

西宁—海东都市圈不同土地利用情景下生态系统服务模拟：基于 GMOP-PLUS-InVEST 模型

宣炳旭^{1,2†}, 魏晓燕³, 毛旭锋^{*1,2}, 姚乃鑫⁴, 金鑫^{1,2}, 张乐乐

^{1,2}, 杜凯^{1,2}, 金彦香^{1,2}

1. 青藏高原自然地理与生态保育教育部重点实验室; 青海省自然地理与环境过程重点实验室, 西宁, 810000;

2. 青海师范大学地理科学学院, 西宁, 810000;

3. 青海师范大学经济管理学院, 西宁, 810000;

4. 青海林业监理中心有限公司, 西宁, 810000

摘要: 生态系统服务是维系可持续发展的基础。生态系统服务的可持续性依赖于土地利用模式的优化。本研究以青藏高原东北缘的西宁—海东都市圈为研究对象, 针对其发展空间稀缺性和三生空间竞争性的冲突问题, 采用多目标优化和土地利用模拟模型模拟的方法, 结合 InVEST 模型评估了 2010–2020 年土地利用变化与生态系统服务特征, 模拟了 2040 年自然发展, 经济发展, 生态保护三种发展模式下生态系统服务变化特征。研究发现: (1) 2010–2020 年, 研究区建设用地扩张先快后慢, 林地和草地面积缩减导致生境质量下降 0.01, 碳储量减少 192,492.28 吨, 但平均产水量增加 0.23 毫米。南北山脉因人类活动干扰较少, 成为高生境质量、高碳汇和低产水量的生态屏障。(2) 在 ND 和 ED 情景下, 产水量上升, 生境质量大幅下降, 无法支撑都市圈的可持续发展; 而 EC 情景通过平衡经济与生态保护, 使生境质量仅小幅下降, 碳储量增加, 且产水量增幅最小, 体现了生态保护与发展的协调性。(3) 多目标优化与空间模拟结合的量化决策方法, 可为高原都市圈土地利用结构优化提供量化决策工具。研究发现, 经济与生态协调发展模式能够有效平衡城市扩张与生态保护, 为高原型都市圈可持续发展提供重要科学依据。

关键词: 生态系统服务; 多目标优化模型; 土地利用情景模拟; 高原都市圈

中图分类号: F299.22:X321

收稿日期: 2025-04-17

Research on Ecosystem Services in the Xining-Haidong Metropolitan Area Under Different Land Use Scenarios: Based on the GMOP-PLUS-InVEST Model

Xuan Bingxu^{1,2}, Wei Xiaoyan³, Mao Xufeng^{1,2}, Yao Naixin⁴, Jin Xin^{1,2}, Zhang Lele^{1,2}, Du Kai^{1,2}, Jin Yanxiang^{1,2}

资助项目: 青海省科技厅自然科学基金 (2024-ZJ-910); 国家自然科学基金 (42201174)。

第一作者: 宣炳旭, 男, 硕士研究生, 从事湿地生态过程研究. E-mail: xuanbingxu@163.com,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-0085-514X>

通讯作者: 毛旭锋, 男, 教授, 从事湿地生态过程研究. E-mail: maoxufeng@yeah.net

1. *Key Laboratory of Natural Geography and Ecological Conservation, Education Department;*
2. *Provincial Key Laboratory of Natural Geography and Environmental Processes, Xining, 810000;*
3. *Geography Department, Qinghai Normal University, Xining, 810000;*
4. *Economic Management College, Qinghai Normal University, Xining, 810000;*
5. *Qinghai Forestry Supervision and Inspection Center Co., Ltd., Xining, 810000.*

Abstract: Ecosystem services are the foundation for sustaining development. The sustainability of ecosystem services is closely tied to the optimization of land use patterns. This study focuses on the Xining-Haidong metropolitan area on the northeastern edge of the Qinghai-Tibet Plateau, to address challenges posed by limited development space and spatial conflicts among production, living, and ecological functions. By integrating multi-objective optimization models, land use simulation frameworks, and the InVEST model, we assessed the characteristics of land use changes and ecosystem services from 2010 to 2020, and simulated the characteristics of ecosystem service changes under three development scenarios (natural development, economic development, and ecological conservation) for 2040. Key findings include: (1) From 2010 to 2020, the expansion of construction land in the study area was initially rapid and then slowed down; reductions in forest and grassland areas led to a decline of 0.01 in habitat quality and a decrease of 192,492.28 tons in carbon storage, while average water yield increased by 0.23 mm. The north-south mountain ranges, less disturbed by human activities, served as ecological barriers with high habitat quality, high carbon sequestration, and low water yield. (2) Under the ND and ED scenarios, water yield increased significantly, but habitat quality declined sharply, rendering these scenarios unsustainable for the metropolitan area. Conversely, the EC scenario achieved a balance between economy and ecology, leading to only a slight decrease in habitat quality, an increase in carbon storage, and the smallest increase in water yield, demonstrating the harmony between ecological protection and development. (3) A quantitative decision-making method combining multi-objective optimization and spatial simulation can provide a quantified decision-making tool for optimizing land use structures in plateau metropolitan areas. The findings indicate that a coordinated development model prioritizing both economic and ecological objectives can effectively reconcile urban expansion with ecological conservation, offering critical scientific support for the sustainable development of plateau-type metropolitan regions.

Keywords: Ecosystem Services; Multi-objective Optimization Model; Land Use Scenario Simulation; Plateau Metropolitan Area

0 引言

当前,快速城镇化与工业化加速发展的过程会导致生态系统服务(ES)的严重退化(Liu and Zhang, 2024)。其中由于高海拔地区具有的高生态系统敏感性,使其成为关键风险区。根据科技部《全球生态环境遥感监测 2023 年度报告》,1985-2020 年全球城市用地平均增长速率为 1.60 万 km²/year,直接导致土地覆被破碎化与生物栖息地丧失,其中高海拔区域单位面积生态服务价值的损失速率显著高于低海拔地区(Yang et al., 2023),显示了高海拔生态系

统对干扰的极端敏感性(Mountain Research Initiative EDW Working Group, 2015)。以青藏高原为例, 该地区的冰川消融在 2010 年后显著加速, 中亚的冰川质量损失从 2000-2004 年的 -2.6 GT yr^{-1} 增至 2015-2019 年的 -16.0 GT yr^{-1} (Hugonnet et al., 2021), 同时, 青藏高原活动层和永冻层细菌群落的种间相互作用也显著影响碳储存动态(Han et al., 2024; Wood and Hazra, 2017)。冰川退缩扰乱产水服务供给能力, 碳储量下降削弱气候调节功能, 而栖息地向着破碎化发展则触发生物多样性崩溃风险, 这种“尺度传递效应”威胁着生态安全。IPCC 特别报告警示人们, 生态脆弱区土地覆被的微小变化可能通过地表反照率和水文连通性等正反馈机制诱发区域性气候失衡与生物多样性降低。在此背景下, 以高原型都市圈的土地利用模式为切入点, 维系生态系统服务功能, 不仅是实现“联合国生态系统恢复十年(2021-2030)”目标的路径, 也是维系“中华水塔”战略安全的关键。

与青藏高原的其他地区相比, 青海省西宁市和海东市均位于河湟谷地内, 其狭长地形与敏感的生态环境构成了独特的地理特征, 限制了两座城市的发展。青海省着眼于未来发展需要, 将两市整合成“西宁-海东都市圈”, 承担吸纳人口转移、推动产业集聚的重任。然而, 青海省《国土空间规划(2021-2035)》数据显示, 西宁海东都市圈以全省约 3%的土地承担了 65%的人口, 面临显著的土地资源约束与发展压力。在快速城市化过程中, 草地、森林等生态用地锐减, 建设用地扩张, 直接削弱区域生境质量、碳储量及产水量等 ES 的供给能力(孙思奥等, 2019)。都市圈面临“河谷空间稀缺性”与“三生空间竞争性”的双向冲突。因此, 通过 PLUS 模型模拟土地利用演变趋势, 结合 InVEST 模型量化 ES, 可为优化高原河谷地带“保护-发展”权衡关系提供科学依据。

ES 的变化与土地利用模式相关, 因此预测未来 ES 变化, 首先要预测土地利用的发展趋势。目前, 学界已经形成了利用土地利用模型进行研究的范式, 如 CLUE-S 模型、CA-Markov 模型、FLUS 模型(Hu et al., 2020)以及 PLUS 模型等进行区域未来土地预测(Wang et al., 2023)。相比于其他模型, PLUS 模型能够有效预测不同情景下的土地利用变化趋势。但 PLUS 缺乏对土地利用数量结构进行定量优化的能力, 需要结合外部模型确定土地利用数量。因此, 为克服这一局限, 一些研究(Chen et al., 2024; Fu et al., 2024; Wang et al., 2024)引入了灰色多目标优化(Grey Multi-Objective Optimization, GMOP)模型用以量化土地利用数量结构。对于 ES, 选择评估指标时应注重指标与生态系统服务的相关性、测量性、解释性。InVEST 模型在空间分析及数据计算上具有优势, 利用 InVEST 模型可以模拟不同土地利用情景下的生态系统服务供给能力, 因此可以用于对 ES 的评估。

当前 GMOP 模型在土地利用数量结构优化方面仍存在一定的提升空间。一、在一些研究中(Chen et al., 2024), 求解方法依赖线性规划算法, 其算法在复杂系统的非线性特征求解过程中会导致解空间探索不充分(Niu et al., 2018)。二、现有多目标优化多采用加权求和以及 ε -约束法等标量化方法, 这种人为预设权重的方式需要多次试错, 影响土地利用数量优化的准确性。三、搜索效率存在瓶颈, 遗传算法(GA)的全局搜索机制依赖于样本的交叉和随机变异, 在优化过程中易因种群多样性下降而陷入局部最优, 过早收敛, 使得土地利用规划结果可能陷入局部最优解, 即在规划中无法达到经济最优或生态情景的最优。基于以上三个问题, 需要一种能兼顾复杂系统适应性、目标权衡客观性与全局搜索效能的优化方法。而模拟退火算法(SA)能够概率性接受劣解, 同时通过温度参数动态调节搜索过程。且现有研究

尚未充分探索 SA 与 NSGA-II 在土地利用数量规划领域的作用。为此, 本文根据 Xin 等人 Xin et al., 2024) 提出改进型多目标优化算法, 通过在 GA 的变异环节嵌入 SA 的局部搜索策略, 优化 NSGA-II 的全局搜索能力, 克服单一遗传算法在后期搜索解空间能力不足的问题, 更好的为土地利用数量规划服务。

