生态系统健康评估及预测

多情景模拟下自然保护区景观生态风险预测及优化*

徐 嵩 季鹏云 张 戈

天津城建大学建筑学院 天津 300384

摘要:【目的】探讨多情景模拟下自然保护区景观生态风险与土地利用类型的动态变化,为降低自然保护区景观生态风险提供科学依据。【方法】以天津市古海岸与湿地国家级自然保护区为研究对象,基于 PLUS 模型预测 2040 年自然发展情景下的土地利用,并结合 MOP 模型模拟预测 2040 年的优化情景,利用景观生态风险指数(ERI)解析两种情景下的景观生态风险演变规律。【结果】1)研究区景观生态风险呈现“中间高,四周低”的空间分布,中风险和较高、高风险地区主要集中在保护区的核心区与缓冲区;2)自然发展情景与 2020 年相比,中、高风险区面积分别减少了 0.70%和 5.67%,低、较低和较高风险区面积分别增加了 1.15%、1.39%和 3.83%,较高、高风险区面积减少主要集中在缓冲区与核心区;3)MOP 优化情景与自然发展情景相比,低和较低风险区面积分别增加了 0.69%和 13.12%,中、较高和高风险区面积分别减少了 5.48%、7.53%和 0.80%,较高、高风险区减少的面积集中在缓冲区与核心区,表明 MOP 优化情景下景观生态风险状况有所提升。【结论】相较于自然发展情景,MOP 优化情景充分考虑并最大化了区域生态效益,有助于优化土地利用结构,符合自然保护区的未来发展需求。未来应进一步拓宽情景设置适用范围,综合考虑更多土地利用变化的驱动因素,为自然保护区等生态敏感区域的绿色发展提供更科学的理论支撑。

关键词:景观生态风险;土地利用;多情景模拟;自然保护区

DOI:10.12169/zgcsly.2024.12.27.0003

Ecological Risk Prediction of Nature Reserve Landscape Under Multi-scenario Simulation and Its Optimization

Xu Song Ji Pengyun Zhang Ge

(School of Architecture, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

Abstract:【Objective】To explore the dynamic changes in landscape ecological risk and land uses within nature reserves under multiple scenario simulations and provide a scientific basis for reducing landscape ecological risks in nature reserves.【Method】With Tianjin Ancient Coast and Wetland National Nature Reserve as a research object, the study uses the PLUS model to forecast land uses in 2040 under natural development and then adopts the MOP model for an optimized scenario. The Evolution of Landscape Ecological Risk Index (ERI) is used to analyze the evolution pattern of landscape ecological risks in both scenarios.【Result】1) The risk is high in the center and low on the periphery of the nature reserve, and the areas with medium, high and higher risks are mainly located in core and buffer zones; 2) Under the scenario of natural development, medium- and high-risk areas decline by 0.70% and 5.67%, respectively, while low, lower, and higher-risk areas increase by 1.15%, 1.39%, and 3.83%, respectively. Reductions in high- and higher-risk areas happen in buffer and core zones; and 3) The MOP-optimized scenario sees increases in low- and lower-risk areas by

收稿日期:2024-12-27

*基金项目:天津市艺术科学规划项目(B22039)

第一作者:徐嵩(1985-),男,博士,讲师,研究方向为城乡生态规划。E-mail:xusong@tju.edu.cn

通信作者:张戈(1968-),男,教授,研究方向为城市生态空间规划。E-mail:13821323966@126.com

0.69% and 13.12%, respectively, and decreases in medium-, higher-, and high-risk areas. Notably, reductions in high- and higher-risk areas occur in buffer and core zones, indicating improved risk conditions under the MOP-optimized scenario.【Conclusion】Compared to the natural development scenario, the MOP-optimized scenario fully considers and maximizes regional ecological benefits, which helps optimize the land use structure and the alignments with the future development needs of nature reserves. In the future, the scope of scenario settings should be further expanded, and more driving factors of land use change should be comprehensively considered to provide more scientific theoretical support for the green development of ecologically sensitive areas such as nature reserves.

