基于碳平衡分区的多目标土地利用格局优化
——以长株潭城市群为例

谭德明[1,3]，谭卓成[1,3]，李家裕[1]，吴大维[2,3]，张彩平[3,4]

（1.南华大学 松霖建筑与设计艺术学院，湖南 衡阳 421200；2.南华大学 资源环境与安全工程学院，湖南 衡阳 421200；3.南华碳中和与核能发展创新研究院，湖南 衡阳 421200；4.南华大学 经济管理与法学学院，湖南 衡阳 421200）

摘　要：［目的］从碳平衡的视角对长株潭城市群进行土地利用资源的空间优化，为该地区社会和经济的可持续发展提供理论支持。［方法］从土地利用角度计算长株潭城市群的碳汇与碳排量，依据碳生态承载力系数与碳经济贡献系数进行碳平衡分区并针对每类市县提出土地利用优化策略，设置经济效益、碳汇效益、紧凑度和转换成本作为多目标算法的优化函数，再通过 CoMOLA 模型得到较为科学的土地利用空间结构优化。［结果］①2000—2020 年，长株潭城市群碳排放总量呈逐年上升趋势，各区县的碳汇水平较为稳定，但总体上呈现轻微下降的趋势；②依据碳生态承载力系数与碳经济贡献系数将长株潭城市群分为碳汇发展区、经济发展区、综合优化区、绿色发展区；③优化后的土地利用经济效益增加了 28.5%，碳汇量增加了4.2%，紧凑度提升了 3.6%。［结论］优化后的土地资源能够较好满足长株潭城市群的经济与生态可持续发展，土地空间布局更加合理，为未来的土地资源配置提供决策依据。

关键词：碳平衡分区；城市群；碳汇量；分区优化；多目标优化

文献标识码：B　　**文章编号：**1000-288X(2025)01-0276-10　　**中图分类号：**F301.2

文献参数：谭德明，谭卓成，李家裕，等.基于碳平衡分区的多目标土地利用格局优化[J].水土保持通报，2025，45（1）：276-285. Tan Deming，Tan Zhuocheng，Li Jiayu，et al. Multi-objective land use pattern optimization based on carbon balance zoning [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2025，45(1)：276-285. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2025.01.029；CSTR：32312.14.stbctb.2025.01.029.

Multi-objective land use pattern optimization based on carbon balance zoning
—A case study of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan uban agglomeration

Tan Deming[1,3]，Tan Zhuocheng[1,3]，Li Jiayu[1]，Wu Dawei[2,3]，Zhang Caiping[3,4]

（1.*Solux College of Architecture and Design*，*University of South China*，*Hengyang*，*Hunan* 421200，*China*；2.*School of Resources Environment and Safety Engineering*，*University of South China*，*Hengyang*，*Hunan* 421200，*China*；3.*Institute for Carbon Neutrality and Nuclear Energy Development Innovation*，*Hengyang*，*Hunan* 421200，*China*；4.*School of Economics*，*Management and Law*，*University of South China*，*Hengyang*，*Hunan* 421200，*China*）

Abstract：［Objective］The spatial land use resources of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration were optimized from the perspective of carbon balance，in order to provide theoretical support for the sustainable development of the region's society and economy.［Methods］The carbon sinks and carbon emissions of the Chang-Zhu-Tan urban agglomeration were calculated from a land use perspective. Using the carbon ecological carrying capacity coefficient and the carbon economic contribution coefficient，carbon balance zoning was conducted，and land use optimization strategies were proposed for each type of city and county. Economic benefits，carbon sink benefits，compactness，and conversion costs were set as optimization functions for a multi-objective algorithm，achieving a more scientific optimization of land use spatial structure using the CoMOLA model.［Results］① From 2000 to 2020，the total carbon emissions of the Chang-Zhu-Tan

收稿日期：2024-09-10　　**修回日期：**2024-10-29　　**采用日期：**2024-10-30

资助项目：国家社会科学基金项目"'双碳'目标导向的企业碳资产管理研究"(23FGLB011)；湖南省自然科学基金项目(2024JJ5328)

第一作者：谭德明(1976—)，男(汉族)，湖南省株洲市人，博士，副研究员，主要从事环境治理、能源经济与管理等方面的研究。Email：1499686214@qq.com。

通信作者：谭卓成(1999—)，男(汉族)，湖南省祁东县人，硕士研究生，研究方向为低碳背景下土地利用优化。Email：19350332873@163.com。

urban agglomeration increased annually, while the carbon sink levels in various districts and counties remained relatively stable, with an overall slight decline. ② Based on the carbon ecological carrying capacity coefficient and the carbon economic contribution coefficient, the Chang-Zhu-Tan urban agglomeration was classified into carbon sink development zones, economic development zones, comprehensive optimization zones, and green development zones. ③ The optimized land use increased economic benefits by 28.5%, carbon sink volume by 4.2%, and compactness by 3.6%. [Conclusion] The optimized land resources effectively meet the needs for economic and ecological sustainable development in the Chang-Zhu-Tan urban agglomeration, with a more rational spatial arrangement of land. This provides a decision-making basis for future land resource allocation.

Keywords: carbon balance zoning; urban agglomeration; carbon sink; partition optimization; multi-objective optimization

工业化和城市化的迅猛发展推动了全球经济发展，但同时也带来了严重的生态和环境问题。目前，全球普遍认可减少碳排放、发展低碳经济的重要性。根据国际能源署(IEA)2021 年的数据显示，2021 年全球能源部门的二氧化碳排放量已达 3.63×10^{10} t，增速进一步加快。作为全球减排主力国之一，中国 2021 年的总碳排放量已超过 1.03×10^{10} t，占全球总排放量的约 27%，接近美国、欧盟和日本三国总和。中国在巴黎气候峰会上承诺，将在 2030 年左右实现二氧化碳排放峰值，并力争尽早实现，同时将单位 GDP 的二氧化碳排放比 2005 年减少 26%～65%。而土地利用碳排放是引起碳排放增加的主要因素，它直接影响城市化和工业化的程度，并进而影响地区城镇的发展水平[1]。城市化和工业化的规划将直接影响城市化和工业化的程度，从而影响碳中和计划的实现。优化城市空间布局并有效利用土地资源可以减少不必要的建筑建设和交通产生的碳排放，为了实现可持续发展，测算和评估碳排放的影响至关重要。国内外有关碳排的研究，主要集中在影响因素与时空演变特征以及情景模拟分析等方面。在时空演变与影响因素方面，韦彦汀等[2]分析了成渝城市群的碳排放时空演变特征和影响因素，揭示了碳排放存的空间差异及影响因素；宋苑震等[3]分析了中国县域碳排放的时空演变特征和影响机制；在情景模拟方面，袁建勋等[4]通过设置多种情景以预测淮海经济区的碳排放演化过程；Ye 等[5]设置多种情景预测深圳市的碳排放以及达峰时间。有关碳汇的研究，主要集在各个生态系统的碳汇值测算，如农田生态系统[6]、森林生态系统[7]、草地生态系统[8]、城市生态系统[9]和陆地生态系统[10]等。现有研究已取得了丰硕成果，为本研究奠定了基础。中国县域城市在自然资源禀赋、区划功能、经济发展水平、产业结构、能源结构和技术水平等方面存在显著差异，导致碳排放水平和碳汇吸收能力各异[11]。因此，如何在区域层面公平、合理、科学、实用地分配碳减排目标，已成为中国碳减排工作亟待解决的关键问题。

