under the trade-off between the increasing ecological value and realization potential of ecological product value. And the land use optimization is based on the third national land resource survey of the pilot project. Then the multi-objective programming model and GeoSOS-FLUS model are employed to optimize the land use structure and land use layout under two scenarios in comprehensive land consolidation. The results show that: (1) Compared to the land use status in 2019, the areas of mangrove forest and paddy field significantly increase under the ecological value priority scenario in the pilot project zone. The overall landscape exhibits a high level of polymerization, while evenness and fragmentation levels are relatively high. (2) Compared to the ecological value priority scenario, the areas of mangrove forest and paddy field decrease under the realization potential of the ecological product value priority scenario in the pilot project zone. And the areas of commercial and service land significantly increase. The level of landscape fragmentation of the overall landscape increases as well. (3) There are similarities and differences between the land use layout under the two scenarios and the construction project layout of comprehensive land consolidation in the Implementation Plan for the National Pilot Project of Comprehensive Land Consolidation in the Starting Zone of Danzhou City. Therefore, the areas and spatial layout of different types of land for increasing ecological value and realizing the potential of ecological product value should be considered overall in the comprehensive land consolidation. Meanwhile, we should pay attention to the effects of land use optimization on the landscape.

Keywords: ecological product value; comprehensive land consolidation; multi-objective programming model; GeoSOS-FLUS model; land use optimization; Danzhou city