Keywords: landscape ecological risk; land use; multi-scenario simulation; natural reserve

自然保护区在蓄水保源、改善环境等方面发挥关键作用，其生态系统的稳固性对区域生态安全至关重要。然而，经济社会发展导致土地利用模式变化[1]，引发多个生态风险事件，削弱生态安全屏障功能。国家级自然保护区是生态文明建设的重要载体，如何通过多情景模拟优化土地利用以缓解景观生态风险成为亟需解决的问题。

自 20 世纪 80 年代景观生态学兴起以来，景观生态风险研究在欧美等地广泛开展，其理论范式不断演进，逐步深化对风险多尺度效应与时空异质性的认知[2-3]，聚焦景观格局-过程互馈[4]及外界扰动对生态过程的级联效应[5]。国内学者则侧重景观生态风险评价的方法与体系，以评估人为活动对生态环境的影响，强调多源风险的综合表征与空间可视化，尤其关注风险的时空动态演变及尺度依赖性。近年来，景观生态风险评价研究对象扩展至流域、生态保护区及高原等生态敏感区[6-8]。相关学者围绕景观生态风险评价开展了大量研究，特别是土地利用变化与景观生态风险之间的时空格局研究。例如，CA-Markov、CLUE-S 和 FLUS 等模型被广泛用于预测未来土地利用情景并评估景观生态风险，其中 CLUE-S 模型通过引入驱动因素优化预测能力。Liu 等[9]基于系统动力学提出 FLUS 模型，优化了 CA 和 CLUE-S 模型的预测能力；Liang 等[10]提出 PLUS（Patch Generating Land Use Simulation）模型，进一步揭示多种景观类型变化的潜在驱动因素。

综上所述，尽管景观生态风险评价研究在时空格局[11]、单一情景预测与分析[12]以及多情景模拟下空间特征分析[13]等方面提供了丰富的见解，但对景观生态风险优化与土地利用类型间响应关系的讨论仍较少。为全面揭示二者的复杂非线性关系，明确景观生态风险的影响因子，亟需深入研究其交互作用与动态关联。

天津古海岸与湿地国家级自然保护区涵盖丰富的湿地生态系统，具有重要科学价值，为研究海陆变迁和滨海湿地生态系统提供独特视角。受退耕还林（草）、耕地保护等国家政策影响，该区域土地利用类型与强度发生明显变化。因此，本文以该保护区为研究对象，构建景观生态风险模拟预测技术框架，通过耦合 PLUS 与 MOP 模型，结合景观生态风险指数（ERI），对比分析多情景模拟下景观生态风险的演变特征，从而为优化土地利用空间格局、识别生态脆弱区域及景观生态风险防控提供科学依据。

1 研究区概况

天津古海岸与湿地国家级自然保护区（38°33′40″—39°32′02″N，117°14′35″—117°46′34″E）位于渤海西岸，地跨天津市滨海新区、津南区、宝坻区和宁河区的部分区域，总面积 359.13 km^2，其中核心区 45.15 km^2，缓冲区 43.34 km^2，实验区 270.64 km^2（图 1）。该区属于温带大陆性季风气候，是华北地区重要的候鸟中转站及京津唐地区最大的天然湿地，被誉为“京津绿肺”。近年受人类活动影响，研究区生态风险加剧，迫切需要开展景观生态风险预测与优化研究，以助力区域生态保护与治理。

2 研究方法

2.1 数据来源

本研究选取数据如表 1 所示，将其统一至 CGCS2000_3_Degree_GK_CM_117E 投影坐标系并重采样至 30 m 分辨率，数据处理软件为 ArcGIS10.8。