本研究关注高原型都市圈未来发展问题, 聚焦西宁—海东都市圈这一典型区域进行研究, 利用优化后的 NSGA-II 模型对研究区 2040 年自然发展、经济发展优先及生态保护优先三种情景的土地利用需求数量进行求解, 随后利用 PLUS 模型对三种情景土地利用空间格局进行模拟, 最后利用 InVEST 模型评估这些变化对该地区生境质量、碳储量和产水量三种关键生态系统服务的影响。研究可以为西宁—海东地区及其他类似高原型城市圈未来发展提供了指导, 在破解“河谷空间稀缺性”与“三生空间竞争性”的双重挑战上提供了新方法, 为实现区域可持续发展奠定了重要基础。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

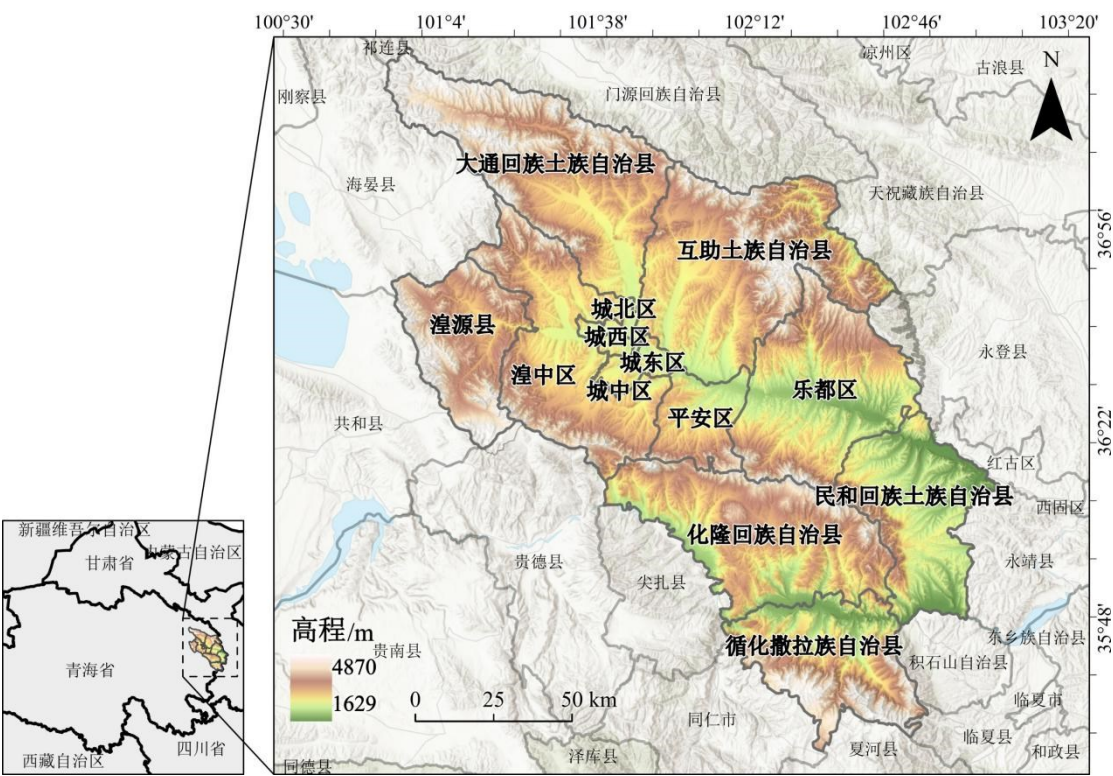


图 1 研究区概况

Fig.1 Research Area

西宁—海东都市圈是青海省西宁市与海东市组成的跨行政区协同发展区域, 是兰西城市群的关键构成部分, 承担着引领青藏高原生态保护与高质量发展的战略职能。研究区位于东经 100°41'-103°4', 北纬 36°13'-37°28' 之间, 总面积 2.086 万 km² (图 1)。西宁海东都市圈是基于地理相邻性、经济联系紧密性以及协同发展需要而提出的概念, 是青海省的经济增长极。截至 2020 年, 都市圈内常住人口 383.4 万人, 地区生产总值 1887.58 亿元。该地区位于湟水

中游河谷盆地，三面环山，地势西高东低，城市群呈东西狭长分布。该地属于大陆性高原气候，整体气温和降水偏低(Wei et al., 2023)。

1.2 数据来源

土地利用数据来自中科院资源环境科学与数据中心 (<https://www.resdc.cn/>)。数字高程模型 (DEM)、坡度和坡向信息，空间分辨率为 30m，来源于地理空间数据云网站 (<http://www.gscloud.cn>)，为研究提供详细的研究区域地形特征。气象数据包括温度、降雨量以及潜在蒸散量，其空间分辨率为 1,000m，源自青海省内的气象站点观测数据。将这些观测数据重采样至 30m，匹配其他数据的分辨率便于后续研究。土壤深度数据的空间分辨率为 250m，来源于 ISRIC 国际土壤参比信息中心 (<https://www.isric.cn>)。社会经济数据包括人口和 GDP 统计的空间分辨率为 1000 米，来源于中国科学院资源与环境数据中心 (<http://www.resdc.cn>)，同样重采样至 30m。交通数据集包含高速公路、铁路、国家公路和省级公路的信息，采用矢量数据格式，来源于开放街道地图网站 (<https://www.openstreetmap.org>)，通过 ArcGIS 平台上的欧氏距离转化为 30m 分辨率的栅格数据。所有数据均转化成相同的投影坐标系。

表 1 数据类型及来源

Table 1 Data Types and Sources		
数据类型	空间分辨率	数据来源
土地利用数据	30m	中科院资源环境科学与数据中心 (https://www.resdc.cn/)
数字高程模型 (DEM)	30m	地理空间数据云网站 (http://www.gscloud.cn)
坡度和坡向		
土壤深度	250m	ISRIC 国际土壤参比信息中心 (https://www.isric.org)
温度、降雨和潜在蒸散量	1000m	青海省内气象站点观测数据
人口和 GDP	1000 m	中国科学院资源与环境数据中心 (http://www.resdc.cn)
高速公路、铁路、国家公	矢量数据	开放街道地图网站
路和省级公路		(https://www.openstreetmap.org)

2 研究方法

为实现多目标协同下的土地利用数量结构优化，本研究利用优化后的 NSGA-II 算法进行规划。根据结果，利用 PLUS 模型对 2040 年都市圈土地利用进行多情景模拟，随后利用 InVEST 模型对模拟结果进行生态系统服务评价。

2.1 多目标优化算法

NSGA-II 是多目标优化算法的一种(Fu et al., 2016; Liu et al., 2024)，核心理论基于非支配排序 (non-dominated sorting) 与拥挤度计算 (crowding distance) 通过迭代优化实现帕累托前沿解集的生成，已被广泛应用于土地利用规划与生态保护研究领域。本研究在多目标

优化算法 NSGA-II 的基础上进行改进，对土地利用数据进行模拟。模型分为以下三个部分：

(1) 灰色预测模型：由于土地资源具有有限性，因此对未来情景下的土地利用需求进行预测是必要的。研究基于灰色预测 (GM 1,1) 对历史土地利用数据的趋势进行挖掘，量化 2040 年用地规模阈值。

为捕捉土地增长的累积效应，需要对历史数据 $x^{(0)}$ 进行一阶累加生成，得到序列 $x^{(1)}$ ，其含义为截至第 k^{year} 年的土地利用总量， i 表示从基准年份开始的第 i 年， $x^{(0)}(i)$ 反映土地利用面积的逐年波动， n 表示历史数据的总年份数，即：

$$x^{(1)}(k^{year}) = \sum_{i=1}^{k^{year}} x^{(0)}(i), (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

基于研究区 2010-2020 年的土地利用数据，利用最小二乘法求解表现用地扩张速度衰减趋势的参数 a 和补偿多年土地利用非线性波动的参数 b ； $x^{(0)}(1)$ 代表基准年份某一土地利用类型的面积（单位： km^2 ）； t 是时间点，用于预测不同时间点的建设用地总量预测 2040 年建设用地总量 U_t ：

$$U_t = \left(x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right) e^{-a(t-1)} + \frac{b}{a} \quad (2)$$

(2) GA-SA 混合搜索：在 NSGA-II 算法中，GA 通过交叉和变异机制负责生成土地利用规划初始解集供非支配排序算法进行计算，迭代优化土地配置方案。最初，GA 会随机生成初始土地利用方案，其中， X_i 是第 i 个土地数量配置方案， X_{ij} 是 X_i 中第 j 类土地的占比， k 是土地类型数量：

$$X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik}), \sum_{j=1}^k x_{ij} = 1 \quad (3)$$

在土地利用数量规划中，不同的土地配置决定了最终方案能否满足生态保护、经济效益、资源效率等多重目标。类似自然界中，适应自然界的个体更容易生存和繁衍。轮盘赌选择模拟了这一点，即每个个体被选中的概率和其对环境的适应程度成正比。其实现方法为：

$$P_i = \frac{f_i}{\sum_{k^{Pop}=1}^N f_{k^{Pop}}} \quad (4)$$

其中， f_i 是个体适应度， k^{Pop} 遍历累积概率数组确保适应度高的个体有更高的概率被选中， P_i 是选择概率。

交叉操作在土地配置方案中挑选两个解生成新的土地配置方案。其中，父代个体用

p 和 q 表示，子代为 A、B， X_{pj} 表示父代 p 的第 j 类土地占比， X_{qj} 亦然，交叉权重 α 保障了土地配置方案的多样性，本文选择参数范围[0.75,1]，可避免父代特征丢失。

$$\begin{cases} \text{A: } x_{Aj} = \alpha \cdot x_{pj} + (1-\alpha) \cdot x_{qj} \\ \text{B: } x_{Bj} = (1-\alpha) \cdot x_{pj} + \alpha \cdot x_{qj} \end{cases} \quad \alpha \sim U(0.75,1) \quad (5)$$

变异是指对土地利用方案中的配置进行随机改变。然而单一 GA 的变异策略易因早熟收敛而陷入局部最优，导致解集多样性不足。模拟退火算法 (SA) 最初用于解决组合优化问题中易陷入局部最优解的难题，借鉴其思想，将退火算法的机制引入土地利用规划中，通过算法前期的高搜索强度高变异率模拟规划初期的多方案探索，后期低搜索强度低变异率对应专注优化最终解集。基于此，本研究将 SA 引入 GA 的变异操作中，为土地利用规划服务：

$$S(g) = S_0 \cdot \beta^g \quad (6)$$

式中， $S(g)$ 是在第 g 代时的搜索强度，代表算法对土地配置新方案的搜索意愿， S_0 为初始搜索强度， g 是迭代次数， β 是衰减速率因子，在本文确定为 0.95。

