园林, 2022, 39(05): 04-10.

基于多目标优化模型算法的郊野公园土地利用优化策略研究
——以上海市浦江郊野公园为例

Land-use Optimization Strategy of the Country Parks Based on Multi-Objective Optimization Model Algorithm: A Case Study on Shanghai Pujiang Country Park

刘　颂[1*]　黄一珊[1]　张　浪[2]
LIU Song[1*]　HUANG Yishan[1]　ZHANG Lang[2]

（1.同济大学建筑与城市规划学院，上海 200092；2.上海市园林科学规划研究院，上海城市困难立地绿化工程技术研究中心，国家林业和草原局城市困难立地绿化造林国家创新联盟，城市困难立地生态园林国家林业和草原局重点实验室，上海 200232）

（1. College of Architecture and Urban Planning, Tongji University, Shanghai, China, 200092; 2. Shanghai Academy of Landscape Architecture Science and Planning, Shanghai Engineering Research Center of Landscape on Challenging Urban Sties, National Forestry and Grassland Innovation Alliance on Afforestation and Landscaping of Challenging Urban Sites, Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Ecological Landscaping of Challenging Urban Sites, Shanghai, China, 200232）

文章编号：1000-0283(2022)05-0004-07
DOI：10. 12193 / j. laing. 2022. 05. 0004. 001
中图分类号：TU986
文献标志码：A
收稿日期：2022-02-28
修回日期：2022-03-29

摘　要

提升生态系统服务和优化空间结构是郊野公园规划的两大重要目标。然而，常规的郊野公园规划以游憩为主要目标，忽视了土地利用结构的优化和复合生态系统服务的提升，亟待引入定量化的决策辅助郊野公园规划的合理化。本研究旨在探索郊野公园土地利用优化策略，以上海市浦江郊野公园为研究对象，搜寻以最大化生态系统服务价值及空间聚集度为目标的郊野公园土地利用规划方案，并根据不同偏好策略对最优空间方案进行分析，为郊野公园的土地利用调整规划提供具体的空间参考和决策建议。研究采用分解的多目标进化算法构建多目标优化模型进行土地利用方案的生成和优选，经过构建决策变量、概化约束条件、设定目标函数、算法优化4个步骤进行了浦江郊野公园土地利用的算法优化。研究表明，采用的土地利用优化策略能够有效辅助规划方案的生成和效益提升，将研究区场地内零散未利用地转换为水域并与周边水面相连有利于实现空间聚集的目标，而增加林地、水域比例，构建林地水网相互交织的景观格局有利于大幅提升生态系统服务价值指标。

关键词

郊野公园；生态系统服务价值；土地利用优化；多目标优化；非支配排序遗传算法第二代

Abstract

Enhancing ecosystem services and optimizing spatial structure are two main objectives of country park planning. However, conventional country park planning strategies focus on recreation services, ignoring the optimization of land-use structure and the improvement of complex ecosystem services. And it is urgent to introduce quantitative decision-aid strategies to assist country park planning. This paper aims to explore the country park land-use optimization strategies. Using the Shanghai Pujiang Country Park as the research object, it searches for country park land-use planning solutions to maximize ecosystem service value and spatial aggregation. Besides that, it also analyzes the optimal spatial solutions according to different preference strategies to provide specific spatial references and decision-making for the country parkland use adjustment. Based on constructing a multi-objective optimization model using the MOEA/D algorithm for land-use scheme generation and preference, the algorithm optimization of land-use in Pujiang Country Park was carried out in four steps: constructing decision variables, setting objective function, generalizing constraints, and algorithm optimization. The research shows that the adopted land-use optimization strategy can effectively assist the generation and benefit improvement of the planning scheme. Converting the scattered unused land in the study area into a water area and connecting it with the surrounding water surface is conducive to achieving the goal of spatial aggregation while increasing the forest land and water area. The construction of a landscape pattern with intertwined woodland and water networks is conducive to significantly improving the index of ecosystem service value.