通过模拟土地利用变化过程并优化其结构，以引导适当的土地利用方式，是实现土地碳减排与可持续利用的重要方法。国内外许多学者在土地利用优化配置模型、土地利用结构优化方案以及用地空间布局优化等方面进行了大量研究，推动了从定性到定量、从静态到动态、从单一目标到多元目标的研究方法升级。目前相关研究主要分为 3 类：基于线性/目标规划的数学方法研究、智能优化算法研究以及多模型耦合研究。在线性/目标规划方面：刘荣[12]应用 Logistic 回归和目标规划等数学方法，构建了土地利用空间优化决策模型，并通过案例研究解决土地利用规划问题，实现了空间布局优化。在智能优化算法方面：Stewart 等[13]采用遗传算法、混合蛙跳算法、模拟退火算法等智能优化算法，模拟土地利用空间格局，以求解多目标、多约束的土地利用配置问题的 Pareto 最优解。在多模型集成方面，陈影等[14]结合多目标规划与 CLUE-S 模型进行土地利用数量优化和空间配置；张鸿辉等[15]将粒子群优化算法引入多智能体系统，建立了基于多智能体系统的区域土地利用优化配置模型，实现了土地利用数量结构、空间布局和效益的协同优化。以往的研究缺少从碳汇与碳排放的关系出发进行考虑，因此本文从区域碳平衡的角度出发，引入分区优化的思想，以低碳可持续发展为目标，因地制宜的对城市群进行优化。由于中国各县的经济社会发展状况和生态环境压力存在显著的地域差异，在县级层面开展碳平衡研究并执行区域性战略，对于优化减排和增加碳汇路径以及推动低碳经济至关重要，这也是未来实现可持续城市化的重要组成部分[16-17]。本文利用 CoMOLA 模型进行全域土地利用优化配置可分为以下步骤。首先划定碳平衡分区，以生态承载力指数、碳排放经济贡献系数为划分依据，根据不同区县的生态经济特征，将长株潭城市群

划分为4大区域。然后建立优化的约束条件,针对不同的发展区域,建立转型约束和面积限制,其中转型约束可以通过土地利用转换矩阵来表示,而面积限制可以从区域相关的发展规划中提取和计算。最后对土地利用布局结构配置进行优化,构建优化目标函数后在不同区域通过模型进行空间优化配置模拟,根据不同的发展策略,从Pareto前沿面中选择最优土地利用优化布局。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

长株潭都市圈位于湖南省中东部,包括长沙、株洲和湘潭3个主要城市,地理坐标介于东经111°53′—114°15′,北纬26°03′—28°41′,总面积为28 096 km^2。根据统计数据,2022年长株潭城市群的地区生产总值达到2.03×10^{12}元,占全国总量的约1.68%,总人口为1 699.44万人,是中部地区发展的核心增长极之一。该城市群的土地利用主要包括林地、耕地和城乡居民地,其中林地主要分布在边缘区域,而居民区则集中在中心地带。区域以亚热带季风气候为主,植被主要为亚热带常绿阔叶林,年平均气温为16~19 ℃。长沙、株洲、湘潭3个城市的中心城区之间的直线距离均不超过50 km,展现出优良的发展潜力,但也面临着土地利用碎片化,城市化发展不均衡等问题。

1.2 数据来源与数据预处理

本研究采用的数据主要包括:土地利用类型数据源自中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn/)的1∶10万中国土地利用现状遥感监测数据(30 m分辨率,耕地、城乡居民用地平均分类精度都在85%以上,其余用地75%以上),重分类成耕地、草地、林地、水域、建设用地、未利用地6个大类,并重采样成500 m分辨率、中国地级市行政边界数据、县级碳排放数据、统计和规划数据包括《湖南省统计年鉴(2021年)》。县域能源消耗的碳排放数据来源于中国碳核算数据库(CEADs),该网站提供自1997—2017年的建设用地能源消耗的碳排放数据,2018—2020年碳排放数据使用SPSS软件的时间序列预测模型拟合出来,各区县的R^2均在0.95以上,可信度较高,能够满足试验需求。

2 研究方法

2.1 碳平衡分区划分方法

碳平衡分区是指依据区域内碳排放源和碳汇的空间分布特征,采用科学方法将一定地域范围划分为若干碳平衡单元或区块,以实现区域碳排放与碳吸收的平衡管理。其目的是通过精细化、分区化的管理策略,优化区域碳排放控制并提升碳汇功能,进而助力实现碳中和目标。基于碳排放的经济贡献系数和生态承载力系数,可以从经济和生态两个角度分析不同区域的碳排放差异。除了反映区域在环境和经济发展方面的碳平衡外,这还可以反映区域的经济发展程度、生态环境基础以及未来的发展潜力[18]。因此,本文从碳排放经济贡献系数和碳生态承载力出发,以实现区县层面的碳平衡区划。

2.1.1 *碳汇测算* 根据赵明月等[19]的研究,植被、水域及土壤具有碳吸收作用,因此将土地利用类型为草地、林地、水域、未利用地的地类归为碳汇。耕地的碳汇作用极其微弱,绝大多数的二氧化碳还没吸收就已经排放出来,本文将耕地视为碳排。

$$C_m=\sum_{i}^{5}\alpha_i\cdot\beta_i \tag{1}$$

式中:C_m为m县总的碳汇量;α_i为i类土地利用的面积;β_i为i类土地利用的碳汇系数。根据李珊珊[20]的研究结果,耕地、林地、草地、水域、未利用地的碳汇系数分别为−0.124,0.664,0.022,0.253和0.005 t/(hm^2·a)。