动态变异概率

$$p_m(g) = p_{base} \cdot \left[1 + \exp\left(-\frac{1}{S(g)}\right) \right] \quad (7)$$

$p_m(g)$ 是第 g 代的实际变异概率，目的在于确定土地配置方案的调整幅度，若 $p_m(g)$ 数值大，则允许在空间内大幅度调整，反之亦然； p_{base} 为基准变异概率，本文设置为 0.1。

对变异生成的新解 x' ，其接受概率用以下规则确定：

$$P_{accept} = \begin{cases} 1 & \Delta f \leq 0 \\ \exp\left(-\frac{\Delta f}{k_B S(g)}\right) & \Delta f > 0 \end{cases} \quad (8)$$

其中， Δf 新解与当前解之间的适应度差值， $\Delta f = f(x') - f(x)$ ， $f(x')$ 是新解的适应度， $f(x)$ 为当前解的适应度。 k_B 是 Boltzmann 常数，在这里用于归一化搜索强度 $S(g)$ 。

(3) 非支配排序筛选：利用非支配排序将土地配置方案种群划分为若干非支配层级，其支配关系采用帕累托支配准则：

$$X_a \prec \begin{cases} \forall k \in [1, M]: f_k(X_a) \leq f_k(X_b) \\ \exists k \in [1, M]: f_k(X_a) < f_k(X_b) \end{cases} \quad (9)$$

其中， X_a 为土地配置方案 a， X_b 为土地配置方案 b， k 即目标函数索引。

2.2 情景构建

根据西宁—海东都市圈未来发展需求，设置了三种发展情景：自然发展情景 (Natural Development, ND)、经济发展情景 (Economic Development, ED)、考虑经济发展的生态保护情景 (Ecological Conservation, EC)。为了优化西宁—海东都市圈未来土地利用情况，使用耕地(X_1)、林地(X_2)、草地(X_3)、水域(X_4)、城乡建设用地(X_5)、未利用地(X_6)作为决策变量。利

用 GM(1,1)模型对未来数据进行预测。由于现实世界的限制，决策变量不可能无限增加，因此根据实际为决策变量进行限制是必要的，限制条件见表 2。

表 2 限制条件

Table 2 Constraints		
约束类型	约束条件	说明
总面积约束	$X_1+X_2+X_3+$	由于西宁市和海东市行政区划的限制，情景中每种土地利用的面积之和等于研究区的总面积
	$X_4+X_5+X_6=25548.62$	
耕地	$4094.77\geq X_1\geq 3787.01$	根据两市 2035 国土空间总体规划方案，结合历史数据确定
林地	$3824.95\geq X_2\geq 3687.61$	根据《青海省国土空间规划（2021—2035 年）》（以下简称《规划》），结合历史数据，利用 GM(1,1)的预测结果确定
草地	$12267.50\geq X_3\geq 11584.48$	
森林覆盖率	$0.35X_1+X_2+0.34X_3\geq 9452.99$	根据《规划》的要求，预计 2035 年研究区的森林覆盖率应在 37%以上。本文参考 Liu(Liu et al., 2002)等人改进的中国西部的绿色等效系数进行计算森林覆盖率。
水体	$156.05\geq X_4\geq 138.54$	西宁市和海东市都提出了严格的保护与利用规划，管控岸线开发利用强度以及方式，严格限制了水体的开发和利用
建设用地	$715.39\geq X_5\geq 550.30$	根据《规划》的要求，应控制在 2020 年现状的 1.3 倍以内
未利用地	$539.27\geq X_6\geq 313.58$	结合历史趋势，按照 GM(1,1)模型的结果进行设置

自然发展情景（ND）是在没有任何限制的情况下进行的发展，所有的土地利用类型在转换的过程中都被视为同等可行，目标数量是利用马尔可夫链模型根据 2010 年至 2020 年的土地利用数据进行预测得到。

除自然发展情况外，为实现青海省土地利用的可持续发展，还应从经济效益和生态效益两个维度构建多目标优化模型。

经济发展情景规划函数：经济发展情景（ED）是指在满足一系列约束条件的情况下尽可能最大化西宁—海东都市圈区域经济发展的场景。参考前人研究，在这一场景中，通过农业、林业、畜牧业和渔业的产值代表耕地、林地、草地和水域的经济效益。利用第二产业和第三产业的总产值代表城乡建设用地的经济价值。经济数据通过参考《西宁统计年鉴 2022》和《海东年鉴（2022）》确定。从年鉴中获取了 2010 年至 2020 年间西宁—海东都市圈内农业、林业、渔业、畜牧业以及第二、第三产业的年产值数据。并利用 GM(1,1)模型计算出 2040 年西宁—海东都市圈每种土地利用类型上的经济价值（表 3）。基于这些数据，构建出 2040 年每种土地利用类型的单位面积产出价值。最大化的经济效益的目标函数可以表示为：

$$F_1(x)=\max\sum_{j=1}^nc_jx_j$$

(10)

其中， C_j 代表第 j 类土地利用类型的单位面积经济价值系数； X_j 表示第 j 类土地利用类型的规划面积。

表 3 单位面积产业价值与土地利用类型对应表

Table 3 Correspondence Table of Unit Area Industrial Value and Land Use Type		
产业	土地利用类型	产值（10 ⁶ 元/km ² ）
农业	耕地	26.74
林业	林地	2.58
畜牧业	草地	8.16
渔业	水域	0.14
第二、第三产业	城乡建设用地	931.06
/	未利用地	0

生态保护情景规划函数：在考虑经济发展的生态保护情景（EC）中，需要平衡经济发展与生态保护。参考谢高地等人在 2015 年提出的土地生态系统服务价值等值因子表进行计算(谢高地等, 2015)，并结合研究区实际情况进行调整。

根据以上内容构建的生态目标函数可以表示为：

$$F_2(x) = \max \sum_{j=1}^n C_j x_j \tag{11}$$

其中， C_j 代表第 j 类土地利用类型的单位面积生态效益系数； X_j 表示第 j 类土地利用类型的规划面积。

表 4 各土地利用类型单位面积生态效益

Table 4 Comparison and Classification Table of Land Use Types by Unit Area Ecosystem Benefits						
土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	城乡建设用地	未利用地
生态效益系数 (10 ⁶ 元/km ²)	1.99	19.80	9.09	33.54	0	0.33

因此，在考虑经济发展的生态保护情景(EC)中，应该既满足经济发展，还兼顾生态保护，做到经济和生态效益的最大化。最终的函数应满足以下条件：

$$\max \{F_1(x), F_2(x)\} \tag{12}$$

2.3 未来多情景土地利用模拟

斑块生成土地利用模拟模型（Patch-generating Land Use Simulation Model, PLUS）是一种基于栅格数据的元胞自动机（Cellular Automata, CA）模型。PLUS 模型通过用地扩张分析策略（Land Expansion Analysis Strategy, LEAS）和基于多类型随机斑块种子机制的 CA 模型（CA based on Multiple Random Seeds, CARS）两大模块进行土地利用模拟。为保证模型的可靠性，利用 2010 年的土地利用数据对 2020 年进行模拟，Kappa 系数为 0.77，大于 0.7，说明模型效果好。总体准确度为 0.82，验证了模型的有效性，可用于后续研究。除土地利用数据外，模型需要转换矩阵和邻域权重两个数据表进行计算。2040 年不同发展情景的转换矩阵见表 5，其中 a~f 分别依次表示耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 种土地

利用类型；0 表示不能转化，1 表示可以转化。邻域权重见表 6。

表 5 转换矩阵

Table 5 Conversion Matrix																		
	ND						ED						EC					
	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f
a	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0
b	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0
c	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0
d	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0
e	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0
f	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

表 6 邻域权重

Table 6 Neighbor Weight						
类型	耕地	林地	草地	水体	建设用地	未利用地
ND	0.6	0.7	0.3	0.4	0.8	0.5
ED	0.7	0.6	0.3	0.1	0.9	0.2
EC	0.2	0.9	0.6	0.5	0.6	0.3

2.4 生态系统服务评估

对生态系统服务的量化可以帮助理解生态系统的价值、变化趋势以及为政府制定政策提供数据支持。选择评估指标时注重指标与生态系统服务的相关性、测量性、解释性(Ding et al., 2021)。因此，本文选择 InVEST 模型对研究区内的生境质量、碳储量和产水量进行计算。生境质量模块反映了人类活动对环境造成影响的大小，因此，研究选择耕地、建设用地和未利用地作为胁迫因子，参数设置参考(Jin et al., 2019)，建设用地因影响范围广、权重最高且采用指数衰减，反映其强胁迫性；耕地影响范围小、权重低且线性衰减，体现局部渐进式威胁；未利用地参数平衡二者。表 8 中，林地、水体对建设用地敏感性高，建设用地自身敏感性低，反映生态脆弱性差异，威胁源的参数设置见表 7，对威胁源的敏感性的参数设置见表 8。碳储量模块利用不同土地利用类型的碳库数据进行计算，具体计算方法和碳库设置，参考(陈宁等, 2023)对西北地区的碳密度修正，符合区域生态特征：林地因植被繁茂和根系发达，因此固碳能力最强；耕地土壤碳较高反映农业活动改良效应，建设用地和未利用地因其缺乏植被因此参数设置为 0，参数设置见表 9。产水量模块利用各栅格的降水量减去实际蒸散发水量，得到该栅格内部的产水量。产水量参数基于区域干旱气候与植被特性进行设置，林地根系较深，可吸收深层水分，需水量系数高，符合高原森林生态需水情况，耕地和草地根系浅，适应低降水条件；建设用地和未利用地无植被，符合硬化地表和裸地蒸散发特征，参数设置参考相关研究(李明月, 2021)，并适当修改，参数设置见表 10。

表 7 威胁源参数

Table 7 Threat Source Parameters

土地利用类型	最大距离(单位: km)	权重	衰减类型
建设用地	10	1	指数
耕地	1	0.2	线性
未利用地	3	0.6	指数

表 8 对威胁源的敏感性

Table 8 Threat Source Sensitivity

土地利用类型	生境适宜性	建设用地	耕地	未利用地
耕地	0.3	0.6	0.1	0.4
林地	1	0.8	0.5	0.3
草地	0.8	0.6	0.4	0.6
水体	0.7	0.9	0.2	0.4
建设用地	0.1	0.1	0.1	0.2
未利用地	0.05	0.2	0.3	0.1