Keywords

country parks; ecosystem service values; land-use optimization; multi-objective optimization; NSGA-II

刘　颂
1968年生／女／山东曲阜人／博士／教授，博士生导师／高密度人居环境生态与节能教育部重点实验室数字景观模拟分实验室负责人，上海城市困难立地绿化工程技术研究中心副主任／研究方向为城乡绿地系统规划、景观规划技术方法

黄一珊
1995年生／女／江苏无锡人／硕士／上海世博土地控股有限公司／研究方向为景观规划设计

张　浪
1964年生／男／安徽合肥人／博士／教授级高级工程师，博士生导师／上海领军人才、享受国务院特殊津贴专家／研究方向为生态园林规划设计与技术研究／本刊主编

*通信作者 (Author for correspondence)
E-mail: liusong5@tongji.edu.cn

基金项目：
国家自然科学基金面上项目“基于生态系统服务权衡与协同的市级生态空间多目标优化研究”（编号：52178050）

城市化进程的加速给自然生态环境带来了巨大压力，城市公园绿地不仅应当具备观景和休闲的功能，还应当供给多样的生态系统服务[1]。郊野公园通常指城郊之外、集聚生态要素、可迎合居民休闲娱乐需求的区域绿地[2]。“两规合一”大背景下，上海市将大规模基本农田保育区作为基底打造生态空间，并以划定的104个郊野单元为单位，在上海集中建设区以外的广大郊区施行土地管理和规划建设，促进开发过程的精细化高效化发展。郊野公园作为规划建设试点区域的一种特殊郊野单元，其规划具有愈发重要的现实意义。

上海市郊野公园的规划目标具有特殊性。首先提升生态系统服务是重要目标之一，郊野公园是供给复合生态系统服务（如游憩、生物多样性保育、碳汇、气候调节等）的重要载体[3-4]，已有许多研究以优化提升生态系统服务供给为导向进行了郊野公园评价和规划设计[5-7]；其次，根据《上海市基本生态网络规划》的要求，“优化空间结构”[8]作为郊野公园的规划理念之一，实现空间结构的系统性和连通性，促进郊野公园集约化、可持续发展。可见，提升生态系统服务和优化空间结构是郊野公园规划的两大重要目标。然而，常规的郊野公园规划往往以游憩服务为主要目标，忽视了开发过程中众多约束条件的影响，忽视了土地利用空间结构优化及复合生态系统服务的提升。

土地利用优化是指利用定量设计对土地利用数量结构及空间结构的优化配置[9]。部分学者[10-12]将土地利用优化问题转化为算法优化问题，基于算法求解特定目标下的土地利用格局。算法优化的方法通过算法迭代，生成、优选特定目标下的规划方案，相比传统主观规划方法具备更高的科学性和合理性，为辅助郊野公园规划的定量化决策提供了新的思路。

目前已有研究以提升生态系统服务价值为目标进行了土地利用优化，如赵阳等[13]以线性规划算法求取最大化生态系统服务价值的土地利用规划方案；郭小燕等[14]以当量因子法求取的生态系统服务价值作为适应度函数进行了兰州市土地利用优化实践。在现有研究的优化实践中，当量因子法是用于土地利用优化中生态系统服务测算的常用方法。此外，多数研究在进行土地利用优化时将空间关系纳入考量，认为空间聚集度是量化空间联系特征的重要指标，并将之作为土地利用优化中空间相关的优化目标之一进行了优化实践[12, 15-17]。

本研究以上海市浦江郊野公园为研究对象，搭载多目标优化算法，在上位规划的约束条件下，探索以最大化生态系统服务价值及空间聚集度为目标的郊野公园土地利用规划方案，并根据不同偏好策略对最优空间方案进行分析，为郊野公园的土地利用调整规划提供具体的空间参考和决策建议。

1 研究方法

1.1 研究对象及数据来源

1.1.1 研究对象

浦江郊野公园地处上海市闵行区东南角的浦江镇西侧，规划面积约为15.29 km^2，其现状土地利用类型以林地为主，占地487.01 hm^2，占比约为36.65%，其次为耕地和建设用地，分别占地321.37 hm^2和200.23 hm^2，除未利用地外，草地的占地最少，约为60.26 hm^2。各类用地以水面构成主要空间骨架，呈现较为紧凑的空间特征，农田与建设用地结合紧密，林地集中连片。

浦江郊野公园规划建设以土地整治为核心内容，以增减挂钩为政策工具，在农村土地要素综合整治的基础上，对其功能、形态进行补充和调整，打造以森林游憩、滨水休闲、农业科普为主要功能，兼具生态、景观、农田保护等多元效益的绿色节点。浦江郊野公园规划建设前期。在规划中提出了“集约节约用地”原则，其土地利用存在布局分散、用地破碎化的问题，该公园作为上海市2013年先期启动的5个试点郊野公园之一，具有典型的示范性意义。

1.1.2 数据来源

本研究采用现场调查结合高分辨率遥感影像解译的方法获取土地利用数据。选择Google Earth中2011年11月27日（郊野公园建设前）和2019年10月29日（郊野公园建成开放两年后）的遥感影像作为信息源，对其地理空间校正后，通过目视解译得到7类土地利用类型，包括耕地、林地、草地、水域、建设用地、交通运输用地和其他未利用地。