2.1.2 *碳排放经济贡献系数* 碳排放的经济贡献系数是从碳排放对经济发展的贡献程度出发,反映经济发展所产生的二氧化碳含量高低[21],本文用该指标体现区县经济结构的合理性以及经济能力的大小,计算公式为:

$$\mathrm{ECC}=\frac{G_i}{G}/\frac{C_i}{C} \tag{2}$$

式中:ECC为碳排放经济贡献系数;G_i为i县国内生产总值(GDP);G为长株潭城市群国内生产总值;C_i为i县的碳排放量;C为长株潭城市群总的碳排放量。

2.1.3 *碳生态承载力系数* 碳生态承载力系数是指在研究区内,一个区域的碳吸收量占全域碳吸收量的比例,对应一个区域碳排放量占整个区域碳排放量的比例[22],本研究采用这个指标反映区县的碳吸收能力的大小,计算公式为:

$$\mathrm{ESC}=\frac{C_y}{C_Y}/\frac{C_i}{C} \tag{3}$$

式中:ESC为碳生态承载系数;C_Y指长株潭城市群总的碳吸收量;C_y指y县的碳吸收量;C_i为i县的碳排放量;C为长株潭城市群总的碳排放量。

2.2 CoMOLA模型

CoMOLA模型依托NSGA-Ⅱ,这是一种基于非支配排序的遗传算法。这一算法最初利用预设限制

条件和初始土地使用图表生成一系列可行而各异的土地使用分配图表方案。这批方案称作一个群体，群体中的每一方案视作一个个体，并以一连串数字串，也就是基因组的形式编码。然后，算法依据目标函数评估每个个体的适应度，并根据适应度进行帕累托排序，以保留最优个体，并从中选择配对个体来产生新一代。在配对过程中，后代的基因组由两个基因组的随机组合形成。优秀的个体有更高的配对机会，而随机突变增加了基因组的多样性。配对有时会生成不符合限制条件的后代，即不可行个体。此时，专门开发的土地分配优化修复机制会调整不可行个体的基因组[23]。模型将不断重复从计算适应度到产生后代，再到基因组的修正，直到满足结束条件，比如达到收敛准则或者预设的世代数量为止。NSGA-Ⅱ以其精英策略和简单而有效的约束处理方法，被广泛认为是处理多目标优化问题的有效工具。在本研究中，CoMOLA模型被用于土地利用的空间优化。优化的目的是在各个情景中，追求各个目标函数的最大值。即在尽可能减少其他效益损失的前提下，实现各项指标的最高效益，从而达到土地利用的全局最优。为使优化结果更加合理，设置以下约束条件：土地总面积恒定，各类用地面积之和等于研究区域总面积 28 096 km^2；建设用地面积约束，优化后总建设用地不少于现状建设用地面积 1 621 km^2，且严格控制建设用地扩张；水域面积约束，优化后河流湖泊的面积不少于现状水域用地面积 560.55 km^2。

2.2.1　*最大化经济效益*　长株潭城市群是湖南省经济发展的核心增长极，其辐射带动作用不仅提升了该省的经济总量，还带来了技术创新和产业升级的显著成效，但快速发展带来的资源消耗和环境压力不容忽视。为了实现可持续发展，长株潭城市群需要在政策制定和实施上更加谨慎，以平衡经济增长与生态保护，确保区域长期繁荣。以最大化区域相对国内生产总值(GDP)为经济目标。由《湖南省统计年鉴(2021年)》得到的 2020 年长沙、株洲、湘潭的农、林、牧、渔以及二三产业的 GDP 总量，和每种土地利用类型的面积，即可求出每种土地利用类型的经济效益系数，目标函数为：

$$\max(f_1)=\sum_{k=1}^{K}\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N}P_kX_{ijk} \tag{4}$$

式中：M，N 分别为研究区网格的行数和列数；k 为研究区土地利用类型数量；X_{ijk} 为地块(i，j)的土地利用类型，如果地块(i，j)的土地利用类型为 k，则 $X_{ijk}=1$，否则为 0；P_k 为单位地块土地利用类型 k 的经济效益系数[24]。

2.2.2　*最大化碳汇效益*　在低碳发展背景下，区域的低碳发展需求至关重要，特别是在全球气候变化日益严峻的今天，提升区域碳汇能力成为实现绿色可持续发展的关键举措，这不仅有助于减缓温室气体排放，还能促进生态系统健康，提升居民生活质量。共同构建低碳生态文明。从土地利用的角度出发，草地、林地、水域为主要碳汇。计算公式为：

$$\max(f_2)=\sum_{k=1}^{K}\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N}C_kX_{ijk} \tag{5}$$

式中：如果地块(i，j)的土地利用类型为 k，则 $X_{ijk}=1$，否则为 0；C_k 为单位地块土地利用类型 k 的碳系数。

2.2.3　*最大化紧凑度*　紧凑性可以被认为是城市密集化的最有前途的形式，对城市的可持续发展是积极的。紧凑性不仅缓解了扩张的压力，而且促进了土地的有效利用[25]。此外，它有助于减少资源消耗。城市紧凑度的提升对提高资源的使用效率起着关键作用。城市越紧凑，同一土地使用类型的集中度越高，资源配置越统一，效率也越高，同时也便于管理[26]。增强城市的紧凑度有利于促进可持续发展，并提升城市的经济与碳汇效益。本研究将最大化紧凑性作为第 3 个目标函数。

2.2.4　*最小化土地利用转换成本*　将最小化土地利用转化成本作为目标，适当控制实施土地利用优化配置策略所耗费的经济成本。依据土地利用类型转换成本系数对比优化前后各个地块单元的土地利用类型变化，获取每个地块单元的转换成本系数，加和得到区域土地利用类型转换成本作为第 4 个目标函数[27]。

$$\min(f_4)=\sum_{(x,y)\in U}f_c(m_{xy},n_{xy}) \tag{6}$$

式中：n_{xy} 为优化后的土地利用类型；m_{xy} 为原始土地利用类型；f_c 为优化前后的转换成本系数。

3　结果与分析

3.1　碳排、汇演变特征及碳平衡分区优化

3.1.1　*碳排放演变特征*　根据提供的长株潭城市群中各区县的碳排放随时间变化的数据，可以观察到一些显著的变化规律(图 1)。从总体趋势上看，长株潭城市群中的大多数区县碳排放量在过去 20 a 内显著增加。长沙市、株洲市和湘潭市的多个区县在 2000—2020 年期间都经历了碳排放量的大幅增长。例如，长沙市的浏阳市碳排放量在 2000 年约为 2.00×10^7 t，而到 2020 年则增长到接近 9.00×10^7 t。类似的增长也体现在株洲市的荷塘区和芦淞区等地区，显示了区域工业化和城市化进程加速带来的碳排放增加。不同区县的碳排放增长速度和幅度存在显