表 9 碳库设置参数

Table 9 Carbon Pool Parameter Settings

土地利用类型	地上碳	地下碳	土壤碳	死亡有机质碳
耕地	4.19	1.91	49.56	0.02
林地	19.62	10.13	71.53	0.84
草地	2.12	3.26	34.54	0.02
水体	0.2	0	9.8	0
建设用地	0	0	24.15	0
未利用地	0	0	16.44	0

表 10 产水量生物物理表

Table 10 Biophysical Runoff Parameters

土地利用类型	根系深度	需水量系数	有无植被覆盖
耕地	400	0.65	有
林地	3000	1	有
草地	500	0.65	有
水域	1	1	无
建设用地	1	0.3	无
未利用地	1	0.5	无

3 结果分析

3.1 土地利用变化分析

3.1.1 2010-2020 年土地利用转移分析

图 2 展示了西宁—海东地区的土地利用空间分布。图 3 显示了 2010 年至 2020 年在西宁—海东地区土地利用数量和类型的变化。总体来看，研究区内草地和耕地面积占比最大，在任何时期内，这两类土地类型占研究区总面积均超过 75%。2010-2020 年间，耕地、林地和草地贡献了大部分转移面积，因此面积在 20 年内逐渐减少。建设用地、水体的面积逐步扩张，分别扩张了 58.69 km²和 2.24 km²。未利用地的变化较少。空间上，建设用地的扩张显示出地形的引导，呈现沿河谷扩展的趋势，在扩张中，建设用地主要以侵占耕地和草地达成扩张。

2010-2015 年，建设用地净增加 56.4 km²，年均增长率约 11.30 km²/a，建设用地的转入量显著高于转出量，主要来源是耕地转入 50.60 km²，占比 81.6%，以及草地转入 10.88 km²，占比 17.5%。耕地转出量达 82.34 km²，其中的 61.5% 转化为建设用地，32.1% 转为草地；草地转出量为 80.34 km²，33.5% 转为耕地，13.5% 转为建设用地。未利用地转出的 12.45 km²为草地。

2015-2020 年，建设用地净增仅 2.30 km²，年均增长率约 0.46 km²/a，城市建设速度逐渐放缓，转入量与转出量几乎持平，建设用地的增加主要源于耕地转入的 49.14 km²，占比 86.3% 和草地的 4.78 km²，占比 8.4%，建设用地主要转出为耕地 45.32 km²和草地 8.49 km²。耕地转出 107.26 km²，转入 44.72 km²，净减少 62.54 km²，耕地主要转出的土地类型为建设用地，转入的土地类型主要是草地。这一时期未利用地有 19.40 km²转为草地，相较于 2010-2015 年间有所增加。

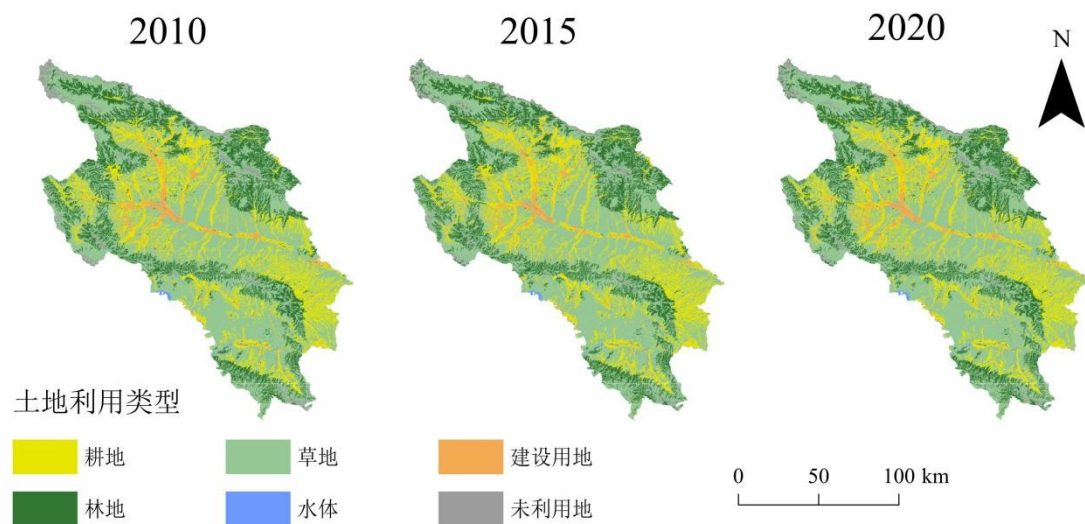


图 2 2010-2020 年土地利用空间分布

Fig. 2 Land Use Spatial Distribution from 2010 to 2020

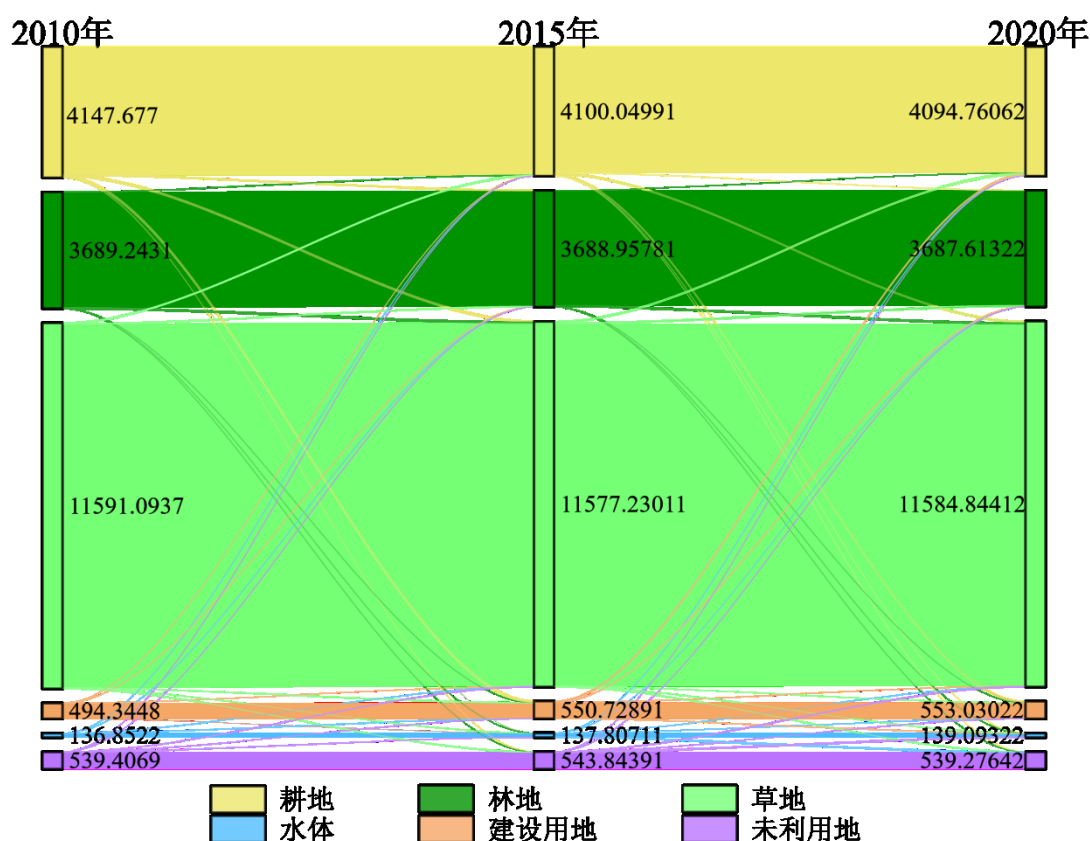


图 3 2010-2020 年土地利用数量变化

Fig. 3 Land Use Quantity Changes from 2010 to 2020

3.1.2 未来不同情景下土地利用转移分析

模拟三种情景下的土地利用格局演变情况：ND 情景，ED 情景和 EC 情景。模拟结果见图 4。图 5 为土地利用转移弦图，展示了不同情景下的土地利用数量转变情况。

在 ND 情景中(图 5a)，耕地是建设用地扩张主要的来源，耕地转出至建设用地的面积达 121.19 km²，占耕地总转出量的 90.61%，而草地转至建设用地的面积仅 6.48 km²，耕地的转入显著高于其他土地类型，耕地流失成为了区域城市化的主要代价。林地的面积为 3669.08 km²，减少 18.53 km²。草地转变为耕地的面积为 10.45 km²，转为建设用地的面积为 6.48 km²，两种情况下的转换面积达到了 17.23 km²，临近人类活动区域附近的草地有潜在退化风险。在该情景下，未利用地总面积为 538.26 km²，转入转出数量极低，表明 ND 情景并未发掘未利用地的生态潜力。

在 ED 情景中(图 5b)，建设用地扩张规模较大。林地转变为建设用地的面积为 76.05 km²，占林地总转出量的 95.7%。耕地转变为建设用地的面积为 67.77 km²，低于 ND 情景下的 121.19 km²，一定程度上可以缓解耕地流失的压力。即使在 ED 情景下，耕地也有向生态化调整的趋势，即向草地转移 6.39 km²和向林地转移 11.06 km²，在该情景中，草地与林地的面积相比 2020 年都有轻微上升。

在 EC 情景中(图 5c)，建设用地扩张的生态代价显著降低。耕地向建设用地转移面积为

96.21 km²，低于 ND 情景。林地向建设用地转移面积仅 10.93 km²，显著低于 ED 情景。在 EC 情景下，建设用地的扩张受到了生态保护措施的严格限制，体现了该情景对林地的刚性保护，该情景降低了森林生态系统被建设用地侵占的风险。耕地呈现明显的生态化转移特征。耕地向草地转移面积 90.18 km²，向林地的转移面积 19.36 km²，这两种转移模式合计占耕地总转出面积的 53.20%。未利用地在生态保护导向下发挥显著生态价值。未利用地向林地转移面积为 61.13 km²，向草地转移 24.98 km²，表明未利用地在生态保护导向下发挥显著生态价值。