最后，将遥感解译结果重采样至50 m×50 m栅格图像作为土地配置优化基础单元，该粒度的数据既保留了土地的物理和社会经济特征，又避免了决策变量维数过大可能造成的计算时间过长、收敛能力较差的问题。

1.2 上海浦江郊野公园土地利用优化的概化建模

1.2.1 基于多目标进化算法的土地利用优化方法概述

多目标优化算法是求解两个及两个以上目标的最优公园土地利用方案的重要途径，大量研究证明利用多目标优化算法进行土地利用方案优化的可行性[16, 18-19]。然而，基于栅格的土地利用空间优化问题往往导致决策变量数量过多，具有较高的计算复杂度，优化

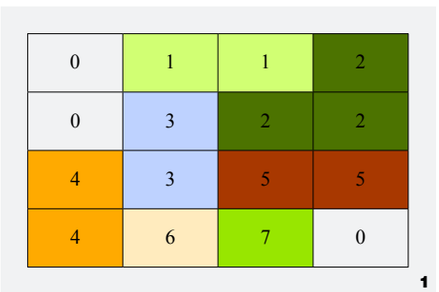

图1 决策变量编码方式示意图
Fig. 1 Schematic diagram of how the decision variables are coded

计算成本是该类问题亟需解决的问题[15]。部分研究为了降低计算成本，采用矢量地块作为决策上单元进行空间优化[20-21]，但该做法在一定程度降低了决策的可操作性。

基于分解的多目标进化算法（Multiobjective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition，MOEA/D）是常用的基于分解的多目标优化算法。研究表明在达到类似收敛效果的情况下，MOEA/D算法计算复杂度低于常用的NSGA-Ⅱ算法和MOGLS算法，采用MOEA/D算法可以有效降低计算成本，在土地利用优化问题上具有显著优势[22]。

由于提升生态系统服务和优化空间结构是郊野公园规划的两大重要目标，本文采用MOEA/D算法进行浦江郊野公园土地利用优化，其概化建模过程分为：构建决策变量、确定约束条件、设置目标函数、算法优化4大部分。

1.2.2 构建决策变量

决策变量是指算法需要决策的郊野公园土地利用单元，MOEA/D算法的决策变量维数等于研究区内需要优化的栅格总量，每一维包含空间区位与土地利用类型两方面属性。决策变量为编码1-7的分类变量，对应7种不同类型的用地单元，1-7分别代表耕地、林地、水域、建设用地、交通运输用地、其他未利用地和草地。0代表栅格数据中的Nodata值，不作为研究单元，编码后共形成决策变量5 316维。

图1示意了一个4×4的土地配置栅格空间方案，编码为0的单元表征栅格数据中的Nodata值，不作为决策变量，其余编码各自对应不同的土地利用类型栅格，如1表示耕地，2表示林地等。

1.2.3 确定约束条件

为使算法生成的方案更符合实际情况，需要根据实际规划要求对算法设置约束条件，算法中决策变量的转化将在指定约束条件下进行，不符合约束条件的土地利用方案将被算法舍弃。依据《上海市郊野公园建设设计导则（试行）》和《上海市浦江区郊区单位（郊野公园）规划说明》的要求及土地资源配置相关理论知识提取了约束条件，分为限制开发规则、用地面积约束、规划建设导向三个方面，分别针对不同用地类型保留改造要求，规模面积调控以及其他建设用地、耕地的相关土地整治措施导向等（表1）。

1.2.4 设置目标函数

提升生态系统服务和优化空间结构是上海市郊野公园规划的两大重要目标，本研究以最大化生态系统服务和空间聚集度两个指标为目标进行浦江公园的土地利用优化。

1.2.4.1 生态系统服务子函数

生态系统服务价值（Ecosystem Services Value，ESV）是评价生态系统服务的重要指标，当量因子法是用于生态系统服务价值量评估的方法之一。谢高地等[23]根据国内百余位生态学领域专家的问卷填写结果，编写了适应中国经济环境现状的生态系统服务价值当量因子表，并被广泛应用。本研究采用当量法作为浦江郊野公园生态系统服务价值的定量