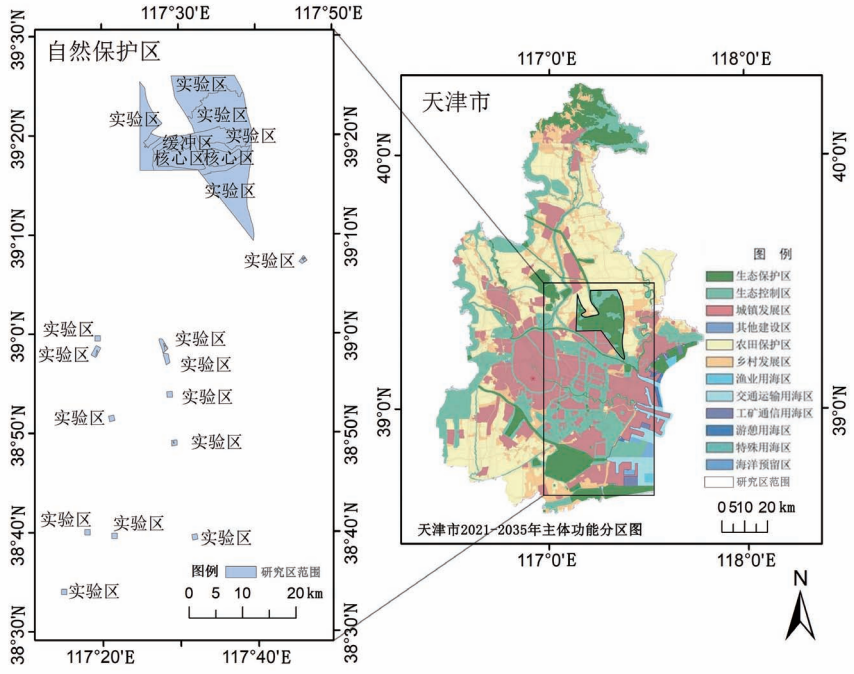


图 1　研究区功能分区

表 1　数据来源及精度

数据名称	数据年份	数据来源	数据格式（精度）
自然保护区边界范围	2023	天津市地理信息公共服务平台	矢量
永久基本农田	2022	天津市宁河区规划与自然资源局	矢量
土地利用数据	2000、2020	资源环境科学与数据中心网站	栅格（30 m）
GDP 空间分布公里网格数据	2019		栅格（1 km）
年降水量数据	2020		栅格（1 km）
年平均气温数据	2020		栅格（1 km）
人口密度数据	2020	World pop	栅格（100 m）
数字高程模型 DEM 数据	2020	地理空间数据云	栅格（30 m）
坡度数据	2020		栅格（30 m）
距道路距离	2023	Open Street Map	矢量
距铁路距离	2023		矢量

2.2　研究框架

综合考虑研究区各类影响因素，通过耦合 PLUS-MOP-ERI 模型进行自然保护区景观生态风险演变的多情景模拟预测及优化（图 2）。

2.2.1　PLUS 模型

PLUS 模型是对 FLUS 模型的优化改进，可更精细解析驱动因子与土地利用类型的关联，并有效模拟未来多种土地利用类型的动态变化[14]。相比 CLUE-S、CA-Markov 等模型，PLUS 模型在动态适应性、政策响应度和空间解析方面更具优势。

参考 PLUS 模拟软件用户手册进行各项设置。首先将影响因子数据集和土地利用数据统一成相同投影坐标系、分辨率、行列号的栅格数据；其次展开用地扩展分析策略（LEAS），即 sampling rate 采样率设置 0.01，mry 设置 8，决策树 20，operation parameters 设置 5，得到 6 类用地发展概率，再用 Markov 模型进行未来土地需求预测；最后结合土地利用转移成本矩阵（表 2~3）、领域权重因子和限制转换区域，并将 percentage of seeds 设置 0.1，运行 CARS 模块，0 代表两种土地类型不能转换，1 代表两种土地类型能够转换[15]。通过计算各土地类型的邻域权重得出：耕地为 0.68，林地为 0.64，草地为 0.74，水域为 0.10，城乡工矿及居民用地为 0.73，未利用地为 1；限制转换区域结合研究范围永久基本农田进行设置。