著差异，部分地区如长沙市的望城区和岳麓区，其碳排放量自 2000 年以来呈现出逐步上升的趋势，但增速相对平缓。而株洲市的石峰区和天元区，以及湘潭市的雨湖区等，碳排放量虽然增长明显，但相比其他区县，增速相对较小，反映了这些地区较低的工业活动水平或更有效的碳排放管理措施。从不同时间段的变化来看，碳排放量在 2005—2020 年期间增长尤为明显，尤其是 2015—2020 年期间，部分区县的碳排放量增幅达到高峰。例如，长沙市的宁乡市在这一期间碳排放量大幅攀升，这可能与区域内经济活动的快速发展、工业生产的增加以及基础设施建设的推进有关。总体而言，长株潭城市群中各区县的碳排放在过去 20 a 内整体呈现出显著增长的趋势，反映了区域内快速的工业化和城市化进程。然而，不同区县之间的碳排放增长速度和幅度存在显著差异，与当地的经济发展水平、产业结构和环保政策密切相关。

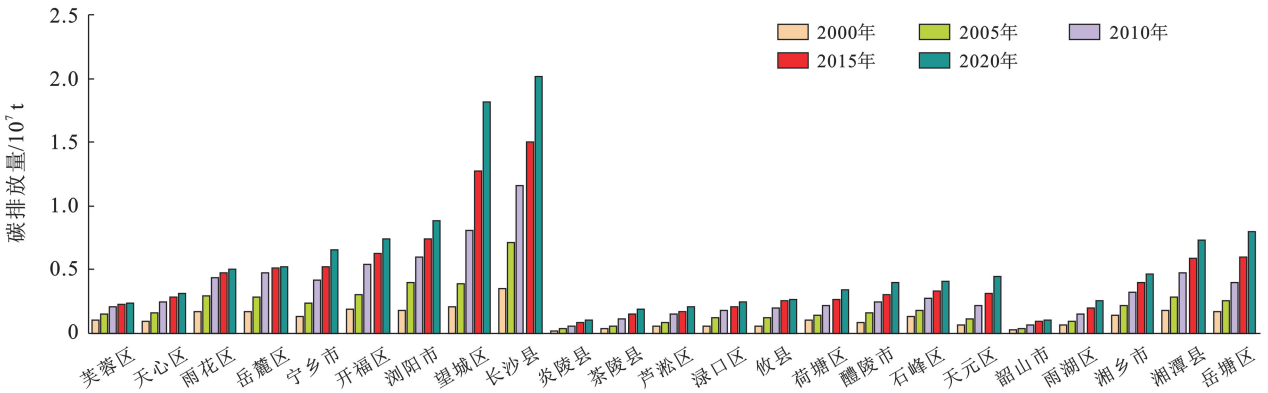

图 1 长株潭城市群各区县碳排放

Fig.1 Carbon emission in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration

3.1.2 碳汇时空特征 由图 2 可知，从整体趋势上看，尽管长株潭城市群各区县的碳汇水平较为稳定，但总体上呈现轻微下降的趋势。部分区县的碳汇量在过去 20 a 内下降幅度较小。例如，浏阳市的碳汇量从 2000 年的 2.54×10^5 t 到 2020 年的 2.53×10^5 t，碳汇总量变化小。这表明这些地区在环境保护方面做出了持续的努力。从不同时间段的变化来看，各区县的碳汇量在 2005—2020 年期间减少的幅度逐步增加，尤其是在 2015—2020 年期间，一些地区的碳汇降幅相对较大。例如，长沙市的岳麓区在该时间段的碳汇显著降低。这可能与城市化的快速发展有关。从空间上来看(图 3)，碳汇冷点(蓝色区域)主要分布在城市群的中西部区域，特别是在中心城区周边和主要城市的集聚区。这表明这些区域碳汇能力较低，可能是由于高人口密度、工业化程度高以及较少的植被覆盖所致，与城市发展常见的特点一致，高密度的人口和大量的建设用地通常会减少碳汇功能，这与李建豹等[17]的研究结果一致。相反，碳汇热点(红色区域)主要分布在城市群的边缘和南部地区，特别是一些山区和生态保护区。这些区域具备较高的碳汇能力，是由于植被覆盖良好，生态环境相对较好所造成的。总体来说，长株潭城市群各区县的碳汇量在过去 20 a 中总体上呈现出轻微的下降趋势，这反映了区域内以经济发展为主，对生态的关注相对不足。尽管不同区县之间的碳汇变化幅度存在差异，但大部分地区的碳汇量保持相对稳定的水平。