表1 优化模型的约束条件
Tab. 1 Constraint of the optimization model

约束类别 Category of constraint	约束条件 Constraint
限制开发规则	保留居住点原则上不得进行拆除
	最严格的耕地和基本农田保护制度
	保留现状基地特有的水网格局，市区级河道两侧设置缓冲带，黄浦江沿岸保留200 m范围的涵养防护绿带，大治河沿岸保留100 m范围的涵养防护林带
用地面积约束	类集建区空间规模不得高于减量化面积的33%
	郊野公园规划建设用地总规模（含存量建设用地）占总用地面积的比例不得超过15%
	水面率不得低于10%
	林地总面积不减小
规划建设导向	促进农地规模化、集约化经营
	适当归并零星分散的宅基地（保留和拆除型的村庄）
	建设用地减量化，复垦
	类集建区规模小而紧凑，节约集约利用土地
	类集建区布置在靠近基础较好的城镇区域（宜与原来的集建区相连）

表2 生态系统服务价值系数
Tab. 2 Ecosystem service value coefficients

一级服务 Primary service	二级服务 Secondary service	林地 Forest land	草地 Grass land	耕地 Arable land	水域 Waters	难利用地（建设用地/交通运输用地/未利用地） Hard-to-use land (Construction land/ Transportation land/ Unused land)
供给服务	食物生产	0.33	0.43	1.50	0.44	0.02
	原料生产	2.98	0.36	0.59	0.30	0.04
调节服务	气体调节	4.32	1.50	1.08	1.46	0.06
	气候调节	4.07	1.56	1.46	7.81	0.13
	净化环境	4.09	1.52	1.16	16.11	0.07
	水文调节	1.72	1.32	2.09	14.63	0.26
支持服务	生物多样性	4.51	1.87	1.53	3.56	0.40
	土壤保持	4.02	2.24	2.21	1.20	0.17
文化服务	景观美学	2.08	0.87	0.26	4.57	0.24
合计		28.12	11.67	11.88	50.08	1.39

评估方法，具体公式如下：

$$f_{Eco} = \sum_{i=1}^{N} Num(i) \times EcologyValue(i)\# \quad (1)$$

式中：f_{Eco}代表ESV值总量映射值，$EcologyValue(i)$代表第i类生态系统的ESV价值系数映射值；$Num(i)$代表第i类生态系统用地数目，N代表用地种类。

因生态系统类型划分差异，在确定生态系统服务的价值系数时，本文采用谢高地等[23]的生态系统服务当量因子表的基础上，参考其他学者研究成果[24-26]进行了调整（表2）。同时，考虑上海市农业生产情况，对当量因子进行了地域修正，将耕地的生态系统服务价值系数调整为全国均值的1.5倍[27]。此外，将价值系数进行了归一化处理，保证总目标函数中不同优化目标对其的影响真实可比（表3）。

表3 生态系统服务价值系数归一化处理值
Tab. 3 Normalized treatment values of ecosystem service value coefficients

土地利用类型 Land-use	耕地 Arable land	林地 Forest land	水域 Waters	建设用地 Construction land	交通运输 Transportation land	未利用地 Unused land	草地 Grass land
ESV价值系数	0.24	0.56	1.00	0.03	0.03	0.03	0.23

1.2.4.2 空间聚集度子函数

土地利用在空间上由多种利用方式组合而成，为避免各类生态系统分布过度分散带来土地资源浪费、生态效益低下等弊端，在土地配置中应有优先将生态属性一致的用地聚合，提升土地利用效率。本研究引入空间聚集度作为另一优化目标。

具体计算过程如下：以某一土地利用单元为中心，计算周边8邻域范围内同类型土地利用单元数，记为该单元的空间聚集度，接着遍历研究区内所有土地利用单元，对各个单元的空间聚集度计算并求和，即得研究区空间聚集度值总值。其中，位于研究区域边缘的土地单元不具有完整的8邻域结构，需要单独进行测算。公式如下：

$$\begin{aligned} Neighbor(x,y,i) &= Flag(x-1,y-1,i) + Flag(x-1,y,i) \\ &+ Flag(x-1,y+1,i) + Flag(x,y-1,i) \\ &+ Flag(x,y+1,i) + Flag(x+1,y-1,i) \\ &+ Flag(x+1,y,i) + Flag(x+1,y+1,i) \end{aligned} \quad (2)$$

$$f_{Agg} = \sum_{i=1}^{N} \sum_{y=1}^{Col} \sum_{x=1}^{Row} Flag(x,y,i) \times Neighbor(x,y,i) \quad (3)$$

式中：f_{Agg}代表研究区空间聚集度总值；$Neighbor(x,y,i)$代表第x行第y列第i类用地单元的空间聚集度数值。

1.2.5 算法优化

MOEA/D的核心思想是利用多组权重向量聚合函数将多目标优化问题转化为多个单目标优化问题，其首先初始化权重向量和最初种群，获取初代最优理想点，然后经过繁殖、改进、更新策略更新非支配解集，直到达到终止条件。本研究基于Python平台的Geatpy第三方库[28]提供的MOEA/D算法完成优化。