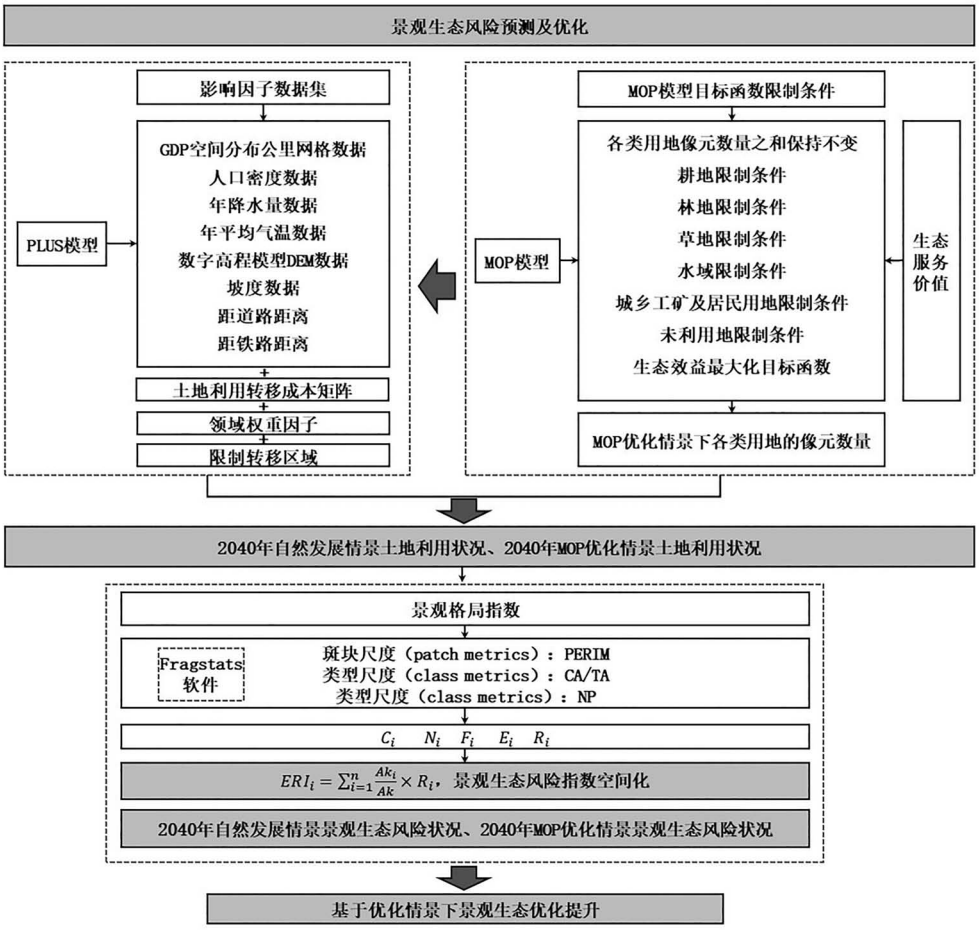


图 2 技术路线图

表 2 自然发展情景下土地利用转移成本矩阵

土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	城乡工矿及居民用地	未利用地
耕地	1	1	1	1	0	0
林地	0	1	1	1	0	0
草地	0	1	1	1	0	0
水域	0	1	1	1	0	0
城乡工矿及居民用地	0	1	1	1	1	1
未利用地	0	1	1	1	0	1

表 3 MOP 优化情景下土地利用转移成本矩阵

土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	城乡工矿及居民用地	未利用地
耕地	1	1	1	1	0	0
林地	0	1	0	0	0	0
草地	0	1	1	1	0	0
水域	0	1	1	1	0	0
城乡工矿及居民用地	0	1	1	1	1	1
未利用地	0	1	1	1	0	1