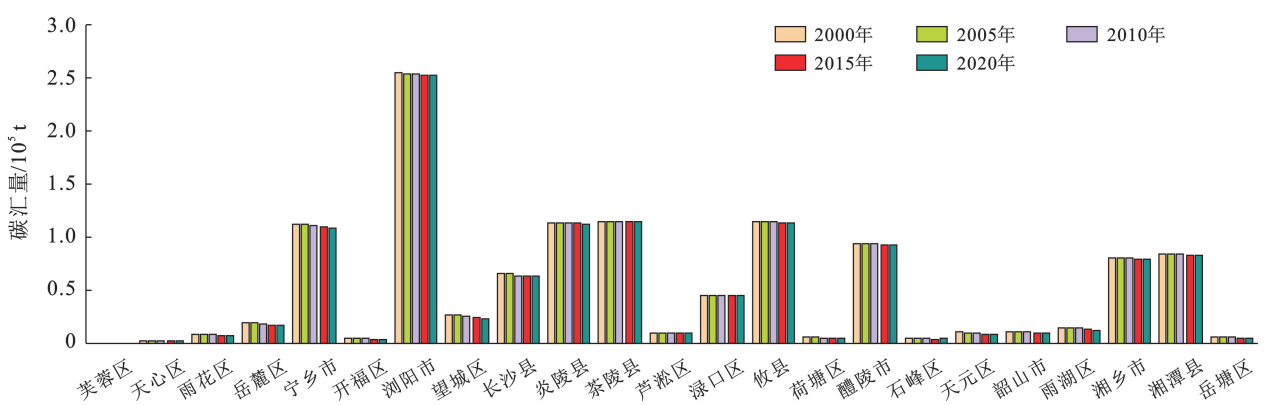

图 2 长株潭城市群各区县碳汇

Fig.2 Carbon sinks in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration

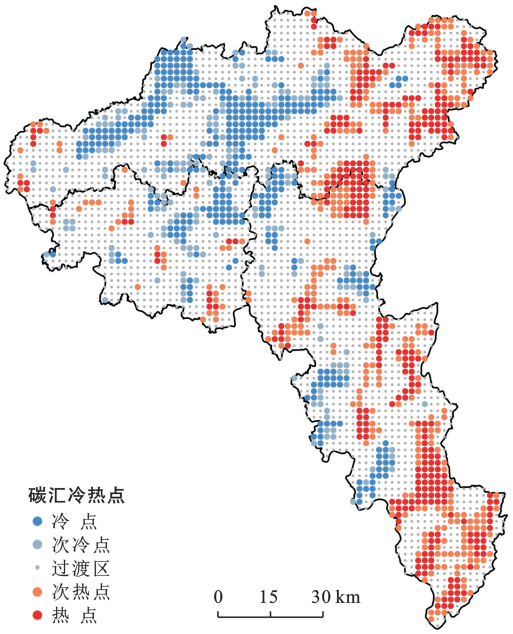

图 3　长株潭城市群碳汇冷热点分析

Fig.3　Analysis of cold hot spots of carbon sinks in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration

3.1.3　*碳平衡分区空间分布分析*　依据碳生态承载系数和碳排放经济贡献系数,将 2020 年长株潭城市群各区县分为 4 种类型(表 1):①绿色发展区主要位于长株潭城市群的东部与西部,包括宁乡市、浏阳市、醴陵市,占长株潭城市数量的 13.0%。以上区县的碳排放经济贡献系数和碳生态承载系数均较高,能源利用的效率和碳吸收能力较强。此类区县内存在大量的林地、水域,因此经济与生态相对较为平衡,未来的发展方向为全面提升环境质量,进一步提升碳汇总量。②碳汇发展区主要位于长株潭城市群的中部地区,包括芙蓉区、天心区、岳麓区、开服区、雨花区、芦淞区、雨湖区,占长株潭城市数量的 30.4%。以上区县的经济发展很好,经济贡献系数较高,但生态承载系数较低,碳汇较少,此类区县的生态承载力是制约其社会发展的重要限制因素。未来的方向应是持续提升环境的生态承载力。③经济发展区主要位于长株潭城市群的南部地区,包括渌口、攸县、茶陵、炎陵、湘潭县、湘乡、韶山,占长株潭城市数量的 30.4%。以上区县的碳生态承载系数较高,碳汇能力强,但经济发展相对落后,碳排放经济贡献系数较低,此类区县的经济与生态保护之间的不平衡阻碍它们的高质量发展。未来的发展方向为提升区域经济能力。④综合优化区主要位于长株潭城市群的北部地区并且呈环状分布,包括长沙县、望城区、石峰区、天元区、岳塘区、荷塘区,占长株潭城市数量的 26.1%。以上区县的碳排放经济贡献系数较低,碳生态承载系数较低,碳汇能力较弱,经济建设和生态建设都有一定的提升空间,未来的发展方向为全面提升其碳排放的经济效率和生态承载力,实现减排增汇的双重目标。

表 1　长株潭城市群碳平衡分区

Table 1　Carbon balance subdivision in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration

碳平衡分区	划分依据	地 区
绿色发展区	ECC>1, ESC>1	宁乡市、浏阳市、醴陵市
碳汇发展区	ECC>1, ESC<1	芙蓉区、天心区、岳麓区、开服区、雨花区、芦淞区、雨湖区
经济发展区	ECC<1, ESC>1	渌口区、攸县、茶陵县、炎陵县、湘潭县、湘乡市、韶山市
综合优化区	ECC<1, ESC<1	长沙县、望城区、石峰区、天元区、岳塘区、荷塘区

3.1.4　*碳平衡分区优化策略分析*　改进后的 NSGA-Ⅱ算法的计算结果呈现出 Pareto 前沿,其中包含大量不带偏好的非支配解,每个解都代表一种土地优化方案。然而,在实际的土地利用规划决策过程中,决策者需要根据不同的偏好,从这些优化结果中选择一个合适的方案。因此,在结果分析时,需要依据不同的策略来选择特定的土地利用优化方案进行评。①绿色发展区。该区域的特征是碳排放经济贡献系数与碳生态承载力系数均较高,表明该区域的碳汇能力与能源利用效率都很高,这使得绿色发展区在区域经济发展与生态保护之间实现较好的平衡。应继续加强生态保护,防止过度开发,维持现有的碳汇能力,即在遗传算法形成的 Pareto 中选择最小化转换成本方案。②碳汇发展区。该区域的特征是碳排放经济贡献系数较高,该区域的能源利用效率较高,因此,选择碳汇偏好的方案不仅可以提升区域碳汇能力,还能在兼顾经济效益的前提下,推动区域生态可持续发展,最终实现生态与经济的双赢局面。即在遗传算法形成的 Pareto 中选择碳汇偏好的方案。③经济发展区。该区域的特征是碳排放经济系数较低,碳生态承载力系数较高,表明该地区的能源利用效率低,但碳汇能力较强,因此,在保障研究区的生态效益不降低的基础上尽可能的增加经济发展,即在遗传算法形成的 Pareto 中选择经济效益偏好的方案。④综合优化区。该区域的特征是碳排放经济贡献系数与碳生态承载力系数均较低,表明该区域的碳汇能力与能源利用效率都很低,因此,在遗传算法形成的 Pareto 中选择折中的方案。