在本实验原始土地利用栅格布局中，林地占比为37.53%，水域占比为9.79%，建设用地占比为14.97%。符合建设用地总规模不超过总用地面积15%的标准，但不满足水面率不低于10%的约束条件要求，因此，实验中

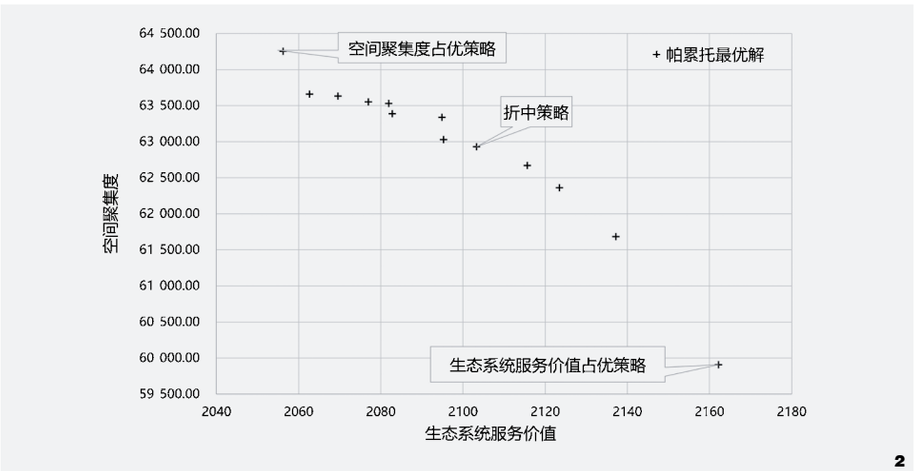

图2 浦江公园土地利用规划方案最优解集
Fig. 2 Optimal set of solutions for the land use planning scheme of Pujiang Park

随机选取未利用土地和草地栅格中的11个地块作为水面，以此来提升水面率。根据收敛指标情况进行多次实验比对，发现分解方法为切比雪夫方法，参数设置为种群规模100，最大迭代次数400，交叉率0.9，变异率0.2时，多次试验结果收敛指标趋于稳定，实验结果表现出相同的规律，表明在该参数条件下，实验结果具有较强可信度[16, 29]。

2 研究结果

2.1 算法优化结果

图2以散点图的形式展示了算法求解的浦江公园土地利用方案最优解集（即Pareto解集）的目标实现情况，F1轴为生态系统服务价值，F2轴为空间聚集度，每个点代表一个土地利用的空间格局方案。

从图2中散点的分布趋势可见，生态系统服务价值和空间聚集度目标存在一定的冲突，难以实现协同增益，在实际决策过程中，决策者要根据政策导向和偏好需求，对不同土地利用优化配置方案进行权衡考察，并从优化结果中选择最合适的方案。本研究对比不同配置方案，从中选择无偏好策略、生态系统服务价值（F1优先）策略、空间聚集度（F2优先）策略。其中，生态系统服务（F1优先）策略和空间聚集度（F2优先）策略分别优先考虑研究区的生态系统服务功能目标值与空间聚集度目标值，而折中策略则在综合考虑后选取F1和F2接近中位数的无偏好解。从用地规模和空间结构情况方面比较不同实验结果，同时将土地配置优化方案与现状进行对比，分析土地利用变化情况。

表4 三种优化策略及现状分别对应的目标函数值
Tab. 4 Values of the objective function corresponding to each of the three optimization strategies

目标函数 Objective function	折中策略 Compromising strategy	生态系统服务（F1占优）策略 F1 Dominant strategy	空间聚集度（F2占优）策略 F2 Dominant strategy	现状 Current status
生态系统服务价值（F1）	2 103.29	2 137.23	2 056.22	2 020.33
空间聚集度（F2）	62 930.00	61 685.00	64 253.00	64 203.00

2.2 偏好情景分析

浦江郊野公园土地利用现状（2019年）及三个偏好情景下的最优土地利用规划空间栅格图如图3所示，表4则展示了不同空间方案下的生态系统服务及空间聚集度目标函数值。从优化前用地状况来看，浦江郊野公园内耕地大多集中在申嘉湖高速以南、浦星公路以西的中心区域，其中包含约250 hm^2的高标准基本农田，农田外围环绕约400 hm^2林地，包括环境保护林、水源涵养林及少量护路林和护岸林。农村宅基地、工矿仓储用地等建设用地及水系则分布较为分散，错落分布于基地中。从整体看，优化结果保留了浦江郊野公园的用地空间结构。然而从局部和细节出发则可以发现，不同的优化结果对当前的土地配置情况作出了不同的调整。