在情景模拟设置上：自然发展情景下，根据 Markov 模型得到 2040 年各用地类型的需求进行模拟；MOP 优化情景下，通过定义目标函数及设置限制条件进行模拟。根据已有研究结果，Kappa 系数大于 0.7 时预测结果精度较高，总体精度越接近 1，表示预测结果精度越高[16]。基于 PLUS 模型计算得到 Kappa 系数为 0.71，总体精度 0.83，说明模拟结果精度较高且能够用于预测研究区 2040 年土地利用情况。

2.2.2　MOP 模型

MOP 模型作为一种多目标优化工具，可以在兼顾多种预设目标的基础上进行土地利用优化配置。本研究通过 PLUS 模型与 MOP 模型耦合，并结合生态服务价值系数[17]定义目标函数及限制条件（表 4）以实现生态效益最大化，从而得到未来各土地利用类型的最优像元数量：

$$\max = 0.72x_1 + 2.34x_2 + 1.56x_3 + 3.27x_4 + 0.78x_5 + 0.39x_6 \quad (1)$$

式（1）中：x_i（i=1，2…，6）分别表示耕地、林地、草地、水域、城乡工矿及居民用地及未利用地；x_i的各系数为天津市各地类的生态系统服务价值系数[17]，此处耕地为 0.72 万元/（hm^2 · a）、林地为 2.34 万元/（hm^2 · a）、草地为 1.56 万元/（hm^2 · a）、水域为 3.27 万元/（hm^2 · a）、城乡工矿及居民用地为 0.78 万元/（hm^2 · a）、未利用地为 0.39 万元/（hm^2 · a）。

表 4　MOP 模型目标函数限制条件

约束条件	说明
X1+X2+X3+X4+X5+X6=399 051	各地类像元数量之和保持不变
199 186≤X1≤248 982	考虑耕地应逐步有序退出耕种，令其不大于自然发展情景下的耕地像元数量且向下浮动不超过 20%
X2≥1 233	考虑到林地生态效益高且符合自然保护区的土地利用，令其大于自然发展情景下的林地像元数量
X3≥11 949	考虑到草地生态效益高且符合自然保护区的土地利用，令其大于自然发展情景下的草地像元数量
45 173≤X4≤49 690	令其大于自然发展情景下的水域像元数量且向上浮动不超过 10%
51 652≤X5≤73 788	考虑自然保护区内城乡工矿及居民用地应逐步有序退出，令其不大于自然发展情景下的城乡工矿及居民用地像元数量且向下浮动不超过 30%
X6≤17 926	考虑到提高土地利用效率，令其小于自然发展情景下的未利用地像元数量

2.2.3　景观生态风险模型构建

在考虑区域空间异质性、斑块大小和面积的基础上，风险小区的划分宜采用平均斑块面积的 2~5 倍[18]，因此以 2 km×2 km 划分风险小区，共 139 个。选取景观损失度、干扰度、脆弱度建立景观生态风险模型，并分别计算景观损失度指数R_i、景观干扰度指数E_i、各景观类型的脆弱度指数V_i[19]。其中，景观类型的脆弱性分为 6 级：耕地为 4，林地为 2，草地为 3，水域为 5，城乡工矿及居民用地为 1，未利用土地为 6。最终得出景观生态风险指数 ERI_i。ERI_i为风险小区 i 的景观生态风险指数，与生态风险程度成正比。

3　结果与分析

3.1　2000—2040 年土地利用变化

2000—2020 年，研究区内各土地类型几乎均有所增加，只有水域面积急剧减少 45.60%（表 5）。土地利用转移显示（图 3），耕地主要转为林地、城乡建设用地和水域，而城乡工矿及居民用地主要转为耕地，水域则主要向耕地、城乡工矿及居民用地、草地和未利用地转移。政策导向、开发活动等是导致水域被侵蚀的重要因素。尽管退耕还林还草政策遏制了生态用地退化，但渔业养殖和围垦等活动加剧了水域缩减。