3.2 土地利用格局优化与效益评价

3.2.1 多目标土地利用优化格局分析 由表2可知，①在绿色发展区有少量的耕地减少，从优化前的2 641.5 km² 减少到优化后的2 620.50 km²，减少了21.00 km²。这意味着在绿色发展区中，耕地转变为其他地类。同时，林地面积有所增加，从6 813.75 km² 增加到6 827.75 km²，增加了14.00 km²，表明该区域注重生态恢复和森林覆盖率的提高。此外，水域面积从132.50 km² 增加到139.00 km²，增加了6.50 km²。建设用地也有所增加，从328.75 km² 增加到330.75 km²，增加了2.00 km²，绿色发展区的地类变化较少，但流转方向为林地、水域，反映了多目标优化在提升碳汇与经济效益的同时兼顾了成本的控制。②在碳汇发展区，耕地面积有所减少，从532.00 km² 减少到333.25 km²，减少198.75 km²。林地与水域面积则显著增加，分别增加93.25 km² 与40.50 km²，这表明此区域主要是通过增加林地与水域以实现更多的碳吸收，以此增加区域的碳汇能力。③经济发展区的土地利用变化显示出经济活动对土地需求的增加。耕地面积减少164.75 km²，但建成用地也增加18.25 km²。这种土地利用变化显示在经济发展过程中，虽然部分耕地减少，但通过增加林地和建设用地，整体上实现经济发展和环境保护的平衡。④综合优化区的土地变化较为多样化。耕地面积减少711.00 km²，从优化前的1 299.75 km² 减少到优化后的588.75 km²。

同时，林地面积显著增加，从1 612 km² 增加到1 831.50 km²，增幅达219.50 km²。此外，水域和建成用地面积也有所增加，水域增加150.50 km²，建成用地增加144.50 km²。这表明在综合优化区，土地利用优化的重点是通过减少耕地和增加林地、水域以及适度扩展建设用地，实现生态效益和经济发展的双重目标。

表2 优化前后不同分区的用地面积变化

Table 2 Changes of site area in different zoning districts before and after optimization km²

土地利用类型	绿色发展区			碳汇发展区		
	现状面积	优化后面积	变化量	现状面积	优化后面积	变化量
耕地	2 641.50	2 620.50	−21.00	532.00	333.25	−198.75
林地	6 813.75	6 827.75	14.00	762.25	855.50	93.25
草地	130.50	130.50	0	7.25	40.75	33.50
水域	132.50	139.00	6.50	86.25	118.00	31.75
建设用地	328.75	330.75	2.00	491.00	531.50	40.50
未利用地	2.75	1.25	−1.50	1.00	0.75	−0.25
土地利用类型	经济发展区			综合优化区		
	现状面积	优化后面积	变化量	现状面积	优化后面积	变化量
耕地	858.75	694.00	−164.75	1 299.75	588.75	−711.00
林地	2 090.00	2 229.25	139.25	1 612.00	1 831.50	219.50
草地	70.50	28.25	−42.25	14.00	213.25	199.25
水域	52.25	101.75	49.50	139.00	289.50	150.50
建设用地	80.25	98.50	18.25	483.00	627.50	144.50
未利用地	25.00	25.00	0	425.00	150.00	−275.00

优化后的土地利用(图4)变化反映了各分区根据不同发展重点进行的精准调整。绿色发展区注重生态恢复和保护，增加了林地和水域面积；碳汇发展区优先增加林地、水域以提升碳汇能力；经济发展区优先增加建设用地，但在发展建设用地的同时并没有忽视环境保护，也部分增加了林地；综合优化区平衡了生态和经济发展需求，通过多种土地利用的优化调整使林地、水域以及建设用地协调增长，确保了区域可持续发展的实现。这些优化措施将有助于实现长株潭城市群在经济发展与生态环境保护之间的和谐发展。

3.2.2 土地利用效益分析 由表3可知，多个土地利用类型之间存在显著的流转。耕地面积为最大的流出地类，主要流向林地(765.75 km²)和水域(153.75 km²)。草地的减少面积也较为显著，主要流向林地(8.25 km²)和水域(4.50 km²)。这种转移主要是为了提升区域的碳汇量，达到最大碳汇量的优化目标，也有助于水源涵养，提升生态服务功能。建设用地的面积从1 621.00 km² 增加到1 857.25 km²，增加的部分主要来源于耕地和林地。这种转移主要是为了提升区域的经济效益，维持生态与经济的可持续发展。

其中，未利用地的变化较少，表明优化方案注重保留一定的自然空间和灵活度，维持整体土地利用的可持续性。

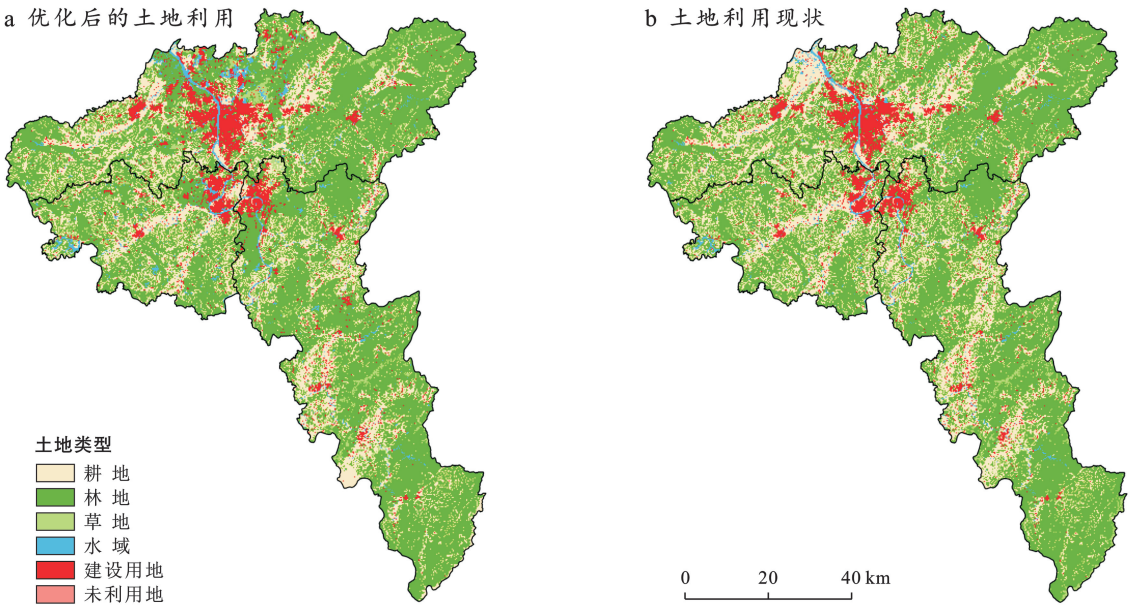

图 4　长株潭城市群地区土地利用配置情景

Fig.4　Land-use configuration scenarios in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration

由表 4 可知,通过以碳汇效益、紧凑度、经济效益和最小转换次数为目标进行优化后的土地利用方案,在各项指标上均有显著提升。具体而言,优化后的碳汇量增加了 4.2%,显著提升了区域的碳汇能力,有助于碳中和目标的实现。经济效益方面,优化后的 GDP 增加了 28.5%,显示出土地利用调整大幅驱动了经济增长。紧凑度指标提升了 3.6%,表明土地利用更加集中、高效,有助于减少土地资源的浪费。总体来说,该优化土地利用方案在碳汇效益、经济增长和土地利用效率上均具备显著优势,同时兼顾了转换成本的控制,展示了科学规划与综合优化的显著成效。这一结果为未来的土地利用政策和规划提供了有力依据,有助于实现生态与经济的协调发展。

表 3　目标策略下长株潭城市群土地利用转移矩阵

Table 3　Land use transfer matrix for Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration under target strategy　km^2

土地利用类型	耕 地	林 地	草 地	水 域	建设用地	未利用地	总 计
耕 地	6 662.00	765.75	202.25	153.75	151.50	—	7 935.25
林 地	131.75	171 42	83.75	86.00	81.50	—	17 525.00
草 地	87.50	8.25	331.50	4.50	3.25	—	435.00
水 域	—	—	—	569.25	—	—	569.25
建设用地	—	—	—	—	1 621.00	—	1 621.00
未利用地	1.00	1.25	0.25	0.50	—	5.25	8.25
总 计	6 882.25	17 917.25	617.75	814.00	1 857.25	5.25	28 093.75

表 4　长株潭城市群土地利用优化前后效益对比

Table 4　Comparison of benefits before and after land use optimization in Changsha - Zhuzhou - Xiangtan urban agglomeration

项 目	碳汇量/t	GDP/万元	紧凑度	转换成本
目标方案	5.00×10^6	2.30×10^8	6.05×10^5	4.81×10^5
用地现状	4.75×10^6	1.80×10^8	5.84×10^5	—

4　结论与建议

4.1　结 论

通过应用 CoMOLA 模型对城市群土地的不同碳平衡区域进行优化,从而实现土地资源在数量、结构和目标效益方面的协同优化。

(1) 2000—2020 年,长株潭城市群碳排放总量呈逐年上升趋势,其主要的碳源地为建设用地与耕地。碳汇总量在这 20 a 间呈现出轻微的下降趋势,其主要的碳汇地是林地与水域。

(2) 基于对区县层面的碳平衡分析,将其分为 4 种类型的碳平衡功能区。其中,有 3 个区县属于绿色发展区比例 13.0%,具有较高的碳汇能力和碳排放经济效率。有 7 个区县属于碳汇发展区比例 30.4%,具有较高的碳排放经济效率但碳汇能力较弱。有

7 个区县属于经济发展区比例 30.4%，具有较高的碳汇能力但碳排放经济效率较低。有 6 个区县属于综合优化区比例 26.1%，在碳汇能力和碳排放经济效率方面均较低。

(3) 从土地利用角度来看，绿色发展区注重成本控制，少量增加林地和水域；碳汇发展区优先增加林地和水域以提升碳汇能力；经济发展区主要增加建设用地，增加部分林地；综合优化区平衡生态和经济需求，协调增加林地、水域和建设用地。

4.2 建 议

碳平衡分区划分的最终目的是在碳排放和碳吸收之间实现利益均衡，推动城市区域内的碳公平和协同减排，力争建立全国绿色低碳发展示范区。为此，本文建议对于绿色发展区，这些区县的碳排放经济贡献和碳生态承载能力都很高，能源利用效率和碳吸收能力较强，经济与生态平衡较好。应当重点提升林草地质量和农田效益，优先流转土地用于林地和水域，以增强碳汇能力。对于经济发展区，碳生态承载能力高，但经济发展落后，碳排放经济贡献低。应当优化产业结构，推动传统产业智能化和绿色化，发展新兴产业，加强技术创新，适度增加建设用地，推动经济发展。对于碳汇发展区，这些区县为城市群经济核心区，经济结构合理但生态承载能力低，缺乏环境保护，碳汇量少。应当加强生态保护和修复，提升碳汇功能，实施生态工程，增加森林和水域面积，保护草原生态，提升耕地质量和土壤碳库稳定性。对于综合优化区，这些区县碳排放经济贡献和碳生态承载能力都低，产业结构单一，重化工业比例大，区域生产总值低，碳吸收能力不足。应当提高能源利用效率，转变能源结构，平衡经济效益与生态保护，主要发展建设用地、林地和水域。

参考文献(References)

[1] Asarpota K, Nadin V. Energy strategies, the urban dimension, and spatial planning [J]. Energies, 2020, 13(14):3642.

[2] 韦彦汀，李思佳，张华.成渝城市群碳排放时空特征及其影响因素[J].中国环境科学，2022，42(10)：4807-4816.
Wei Yanting, Li Sijia, Zhang Hua. Temporal-spatial evolution of carbon emission and driving factors in the Chengdu-Chongqing urban agglomeration [J]. China Environmental Science, 2022,42(10):4807-4816.

[3] 宋苑震，曾坚，王森，等.中国县域碳排放时空演变与异质性[J].环境科学，2023，44(1)：549-559.
Song Yuanzhen, Zeng Jian, Wang Sen, et al. Spatial-temporal evolution and heterogeneity of carbon emissions at county-level in China [J]. Environmental Science, 2023,44(1):549-559.

[4] 袁建勋，方斌，阚红云，等.基于自然—经济综合视角的碳排放强度与生态盈亏多情景模拟研究：以淮海经济区为例[J].生态学报，2024，44(6)：2199-2215.
Yuan Jianxun, Fang Bin, Kan Hongyun, et al. Multi-scenario simulation of carbon emission intensity and ecological profit and loss from the perspective of nature and economy in Huaihai Economic Zone [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(6):2199-2215.

[5] Ye Yuyao, Wang Changjian, Zhang Yuling, et al. Low-carbon transportation oriented urban spatial structure: Theory, model and case study [J]. Sustainability, 2017, 10(1):19.

[6] 李远航，郝兴明，张静静，等.近 17 a 阿克苏绿洲农田净碳汇功能的时空变化[J].干旱区研究，2022，39(4)：1303-1311.
Li Yuanhang, Hao Xingming, Zhang Jingjing, et al. Spatial and temporal variation of net carbon sink function of farmland in Aksu oasis in the past 17 years [J]. Arid Zone Research, 2022,39(4):1303-1311.

[7] 朱建华，田宇，李奇，等.中国森林生态系统碳汇现状与潜力[J].生态学报，2023，43(9)：3442-3457.
Zhu Jianhua, Tian Yu, Li Qi, et al. The current and potential carbon sink in forest ecosystem in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(9):3442-3457.