从折中策略来看，在东部密林游憩区内，水域面积明显扩大，水系连通性加强；从目标函数值可知，无偏好方案的空间聚集度与现状相比略有下降，而生态系统服务价值明显提升，增加了4.11%。

对于空间聚集度占优策略，其景观数量与结构优化结果与现状相比变化较小，场地内零散未利用地转换为水域并与周边水面相连，生态系统服务和空间聚集度测算结果与浦江郊野公园现状相比均略有提升，分别增加了1.78%和0.08%，在最小化人为干预的条件下实现生态系统服务与土地聚集度的协同提升。

对于生态系统服务占优策略，可明显看出一期森林探索游憩区和二期疏林活动区范围内的建设用地面积减少，二期密林游憩区水域面积显著增多，相比原来单一成片的林地景观特色，林地景观类型斑块与其他景观类型

的比邻概率增加，不同景观类型间的连通性提升，形成了林地水网相互交织的景观格局。西部水源涵养林则有一定的外延式发展趋势，但由于研究区内有较大范围的现状基本农田，在限制开发规则下为空间布局限制区域，对滨江涵养林地及水体区域的蔓延起到了限制作用。从目标函数值也可看出，总生态效益增加了5.79%，空间聚集度则降低了3.92%。

进一步统计了三种偏好方案的土地利用数量结构变化情况（表5）。通过对优化前后土地利用结构进行分析可以看出，折中策略方案和生态系统服务（F1优先）方案在优化后，耕地、水域像元数量均有所增加，而林地和建设用地数量均有所减少，耕地面积增量分别为3.00%和3.86%，建设用地减量分别为7.67%和13.96%。这是由于在当前基本农田保护制度及减量复垦政策施行导向下，为了增加农田面积，利于农业规模化、集约化经营作出的适应性用地调整。其中，折中策略方案强调生态保护的同时考虑了空间聚集度要求，耕地、水域用地的增加数量略少于生态体统服务；生态系统服务占优方案强调区域生态效益，整个研究区建设用地的地理单元数量占比由原来的14.97%下降到了12.88%。而空间聚集度占有方案在各类用地的地理单元数量方面则变化较小，仅水域面积提升了7.12%。