表 5　2000—2020 年研究区土地利用变化

土地利用类型	2000 年面积/ hm^2	2020 年面积/ hm^2	动态度/%
耕地	22 454.81	22 855.91	1.79
林地	50.85	110.10	116.52
草地	75.96	872.67	1 048.85
水域	10 521.45	5724.13	-45.60
城乡工矿及居民用地	2 742.21	3 494.91	27.45
未利用地	63.45	2 851.01	4 393.32

2040 年不同情景下土地利用变化有所不同（表 6）。1）自然发展情景：林地、草地、水域较 2020 年分别增加 0.79%、22.56% 和 4.93%；耕地、城乡工矿及居民用地、未利用地分别减少 1.96%、0.61%和 0.39%。2）MOP 优化情景：林地、草地、水域分别增加 2.43%、23.23% 和 6.61%；耕地、城乡工矿及居民用地、未利用地分别减少 2.32%、0.92%和 0.74%。相较自然发

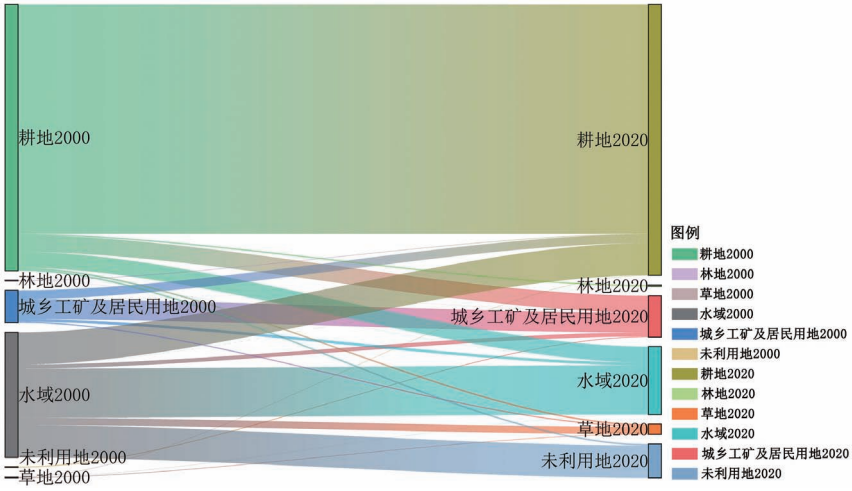


图 3 2000—2020 年研究区土地利用转移情况

展情景，MOP 优化情景下的耕地、城乡工矿及居民用地退出更有序，未利用地利用率更高；林地、草地、水域面积有所提升，耕地减少集中在北部实验区，而增加的水域、林地集中在南、北部实验区及西部缓冲区（图 4）。

表 6 2020 和 2040 年研究区不同情景土地利用变化

土地利用类型	2020 年面积/hm^2	2040 年自然发展情景/hm^2	2040 年 mop 优化情景/hm^2	自然发展情景较 2020 年动态度/%	mop 优化情景较 2020 年动态度/%
耕地	22 855.91	22 408.38	22 325.22	-1.96	-2.32
林地	110.10	110.97	112.77	0.79	2.43
草地	872.67	1 069.55	1 075.41	22.56	23.23
水域	5 724.13	6 006.42	6 102.72	4.93	6.61
城乡工矿及居民用地	3 494.91	3 473.64	3 462.65	-0.61	-0.92
未利用地	2 851.01	2 839.77	2 829.96	-0.39	-0.74