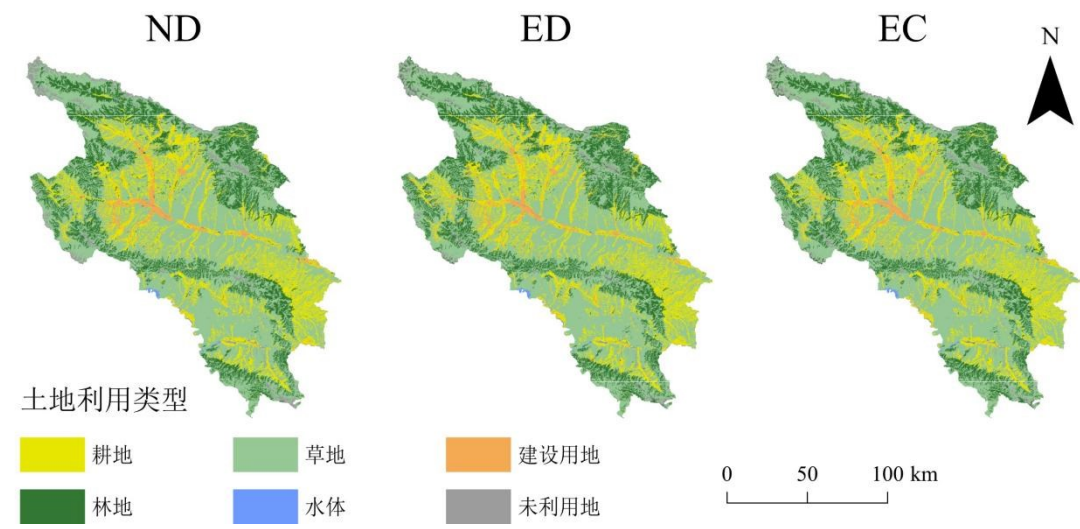


图 4 2040 年不同情景下土地利用的空间分布变化

Fig. 4 Land Use Spatial Distribution Changes Under Different Scenarios in the Year 2040

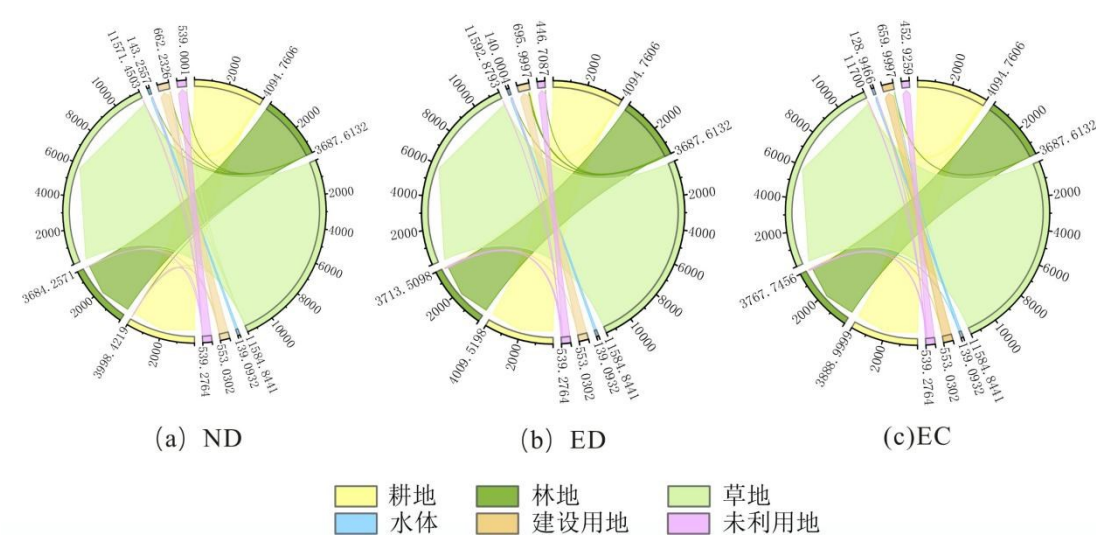


图 5 不同情景下的土地利用转移弦图

Fig. 5 Chord Diagram of Land Use Shifts Under Different Scenarios

3.2 生态系统服务分析

3.2.1 2010-2020 年生态系统服务分析

研究评估了西宁—海东都市圈 2010、2015 和 2020 年的生境质量、碳储量和产水量。表 11 显示了研究区在这三个时间点的生境质量、碳储量和产水量均值呈现出一定变化趋势。研究区的生境质量在 2010 年至 2015 年间呈现轻微下降趋势，从 0.616 降至 0.615，碳储量减少 179,055.49 吨，平均产水量增加 0.28 毫米。总体上变化幅度微小，如图 6，2010-2015 年的生境质量下降与产水量的轻微上升可能与同期建设用地净增加 56.4 km²有关。特别是西宁市主城区的生境质量有明显下降，区域生态系统稳定性可能受到潜在干扰。碳储量减少主要是研究区南部的雄先乡和循化撒拉族自治县林地的缩减。2015-2020 年，生境质量稳定在 0.615，碳储存虽有下降，但是减少速率较前一阶段下降约 92.49%，研究区平均产水量的变化展示了区域水文调节功能趋于稳定。三个指标均反映了研究区土地利用模式进入相对平衡阶段，尤其是会造成生境质量大幅度下降的建设用地扩张速度明显减少。未利用地也有一定面积转为草地，表明生态修复初见成效，区域生态系统或因土地利用的变化幅度和缓的原因呈现出稳定发展的态势。

表 11 2010-2020 年生态系统服务差异

Table 11 Differences in Ecosystem Services from 2010 to 2020

	生境质量	碳储存 (t)	产水量(mm)
2010	0.616	109,281,124.47	165.71
2015	0.615	109,102,068.98	165.99
2020	0.615	109,088,632.19	165.94

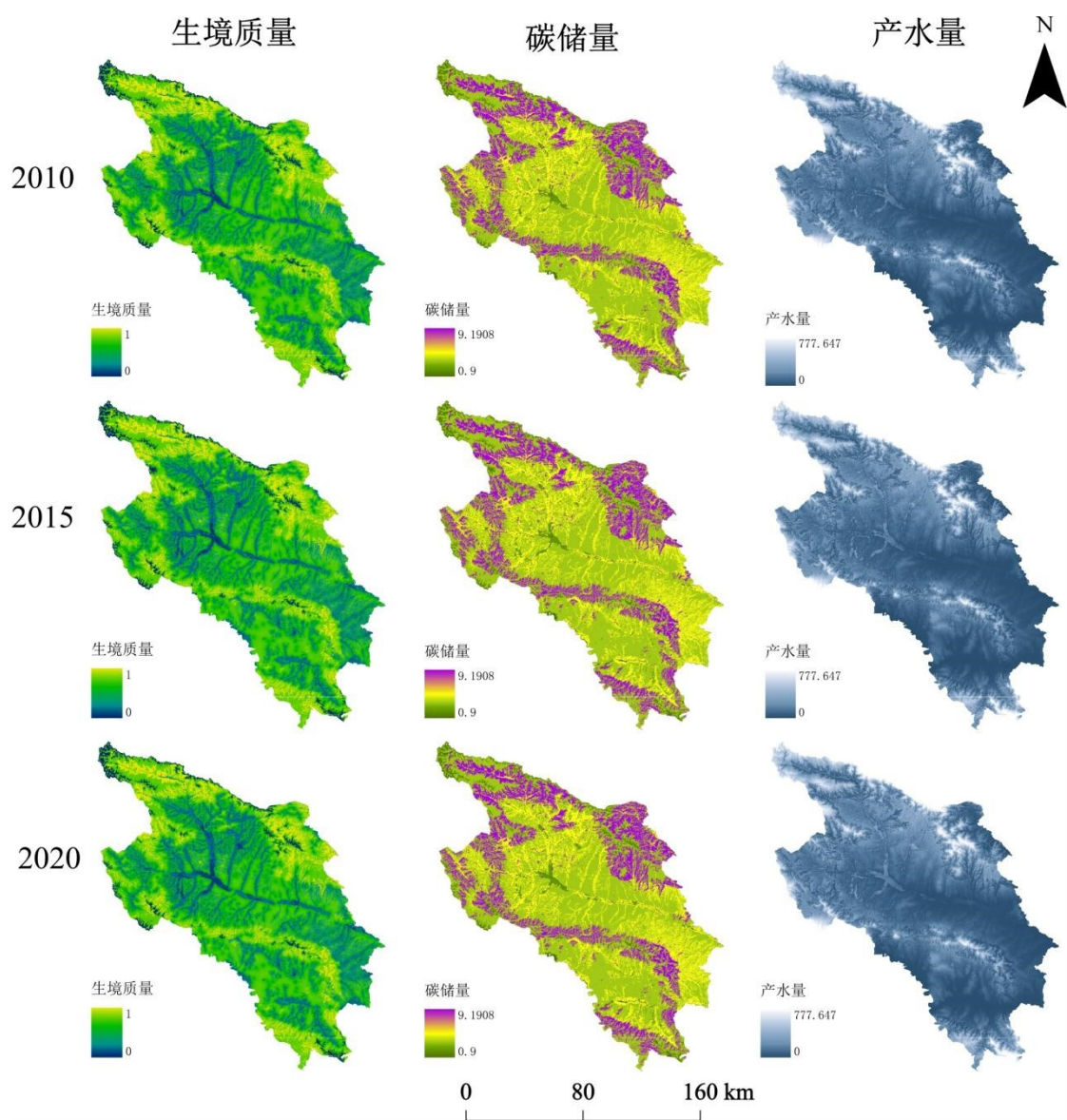


图 6 2010-2020 年生态系统服务空间分布

Fig. 6 Spatial Distribution of Ecosystem Services from 2010 to 2020

3.2.2 模拟情景下的生态系统服务分析

表 12 展示了模拟情景下的生态系统服务价值以及各个指标相对于 2020 年的变幅。图 7 展示了各指标在不同情境下的空间分布。在 ND 发展情景下，相较于 2020 年，2040 年 ND 情景的生境质量下降 8.8%，碳储量减少 35.67 万吨，产水量微增 0.37mm，在 ND 情境下，由于建设用地和耕地的自然扩张，生境质量下降速度加快，变幅达到-8.8%。碳储量的净损失从 2015 年至 2020 年的每年平均减少 2687.36 吨增至 17,837.46 吨，草地被建设用地侵占、耕地扩张以及林地缩减成为 ND 情景下碳储量变化的主要因素。同样，由于建设用地扩张导致不透水地表面积增加，伴随 ND 情景下草地和林地植被覆盖率下降，进而增加了产水量。

在 ED 情景下，生境质量均值从 2020 年的 0.615 骤降至 0.468，下降幅度达-23.9%，对比 2020 年和 ND 情景，西宁和海东的城区显示出生境质量恶化的趋势，周边区域则呈现出明显的生境破碎化特征。尤其是西宁市主城区恶化的生境质量形成了更多的生态孤岛。碳储量相比于 2020 年小幅上升 0.01%，是草地、林地净增加的 8.04 km²和 25.89 km²所致，结合生境质量的结果来看，碳储量呈现“补偿性增长但生态价值降低”的特征，也即碳储存的小幅增长不能缓解生态系统的退化，也不能真正提升生态系统的整体价值，反映出高强度开发对自然碳汇功能的挤压以及研究区生态健康的整体恶化。产水量相比于 2020 年下降了 2.32%，原因是正常情况下建设用地的扩大会导致地表径流系数上升，而在草地和林地面积净增长以及未利用地面积缩减的情况下，最终产水量减少，但由于建设用地面积扩大了 28.95%，且大部分建设用地位于河谷，因此可能增加城市洪涝风险。