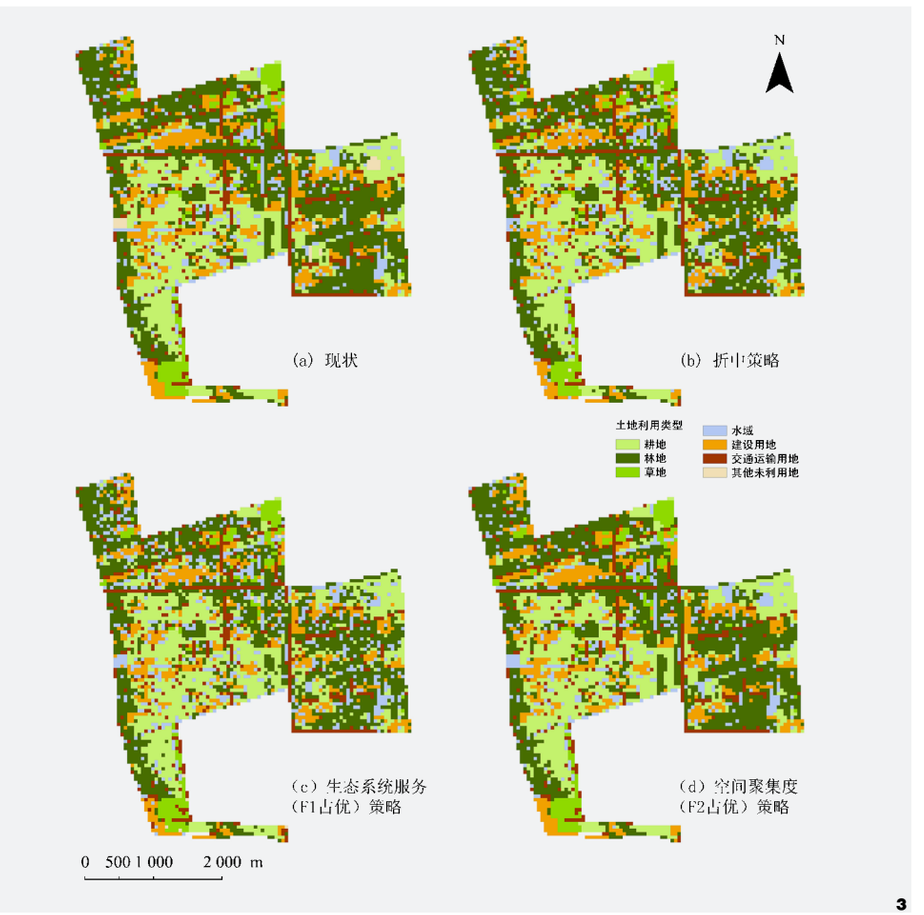

图3 土地利用现状及三种偏好策略下的最优土地利用方案
Fig. 3 Current land use status and optimal land-use scenarios under three preference scenarios: (a) Status of land use in 2019; (b) No preference strategy; (c) Ecosystem services (F1 dominance) strategy; (d) Spatial aggregation (F2 dominance) strategy

3 结论与讨论

本文基于MOEA/D算法，在上位规划的约束条件下，搜寻了以最大化生态系统服务价值及空间聚集度为目标的郊野公园土地利用规划方案，并根据不同偏好策略对最优空间方案进行了分析。研究结果表明，优化后的土地利用方案实现了不同偏好下生态系统服务价值和空间聚集度目标的提升，对于该场地而言，将场地内零散未利用地转换为水域并与周边水面相连有利于实现空间聚集的目标，而增加林地、水域比例，构建林地水网相互交织的景观格局有利于大幅提升生态系统服务价值指标。本研究提出的方法具有实践和指导意义。

研究结果中各偏好下的优化用地结果都很好地实现了针对性的提升，如生态系统服务占优策略下的优化方案，大幅提升了园区

表5 优化前后土地的利用规模变化表（像元数/个）
Tab. 5 Table of changes in the scale of land use before and after optimization

配置方案 Strategy scenarios	耕地 Arable land	林地 Forest land	水域 Waters	建设用地 Construc-tion land	交通运输 Transporta-tion land	未利用地 Unused land	草地 Grass land
土地利用现状	1 268	1 993	520	795	458	37	239
折中策略	1 306	1 893	654	734	484	10	229
生态系统服务（F1占优）策略	1 317	1 825	725	684	518	18	223
空间聚集度（F2占优）策略	1 268	1 993	557	795	458	0	239

生态系统服务价值，很大程度提升了郊野公园的生态保育功能，顺应了当前上海市郊野公园“突出生态优先”的规划理念；空间聚集度占优策略考虑了空间格局联系，优化了空间结构，表明本研究采用的土地利用优化策略能够有效辅助规划方案的生成和效益提升，为土地利用规划决策提供依据和参考。然而，比对现状可以发现空间聚集度占优的优化结果和现状存在的差异很小，一方面可能说明了在要求的约束条件下，2019年土地利用现状在空间聚集度目标上已经处于较优状态，景观结构科学合理，导致在空间聚集度、生态系统服务价值共同提升的要求下得到的最优方案较少，也有可能是迭代次数不足导致更优的方案尚未被搜寻到，亟待增加迭代次数及完善模拟条件后进行进一步探索。

然而，研究仍存在一定改进空间，首先，算法生成的优化策略对现有方案的提升效果并不显著，如折中策略及生态系统服务占优策略虽然获得了较高的生态效益，却相比现状方案降低了空间聚集度，一定程度导致了空间的破碎化；空间聚集度占优策略虽然同时提高了空间聚集度及生态系统服务两方面效益，提升幅度却都比较小。这一结果表明在研究区的约束条件下，空间聚集度和生态系统服务价值间的冲突较为明显，使两个目标协同困难。其次，尽管将效益指标（生态系统服务价值）和空间指标（空间聚集度）同时作为优化目标进行具有一定合理性，也具有较多成功的优化实践，然而研究表明空间结构对生态系统服务具有潜在影响，这样的概化策略难以考虑空间结构和生态系统服务两个目标间的交互关系，亟待采用更合理的逻辑进一步准确概化目标间的关系，实现效益精准评估。

注：文中图表均由作者绘制。

参考文献

[1] 董艳杰, 万福绪. 基于三维绿量的林分生态效益测算与分析——以上海浦江郊野公园为例[J]. 水土保持研究, 2019, 26(03): 347-352.

[2] 朱漪. 上海合庆郊野公园多类用地性质背景下复合功能设计策略研究[J]. 中国园林, 2021, 37(S2): 25-29.

[3] 陆健健, 王强. 建设上海郊野公园, 发挥湿地生态系统功能[J]. 上海城市规划, 2013 (05): 19-23.