[8] Lyu Xin, Li Xiaobing, Wang Kai, et al. Strengthening grassland carbon source and sink management to enhance its contribution to regional carbon neutrality [J]. Ecological Indicators, 2023,152:110341.

[9] 石铁矛，王迪，汤煜，等.城市生态系统碳汇固碳能力计算方法与影响因素研究进展[J].应用生态学报，2023，34(2)：555-565.
Shi Tiemao, Wang Di, Tang Yu, et al. Research progress on calculation method and impact factors of carbon sequestration capacity in urban ecosystems [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023,34(2):555-565.

[10] 朴世龙，岳超，丁金枝，等.试论陆地生态系统碳汇在“碳中和”目标中的作用[J].中国科学(地球科学)，2022，52(7)：1419-1426.
Piao Shilong, Yue Chao, Ding Jinzhi, et al. On the role of carbon sink in terrestrial ecosystem in the goal of “carbon neutrality” [J]. Scientia Sinica (Terrae), 2022,52(7):1419-1426.

[11] Wu Yinyin, Wang Ping, Liu Xin, et al. Analysis of regional carbon allocation and carbon trading based on net primary productivity in China [J]. China Economic Review, 2020,60:101401.

[12] 刘荣，高敏华，谢峰.基于 Logistic 回归模型的土地利用

格局模拟分析：以新疆吐鲁番市为例[J].水土保持研究，2009，16(6)：74-78.
Liu Rong，Gao Minhua，Xie Feng. Simulation and analysis of land use patterns based on logistic regression model：A case study of Turpan [J]. Research of Soil and Water Conservation，2009，16(6)：74-78.

[13] Stewart T J，Janssen R，van Herwijnen M. A genetic algorithm approach to multiobjective land use planning [J]. Computers & Operations Research，2004，31(14)：2293-2313.

[14] 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[J].生态学报，2016，36(17)：5391-5400.
Chen Ying，Zhang Li，He Ling，et al. Multi-scenario simulation of land use structure based on dual combined models [J]. Acta Ecologica Sinica，2016，36(17)：5391-5400.

[15] 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[J].地理学报，2011，66(7)：972-984.
Zhang Honghui，Zeng Yongnian，Tan Rong，et al. A model for regional land use optimization allocation based on multi-agent system and its application [J]. Acta Geographica Sinica，2011，66(7)：972-984.

[16] 莫惠斌，王少剑.黄河流域县域碳排放的时空格局演变及空间效应机制[J].地理科学，2021，41(8)：1324-1335.
Mo Huibin，Wang Shaojian. Spatio-temporal evolution and spatial effect mechanism of carbon emission at county level in the Yellow River basin [J]. Scientia Geographica Sinica，2021，41(8)：1324-1335.

[17] 李建豹，陈红梅，张彩莉，等.长三角地区碳源碳汇时空演化特征及碳平衡分区[J].环境科学，2024，45(7)：4090-4100.
Li Jianbao，Chen Hongmei，Zhang Caili，et al. Spatio-temporal evolution characteristics of carbon sources and carbon sinks and carbon balance zoning in the Yangtze River delta region [J]. Environmental Science，2024，45(7)：4090-4100.

[18] Zhang Zhenlong，Yu Xiaoping，Hou Yanzhen，et al. Carbon emission patterns and carbon balance zoning in urban territorial spaces based on multisource data：A case study of Suzhou City，China [J]. ISPRS Int J Geo Inf，2023，12：385.

[19] 赵明月，刘源鑫，张雪艳.农田生态系统碳汇研究进展[J].生态学报，2022，42(23)：9405-9416.
Zhao Mingyue，Liu Yuanxin，Zhang Xueyan. A review of research advances on carbon sinks in farmland ecosystems [J]. Acta Ecologica Sinica，2022，42(23)：9405-9416.

[20] 李姗珊，王权明.基于 GIS 的土地利用碳收支时空分异及碳平衡分区研究：以大连市为例[J].绿色科技，2023，25(24)：257-264.
Li Shanshan，Wang Quanming. Spatial and temporal differentiation of land use carbon budget and carbon balance zoning based on GIS：Taking Dalian City as an example [J]. Journal of Green Science and Technology，2023，25(24)：257-264.

[21] 徐影，郭楠，茹凯丽，等.碳中和视角下福建省国土空间分区特征与优化策略[J].应用生态学报，2022，33(2)：500-508.
Xu Ying，Guo Nan，Ru Kaili，et al. Characteristics and optimization strategies of territorial space zone in Fujian Province，China based on carbon neutrality [J]. Chinese Journal of Applied Ecology，2022，33(2)：500-508.

[22] 周波，许源溪，冯田.成渝城市群碳平衡空间分异与优化对策[J].长江流域资源与环境，2024，33(8)：1650-1662.
Zhou Bo，Xu Yuanxi，Feng Tian. Spatial differentiation of carbon balance and optimization countermeasures in Chengdu-Chongqing urban agglomeration [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin，2024，33(8)：1650-1662.

[23] Strauch M，Cord A F，Pätzold C，et al. Constraints in multi-objective optimization of land use allocation：Repair or penalize? [J]. Environmental Modelling & Software，2019，118：241-251.

[24] 王昊煜，高培超，谢一茹，等.基于遗传算法的土地利用优化：NSGA-Ⅱ和 NSGA-Ⅲ的对比研究[J].生态学报，2023，43(2)：639-649.
Wang Haoyu，Gao Peichao，Xie Yiru，et al. Land-use optimization based on genetic algorithm：A comparison between NSGA-Ⅱ and NSGA-Ⅲ [J]. Acta Ecologica Sinica，2023，43(2)：639-649.

[25] Cao Kai，Huang Bo，Wang Shaowen，et al. Sustainable land use optimization using boundary-based fast genetic algorithm [J]. Computers，Environment and Urban Systems，2012，36(3)：257-269.

[26] Gao Peichao，Wang Xiangyu W，Wang Haoyu，et al. Viewpoint：A correction to the entropy weight coefficient method by Shen et al. for accessing urban sustainability [Cities 42 (2015) 186-194] [J]. Cities，2020，103(C)：102742.

[27] 王海军，曾浩然，张文婷，等.基于改进的 GPU 并行 NSGA-Ⅲ的土地利用优化配置[J].农业工程学报，2020，36(21)：283-291.
Wang Haijun，Zeng Haoran，Zhang Wenting，et al. Land use optimization allocation based on improved NSGA-Ⅲ by GPU parallel computing [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2020，36(21)：283-291.