在 EC 情景下，为了平衡经济发展和生态保护的目标，生境质量有小幅下降，但下降幅度较小，在 20 年间仅下降了 2.6%，远小于 ND 情景的-8.8%和 ED 情景的-23.9%，表明生态保护政策能够有效缓解生境恶化。林地通过耕地和未利用地实现了扩张，EC 情景下建设用地的增速 5.35 km²/year 仍小于 2010 至 2020 年的建设用地扩张速度 5.87 km²/year，且扩张面积大多来源于耕地，减少对生境直接的依赖。碳储量从 2020 年的 109,088,632.19 吨增至 109,327,425.75 吨，增加 0.22%，实现了碳储量的净增长，主要是由于草地面积稳定，因此能够维持基础的碳汇功能，未利用地和耕地转至林地抵消了部分建设用地扩张造成的碳损失。产水量从 165.94mm 降至 160.76mm，是由于 EC 情景的林地面积增加且林地蒸散能力强于耕地和建设用地，因此在 EC 情景下，生态用地对产水的调节作用占主导，区域水文风险有所降低。

表 12 模拟情景下的生态系统服务及其变幅

Table 12 Ecosystem Services and Their Variations under Scenario Simulation						
	生境质量	变幅	碳储存 (t)	变幅	产水量(mm)	变幅
ND	0.561	-8.8%	108,731,883.00	-0.33%	166.31	+0.22%
ED	0.468	-23.9%	109,104,557.29	+0.01%	162.10	-2.32%
EC	0.599	-2.6%	109,327,425.75	+0.22%	160.76	-3.12%

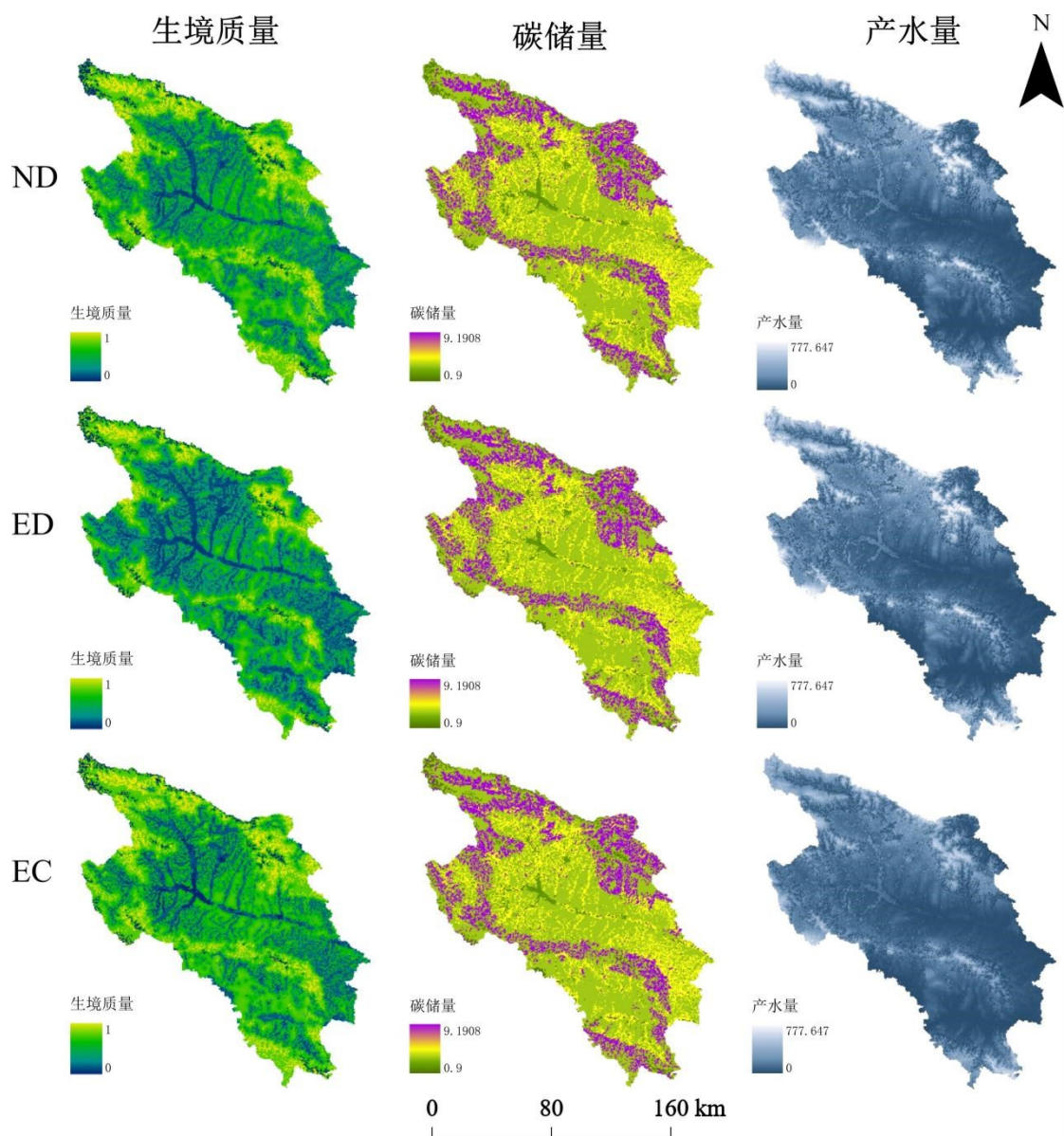


图 7 未来不同情境下的生态系统服务空间分布

Fig.7 Future Ecosystem Services Spatial Distribution under Different Scenarios

4 讨论

4.1 未来土地利用与生态系统服务

为维持区域的可持续发展,有必要科学规划土地利用并评估未来情景下的生态系统服务变化。因此,本研究聚焦高原型都市圈未来发展问题,探讨西宁海东都市圈在自然发展、经济优先及生态保护优先三种情景下的土地利用需求,系统评估其对生态系统服务的影响,为高原型都市圈可持续发展提供科学依据。研究发现,在 2040 年不同发展情景下,西宁海东都市圈的土地利用变化对生态系统服务产生显著影响。

生态系统服务评估的结果显示,研究区内部生态系统服务差异显著,其原因主要是自然地形与人类活动等自然社会条件的分异导致。研究区内,南北山脉植被覆盖率高、人类活动

干扰少,有稳定的森林、草原生态系统,其生境质量、碳储量显著高于河谷低洼地区。这一现象与景观生态学中的“阻力模型”(Graves et al., 2014)关于地形阻力对景观格局的影响一致,即地形通过限制人类活动空间,将开发活动约束在河谷区域,从而间接保护了南北山脉的生态完整性(郭煜琛等, 2019)。然而, ND 和 ED 情景下,建设用地在湟水谷地的无序扩张(ND 情景)或过度扩张(ED 情景)导致生境破碎化加剧,林地和草地被建设用地的扩张而切割,即原本连续的自然景观被分割成许多小块,符合 Forman 提出的“边缘效应”和“岛屿效应”(Halliday, 2018)。

ND 情景下,耕地和建设用地扩张直接挤占林地和草地,导致碳储量下降和生境质量下降。这一结果与 Li(Li et al., 2024)在华北平原的研究一致。由于西宁海东都市圈处于内陆,降水量较沿海东部地区少,同时东部湿润气候促进了植被生长,因此每平方米单位面积碳储量小于华北平原,这与李克让对中国植被和土壤碳贮量(李克让等, 2003)的研究一致。在此情景下,尽管产水量略有增加,但建设用地的无序扩张导致南北山脉生态核心区的植被退化,长期可能加剧区域水土流失风险,且未考虑生态系统服务的整体价值。苗百岭等人(苗百岭等, 2008)通过对内蒙古典型草原的研究发现植被退化显著增加了地表径流系数和径流量,尤其是在重度退化区域,年总径流量远高于未退化区域,形成“植被退化—径流增加—水分亏缺—生态恶化”的负反馈,因此,针对都市圈未来的发展模式,应当通过严格限制过度放牧、实施退耕还草和生态修复工程,结合空间管制措施减少不透水地表扩张,以打破恶性循环,恢复生态系统服务功能。

ED 情景下,碳储量相比于 ND 有增加,这在 Li(Li et al., 2024)的研究与 Wang(Wang et al., 2022)的研究中都有解释,土地利用类型的改变对碳储量的影响表现为生态用地>耕地>建设用地。ED 情景的这种现象一方面是由于土地利用类型转换的空间选择性差异,即建设用地在扩张中占用碳密度较低的耕地的比重较大,在一定程度上减少了高碳储存土地的损失,同时,林地和草地通过向未利用地扩展弥补了碳储量的损失。尽管该情景下林地和草地通过向未利用地扩展在模型中表现为碳储量增加,但可能掩盖了高原地区冻土退化对碳固存的长期威胁。城市或建成区的温度通常高于周围的植被和水体,称为热岛效应, Mahmoodi 等人(Mahmoodi et al., 2019)通过对阿富汗喀布尔市地表温度和景观异质性的研究发现快速城市化区域的热岛效应显著,城市扩张边界与山脉接壤时,热岛范围会向山麓延伸,导致山麓区域温度上升,加快积雪消融的同时影响植物的生长和代谢过程,进而降低碳储量。Chen 等(Chen et al., 2021)在中亚五国首都的模拟研究中发现,城市扩张导致的温度升高会干扰植被覆盖度,特别是在农业用地和荒漠化区域阿什哈巴德,碳储存能力显著下降。ED 情景的产水量下降是由于追求经济而导致建设用地的扩张,在这种扩张下,生态韧性降低,生态系统难以应对极端降水事件,最终可能加剧洪涝灾害,宋鹏越等(宋鹏越等, 2023)人对济南市黄台桥的研究表明,随着建设用地的增加,城市中的洪峰流量会显著增大,城市防洪压力显著提高。ED 情景的生境质量恶化表明,单一追求经济增长会削弱生态韧性,这与夏楚瑜等人(夏楚瑜等, 2022)对杭州市的研究,以及王辰星等人(王辰星等, 2025)对北京市的研究类似,追求经济增长导致城市面积无序扩张都将导致生态系统结构趋于不稳定。