[4] 刘智敏, 刘伟, 夏菁. 大都市郊野空间生态修复实践与思考——以上海市郊野公园土地综合整治为例[J]. 中国土地, 2019(09): 29-32.

[5] 陈奇媛. 上海市郊野公园多尺度生态系统服务研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2020.

[6] 李婧楠. 生态系统服务视角下河南黄河滩区郊野公园规划研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.

[7] 梁淑榆. 基于生态绩效评价的郊野公园规划设计研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.

[8] 顾守柏, 龙腾, 刘静. 全域土地整治创新与实践——以上海市为例[J]. 中国土地, 2017(09): 52-55.

[9] 董品杰, 赖红松. 基于多目标遗传算法的土地利用空间结构优化配置[J]. 地理与地理信息科学, 2003 (06): 52-55.

[10] GAO P, WANG H, CUSHMAN S A, et al. Sustainable Land-use Optimization Using NSGA-II: Theoretical and Experimental Comparisons of Improved Algorithms[J]. Landscape Ecology, 2021, 36(7): 1877-1892.

[11] CAO K, ZHANG W, WANG T. Spatio-temporal Land Use Multi-objective Optimization: A Case Study in Central China[J]. Transactions in GIS, 2019, 23(4): 726-744.

[12] LIU H, YAN F, TIAN H. Towards Low-carbon Cities: Patch-based Multi-objective Optimization of Land Use Allocation Using An Improved Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II[J]. Ecological Indicators, 2022, 134(4): 108455.

[13] 赵阳, 张艺, 涂志华, 等. 基于生态服务价值的多目标水源地土地利用结构优化[J]. 中国环境科学, 2014, 34(01): 232-238.

[14] 郭小燕, 刘学录, 王联国. 以提高生态系统服务为导向的土地利用优化研究——以兰州市为例[J]. 生态学报, 2016, 36(24): 7992-8001.

[15] RAHMAN M M, SZABó G. Multi-objective Urban Land Use Optimization Using Spatial Data: A Systematic Review[J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 74(6): 103214.

[16] 王昊煜, 高培超, 谢一茹, 等. 基于改进型NSGA-II算法的西宁市土地利用多目标优化[J]. 地理与地理信息科学, 2020, 36(06): 84-89.

[17] 王帝文, 李飞雪, 陈东. 基于Pareto最优和多目标粒子群的土地利用优化配置研究[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(09): 2019-2029.

[18] 王世忠, 刘卫东, 曹振宇. 基于NSGA-II的土地利用数量结构优化研究——以舟山市定海区为例[J]. 地理科学, 2010, 30(02): 290-294.

[19] 张孟真, 金晓斌, 韩博, 等. 基于改进CoMOLA模型的镇域土地利用优化[J]. 农业工程学报, 2020, 36(12): 257-267.

[20] HANDAYANTO R T, TRIPATHI N K, KIM S M, et al. Achieving a Sustainable Urban Form Through Land Use Optimisation: Insights from Bekasi City’s Land-use Plan (2010-2030)[J]. Sustainability, 2017, 9(2): 221.

[21] CAO K, LIU M, WANG S, et al. Spatial Multi-objective Land Use Optimization Toward Livability Based on Boundary-based Genetic Algorithm: A case Study in Singapore[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2020, 9(1): 40.

[22] ZHANG Q, LI H. MOEA/D: A Multiobjective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2007, 11(6): 712-731.

[23] 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[J]. 自然资源学报, 2008 (05): 911-919.

[24] 蒋玲, 蒲春玲, 刘彦晶, 等. 基于生态服务价值的土地整理生态效益评价——以庆阳市西峰区董志镇土地整理项目为例[J]. 天津农业科学, 2016, 22(03): 68-74.

[25] 李全, 李腾, 杨明正, 等. 基于梯度分析的武汉市生态系统服务价值时空分异特征[J]. 生态学报, 2017, 37(06): 2118-2125.

[26] 曾杰, 李江风, 姚小薇. 武汉城市圈生态系统服务价值时空变化特征[J]. 应用生态学报, 2014, 25(03): 883-891.

[27] 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[J]. 自然资源学报, 2015, 30(08): 1243-1254.

[28] JAZZBIN J. Geatpy: The Genetic and Evolutionary Algorithm Toolbox with High Performance in Python[EB/OL]. (2021-04-04)[2022-03-28]. http://geatpy.com.

[29] SONG M, CHEN D. An Improved Knowledge-informed NSGA-II for Multi-objective Land Allocation (MOLA)[J]. Geo-spatial Information Science, 2018, 21(4): 273-287.