EC 情景下,虽然依旧保证经济的发展,但该情景下通过空间管制限制了建设用地规模,同时通过耕地向生态用地的转换显著提升了碳储量和生境质量。严格的空间管制措施限制了

城市扩张对敏感生态区域的侵占,保护了南北山脉的高生境质量区域,该情景下,河谷地区的植被覆盖度提高,减缓了河谷区域的生境质量下降的幅度。能够兼顾经济发展和保证“生态红线”政策的实施。在这一政策下,京津冀、长江经济带等地区的生态保护红线划定和实施工作已经取得了初步成效,有效控制了不合理开发建设活动,促进了生态系统的自我修复(江波等,2019),西宁海东都市圈的 EC 情景正是通过类似的策略,通过严格的空间管制措施限制了城市扩张对敏感生态区域的侵占,从而保护了关键的生态系统服务。虽然产水量减少可能影响农业灌溉等经济活动,但 EC 情景通过降低洪涝风险和维护生态韧性,为区域可持续发展提供了更稳定的水文基础(宋鹏越等,2023)。在西宁海东都市圈的 EC 情景中,耕地转为林地或草地,在增加植被覆盖度的同时,显著提高了碳储存能力。Zheng(Zheng et al., 2016)、衣鹏慧(衣鹏慧等, 2023)等学者的研究均表明,森林和草地等自然植被相较于农田能够更有效地固定自然环境中的碳。此外,通过生态修复措施如退耕还林还草,可以改善土壤结构,增加土壤有机质含量,从而进一步增强生态系统的碳汇功能。

4.2 多目标优化结合 PLUS 模型的重要性

传统粗放型城市空间扩展模式已难以适应生态系统可持续发展需求,在此背景下,学界对土地利用规划的关注度逐渐提高。传统土地利用规划方法存在两大局限:一,单目标优化或专家经验无法动态平衡生态、经济等多维度目标(张波等,2023);二,PLUS 模型虽能模拟空间自组织过程,但缺乏对多目标权衡的量化支持。因此,将多目标优化方法同 PLUS 模型结合起来是必要的。多目标框架允许政策制定者根据区域发展需求动态调整目标优先级,并生成多情景下的土地利用数量解集。两种方法的耦合既弥补了传统方法在目标动态权衡与空间可行性之间的脱节,又通过 PLUS 模型空间组织能力,更精准地模拟了土地利用的演变规律。Zhu 和 Huang(Zhu and Huang, 2022)利用该框架在武汉都市圈进行研究得到该方法在减少生态价值损失的同时实现经济增长,验证了其综合效益的提升潜力。而其他的研究(Fu et al., 2024;张波等,2023)也从区域尺度的适用性、生态-经济目标平衡、多情景综合效益优化等角度证明了 GMOP 模型耦合 PLUS 模型的有效性。因此,相较于传统单一模型,耦合了多目标优化的土地利用模拟模型可通过确定约束条件来提高土地利用的整体效率。本文利用多目标优化结合 PLUS 模型对西宁海东都市圈进行的初步应用,证明了双模型结合的实用性。决策者在城市规划中可以通过预先规划目标情景,利用模型对未来发展路径进行模拟,直观展示生态用地和经济用地之间的分布与冲突。这既是方法论上的突破,也是对当前土地利用规划中“数量-空间”割裂问题的系统性回应。

4.3 政策建议

西宁-海东都市圈作为典型的高原型都市圈,其发展路径与东部平原型都市圈存在一定差异。受限于所处的河谷地形,都市圈的空间布局呈现条带状发展模式,与东部平原地区面状发展的城市形态形成鲜明对比。高原生态系统的脆弱性和水源涵养功能导致都市圈的发展直接关系到黄河流域的水资源安全。该地也是“一带一路”的战略节点,兼具地缘政治与经济合作价值。高原的特殊环境对都市圈基础设施建设和产业布局提出了更高要求。西宁-海东都市圈具有的“高原—生态—战略”三位一体的特征,使其成为高原型都市圈协同发展研究的独特样本。

都市圈发展应以集约化、绿色化为主要目标。针对西宁城区受南北山地地形限制的河谷型空间格局,未来的城市建设须严格遵循沿河谷扩展原则,禁止占用湟水河沿岸基本农田与生态红线。可以在平安-乐都沿线布局分布式产业园区与生态社区,结合两地的特色产业和交通优势,推动“西宁研发—海东制造”分工。在低碳经济导向下,依托近年来青海省清洁能源的优势,在河湟新区试点零碳产业园,将光伏发电与氢能储能技术融入城市能源系统。

都市圈未来要聚焦“山水林田湖草”系统治理以保护生态。西宁-海东都市圈应重点实施湟水流域生态修复,在互助北山、大通河谷等关键节点建设生态廊道,通过人工种植林草提升水源涵养能力。针对小峡口等人类活动密集区,需建立“开发强度-生态弹性”动态监测机制,参照三江源国家公园社区共管模式,限制采矿与无序旅游对冰川遗迹的破坏。

土地管理应注重分类施策。对互助南峡河谷区域,可通过耐寒灌木种植与土壤改良提升生态价值。乐都、雨润的工矿废弃地可以学习大同市对于工矿废弃地进行的土地复垦与生态修复经验,实现土地多功能再生。未来应严格审批所有开发行为,开发均需要进行生态承载力评估,避免发生“先污染后治理”现象。

4.4 研究不足

研究利用改进的 NSGA-II 算法对西宁-海东都市圈的未来土地利用数量进行规划。但本研究只考虑了经济和生态两个目标,并未考虑如社会公平、文化遗产、交通效率等因素。未来,可以引入更多目标情景对都市圈进行限制,同时对算法持续改进,探索都市圈在不同发展导向下的帕累托最优解,为制定差异化发展策略提供科学依据。

由于 PLUS 模型在揭示土地类型空间竞争关系方面展现出较强的科学价值,因此本研究利用该模型进行研究区土地利用的空间分析。但同时模型也展现出了一定不足: PLUS 模块依赖邻域权重、转换成本矩阵等预设参数,难以量化政策调控强度与市场行为;受数据可获得性制约,研究忽略了政策的影响。未来,研究将结合遥感和社会经济数据,丰富驱动因子,重点分析退耕还林还草或开发区规划等政策对耕地和建设用地的定向调控作用,提升模拟结果的实践指导价值,助力国土空间优化决策。

生态系统服务方面,由于数据限制,研究仅选取了三种生态系统服务代表研究区整体的生态系统服务状况。同时, InVEST 模型对微观地区模拟效果还有待提升,尤其是模型中的参数设定,大部分参考西部地区的相关文献,一定程度上缺少实地调查的精准性。因此,后续研究将通过多源遥感数据,结合区域社会经济特征开展本地化参数校准,并引入土地利用变化情景模拟,系统评估不同政策干预下生态系统服务功能的空间响应机制。

5 结论

高原型都市圈在快速发展过程中面临土地资源短缺和生态系统服务退化等挑战。西宁—海东都市圈以其狭长的河谷地形和敏感的高原生态环境加剧了“空间稀缺性”与“三生空间竞争性”的矛盾。本研究以西宁—海东都市圈为例,通过把多目标优化模型与 FLUS 模型结合,分析了都市圈的历史以及未来生态系统服务价值,找到适合都市圈未来发展的模式。

(1) 西宁—海东都市圈的土地利用需求在三种情景下呈现显著差异。总体上以城区扩张为主,在不同情景下有明显差异。ND 情景下,都市圈内部草地、林地和一部分水体受到

建设用地与耕地的挤压,未利用地面积没有太大变化。ED 情景下,建设用地扩张最为显著,主要侵占了耕地,草地面积维持稳定范围,林地向未利用地扩张了少部分面积。EC 情景平衡了经济发展与生态保护,其建设用地面积最少,城市向着立体化、集约化发展,耕地规模得到了有效控制,这就减少了林地、草地、水提等生态用地面积的波动,EC 情景创造了比 ND 和 ED 更稳定的生态环境。

(2) 西宁—海东都市圈的土地利用变化对生态系统服务产生了显著影响,未来不同发展情景下的结果差异显著。在高强度开发主导的 ND 和 ED 情景下,生境质量恶化、碳储量减少、产水风险加大,反映出区域可持续发展面临严峻挑战。EC 情景下,生态保护政策能够有效调节土地利用规模与生态系统服务之间的关系,为都市圈未来发展提供了可选方案。

Reference

- Chen, G., Peng, Q., Fan, Q., Lin, W., Su, K., 2024. Spatial-Temporal Variation and Driving Forces of Carbon Storage at the County Scale in China Based on a Gray Multi-Objective Optimization-Patch-Level Land Use Simulation-Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs-Optimal Parameter-Based Geographical Detector Model: Taking the Daiyun Mountain's Rim as an Example. *Land* 14, 14.
- Chen, N., Xin, C.L., Tang, D.B., Zhang, L., Xin, S.J., 2023. Multi-scenario land use optimization and carbon storage assessment in Northwest China. *Environmental Science* 44, 4655–4665. (in Chinese with English abstract)
- Chen, Yang, Yue, W., Liu, X., Zhang, L., Chen, Ye'an, 2021. Multi-Scenario Simulation for the Consequence of Urban Expansion on Carbon Storage: A Comparative Study in Central Asian Republics. *Land* 10, 608.
- Ding, T., Chen, Junfei, Fang, Z., Chen, Junyu, 2021. Assessment of coordinative relationship between comprehensive ecosystem service and urbanization: A case study of Yangtze River Delta urban Agglomerations, China. *Ecological Indicators* 133, 108454.
- Fu, H., Liang, Y., Chen, J., Zhu, L., Fu, G., 2024. A New Framework of Land Use Simulation for Land Use Benefit Optimization Based on GMOP-PLUS Model—A Case Study of Haikou. *Land* 13, 1257.
- Fu, X., Mei, Y., Xiao, Z., 2016. Assessing flood risk using reservoir flood control rules. *J. Earth Sci.* 27, 68–73.
- Graves, T., Chandler, R.B., Royle, J.A., Beier, P., Kendall, K.C., 2014. *Estimating landscape resistance to dispersal. Landscape Ecol* 29, 1201–1211.
- Guo, Y.C., Tian, G.H., Zhao, R., Shen, X.J., Dong, B.B., He, R.Z., 2019. Research on the changes of spatial form of major cities in China from 2000 to 2013. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)* 41, 139–148. (in Chinese with English abstract)
- Halliday, K., 2018. The island effect: a sociospatial theory of health. *IJPDS* 3.
- Han, Z., Li, R., Zhang, L., Zhou, J., Wang, S., 2024. Multi-field Coupling Simulation of Impact of Temperature and Density of Heat Injection Well on Carbon Budget during Hydrate Exploitation in Qilian Mountain Permafrost Region. *J. Earth Sci.* 35, 1934–1943.
- Hu, S., Chen, L., Li, L., Zhang, T., Yuan, L., Cheng, L., Wang, J., Wen, M., 2020. Simulation of Land Use Change and Ecosystem Service Value Dynamics under Ecological Constraints in Anhui Province, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17, 4228.
- Hugonnet, R., McNabb, R., Berthier, E., Menounos, B., Nuth, C., Girod, L., Farinotti, D., Huss, M., Dussaillant, I., Brun, F., Kääb, A., 2021. Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. *Nature* 592, 726–731.
- Jiang, B., Wang, X.Y., Yang, M.F., Cai, J.Z., 2019. Application of ecosystem service research in the evaluation of the effectiveness of ecological red line policy protection. *Acta Ecologica Sinica* 39, 3365–3371. (in

Chinese with English abstract)

- Jin, G., Chen, K., Wang, P., Guo, B., Dong, Y., Yang, J., 2019. Trade-offs in land-use competition and sustainable land development in the North China Plain. *Technological Forecasting and Social Change* 141, 36–46.
- Li, K.R., Wang, S.Q., Cao, M.K., 2003. Vegetation and soil carbon storage in China. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 72–80. (in Chinese with English abstract)
- Li, M.Y., 2021. Evaluation of water conservation and soil conservation functions in the Danjiang River Basin of Qinling Mountains (Master's thesis). *Northwest University*. (in Chinese with English abstract)
- Li, T., Jia, B., Zhang, Q., Liu, W., Fang, Y., 2024. Scenario Simulation of Urban Land Use and Ecosystem Service Coupling Major Function-Oriented Zoning. *Ecosyst Health Sustain* 10, 0078.
- Liu, Y., Chen, C., Liang, Q., Hu, Z., 2024. Crust and Upper Mantle Density Structures beneath the Eastern Tianshan Region and Its Tectonic Implications. *J. Earth Sci.* 35, 828–838.
- Liu, Y., Zhang, Y., 2024. Responses of Ecosystem Services to Land Use/Cover Changes in Rapidly Urbanizing Areas: A Case Study of the Shandong Peninsula Urban Agglomeration. *Sustainability* 16, 6100.
- Liu Yanfang, Dongping, M., Jianyu, Y., 2002. Optimization of land use structure based on ecological GREEN equivalent. *Geo-spatial Information Science* 5, 8.
- Mahmoodi, S., Dutta, K., Basu, D., Agrawal, S., 2019. UNDERSTANDING LINK BETWEEN LAND SURFACE TEMPERATURE AND LANDSCAPE HETEROGENEITY: A SPATIO-TEMPORAL AND INTER-SEASONAL VARIABILITY STUDY ON KABUL CITY, AFGHANISTAN. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* IV-5/W2, 57–65.
- Miao, B.L., Liang, C.Z., Wang, W., Wang, L.X., Yun, W.L., 2008. Effects of vegetation degradation on surface runoff in typical steppe. *Journal of Soil and Water Conservation*, 10–14. (in Chinese with English abstract)
- Mountain Research Initiative EDW Working Group, 2015. Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. *Nature Clim Change* 5, 424–430.
- Niu, W., Feng, Z., Cheng, C., 2018. Min-Max Linear Programming Model for Multireservoir System Operation with Power Deficit Aspect. *Journal of Water Resources Planning and Management* 144, 06018006.
- Sun, S., Ren, Y.F., Zhang, Q., 2019. Estimation and spatial pattern of water shortage in the Qinghai-Tibet Plateau from a multi-scale perspective. *Journal of Geo-information Science* 21, 1308–1317. (in Chinese with English abstract)
- Song, P.Y., Xu, Z.X., Li, P., Chen, H., Song, S.L., 2023. Impact of land use change on runoff and sediment yield in a watershed: A case study of the Huangtaiqiao watershed above Jinan City. *Water Resources and Hydropower Engineering* 54, 143–154. (in Chinese with English abstract)
- Wang, C.X., Wang, Z.T., Yang, M., Zhao, X.H., Pan, Y.C., Feng, Q.Y., Zheng, L.F., Wang, X.Y., Yan, Y., 2025. Identification of ecological restoration space in megacities based on ecological network construction and ecosystem resilience: A case study of Beijing. *Acta Ecologica Sinica*, 1–12. (in Chinese with English abstract)
- Wang Meimei, Jiang Zizhen, Li Tengbiao, Yongchun, Y., Zhuo, J., 2023. Analysis on absolute conflict and relative conflict of land use in Xining metropolitan area under different scenarios in 2030 by PLUS and PFCI. *Cities* 137, 104314.
- Wang, Z., Li, X., Mao, Y., Li, L., Wang, X., Lin, Q., 2022. Dynamic simulation of land use change and assessment of carbon storage based on climate change scenarios at the city level: A case study of Bortala, China. *Ecological Indicators* 134, 108499.
- Wang, Z., Zhong, A., Wei, E., Hu, C., 2024. Carbon Storage Simulation and Land Use Optimization for High-Water-Table Resource-Based Cities Based on the Coupled GMOP-PLUS-InVEST Model. *Remote*

- Sensing* 16, 4480.
- Wei, J., Tian, M., Wang, X., 2023. Spatiotemporal Variation in Land Use and Ecosystem Services during the Urbanization of Xining City. *Land* 12, 1118.
- Xia, Y.C., Dong, Z.Y.Z., Chen, B., 2022. Spatiotemporal changes and scenario simulation of urban ecological resilience: A case study of Hangzhou City. *Acta Ecologica Sinica* 42, 116–126. (in Chinese with English abstract)
- Xie, G.D., Zhang, C.X., Zhang, L.M., Chen, W.H., Li, S.M., 2015. Improvement of ecosystem service valuation method based on equivalent factor of value per unit area. *Journal of Natural Resources* 30, 1243–1254. (in Chinese with English abstract)
- Wood, D.A., Hazra, B., 2017. Characterization of organic-rich shales for petroleum exploration & exploitation: A review-Part 3: Applied geomechanics, petrophysics and reservoir modeling. *J. Earth Sci.* 28, 779–803.
- Xin, S., Li, Z., Chen, N., Zhang, Z., Zhang, X., Chen, H., Ma, X., Kang, L., 2024. The contribution of multi-objective land use optimization to reducing ecological risk: A case study of the Lanzhou-Xining urban agglomeration. *Ecological Indicators* 168, 112604.
- Yang, H., Gou, X., Xue, B., Ma, W., Kuang, W., Tu, Z., Gao, L., Yin, D., Zhang, J., 2023. Research on the change of alpine ecosystem service value and its sustainable development path. *Ecological Indicators* 146, 109893.
- Yi, P.H., Wu, H.F., Hu, B.A., Wen, X., Han, H.R., Cheng, X.Q., 2023. Characteristics and influencing factors of changes in soil organic carbon storage after returning farmland to forest in the Loess Plateau region. *Acta Ecologica Sinica* 43, 10054–10064. (in Chinese with English abstract)
- Zhang, B., Pan, P.P., Wang, X.Y., Wen, J.Y., Ren, J.X., Liu, M.M., 2023. Multi-scenario simulation and functional relationship analysis of land use change in Beijing-Tianjin-Hebei region based on GMOP-PLUS coupling model. *Geography and Geo-Information Science* 39, 8–16. (in Chinese with English abstract)
- Zheng, H., Li, Y., Robinson, B.E., Liu, G., Ma, D., Wang, F., Lu, F., Ouyang, Z., Daily, G.C., 2016. Using ecosystem service trade-offs to inform water conservation policies and management practices. *Frontiers in Ecol & Environ* 14, 527–532.
- Zhu, L., Huang, Y., 2022. Multi-Scenario Simulation of Ecosystem Service Value in Wuhan Metropolitan Area Based on PLUS-GMOP Model. *Sustainability* 14, 13604.

附中文参考文献

- 夏楚瑜, 董照樱子, 陈彬, 2022. 城市生态韧性时空变化及情景模拟研究——以杭州市为例. *生态学报* 42, 116–126.
- 孙思奥, 任宇飞, 张蔷, 2019. 多尺度视角下的青藏高原水资源短缺估算及空间格局. *地球信息科学学报* 21, 1308–1317.
- 宋鹏越, 徐宗学, 李鹏, 陈浩, 宋苏林, 2023. 土地利用变化对流域产汇流的影响: 以济南市黄台桥以上流域为例. *水利水电技术 (中英文)* 54, 143–154.
- 张波, 潘佩佩, 王新云, 温佳昱, 任佳璇, 刘苗苗, 2023. 基于 GMOP-PLUS 耦合模型的京津冀土地利用变化多情景模拟及功能关系分析. *地理与地理信息科学* 39, 8–16.
- 李克让, 王绍强, 曹明奎, 2003. 中国植被和土壤碳贮量. *中国科学(D 辑:地球科学)* 72–80.
- 李明月, 2021. 秦岭丹江流域水源涵养与土壤保持功能评价 (硕士学位论文). 西北大学.
- 江波, 王晓媛, 杨梦斐, 蔡金洲, 2019. 生态系统服务研究在生态红线政策保护成效评估中的应用. *生态学报* 39, 3365–3371.
- 王辰星, 王泽童, 杨淼, 赵兴华, 潘垚辰, 冯启源, 郑力夫, 王欣妍, 严岩, 2025. 基于生态网络构建与生态

系统韧性的超大城市生态修复空间识别——以北京市为例. 生态学报 1-12.

苗百岭, 梁存柱, 王伟, 王立新, 云文丽, 2008. 植被退化对典型草原地表径流的影响. 水土保持学报 10-14.

衣鹏慧, 吴会峰, 胡保安, 温馨, 韩海荣, 程小琴, 2023. 黄土高原地区退耕还林后土壤有机碳储量变化特征及影响因素. 生态学报 43, 10054-10064.

谢高地, 张彩霞, 张雷明, 陈文辉, 李士美, 2015. 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 30, 1243-1254.

郭煜琛, 田国行, 赵芮, 申鑫杰, 董宝宝, 何瑞珍, 2019. 2000-2013 年中国主要城市空间形态变化研究. 西南大学学报(自然科学版) 41, 139-148.

陈宁, 辛存林, 唐道斌, 张亮, 辛顺杰, 2023. 中国西北地区多情景土地利用优化与碳储量评估. 环境科学 44, 4655-4665.