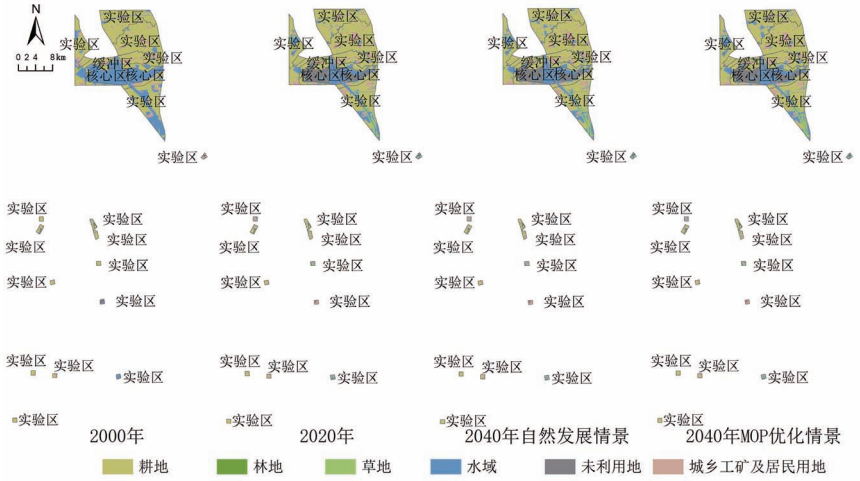


图 4 2000、2020 和 2040 年两种情景下土地利用

3.2 多情景下景观生态风险预测及优化

基于 2040 年自然发展情景下的景观生态风险评价结果如图 5 所示，利用自然断点法将景观生态风险分为五级：低风险范围 0.000 5～0.027 9；较低风险范围 0.027 9～0.043 8；中风险范围 0.043 8～0.056 6；较高风险范围 0.056 6～0.070 4；高风险范围 0.070 4～0.086 6。由图 5 可知，自然发展情景和 MOP 优化情景与 2020 年的风险分布特征相似，景观生态风险等级仍以较低、中、较高为主，但不同情景呈现出不同的演变趋势。

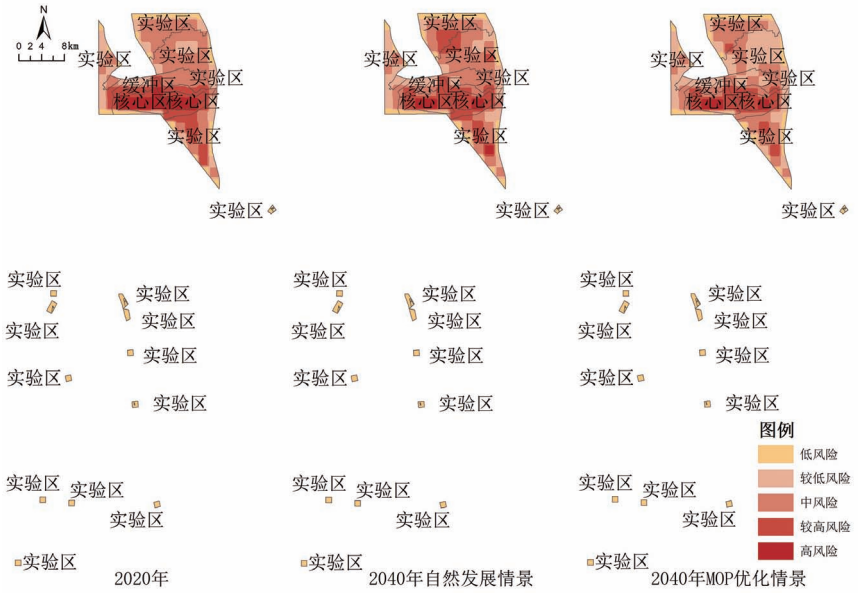


图 5　2020 年与 2040 年两种情景下景观生态风险空间分布

1）自然发展情景。相较 2020 年，低、较低及较高风险区面积分别增加 413.28、497.70 和 1 373.67 hm^2，面积占比动态度分别为 1.15%和、1.39%和 3.83%；中、高风险区面积趋于下降，分别减少 249.84 和 2 034.81 hm^2，面积占比动态度分别为−0.70%和−5.67%（表 7）。景观生态风险空间分布总体呈现“中间高、边缘低”的特征。核心区较高风险区增加，高风险区减少，部分高风险区降级为较高风险区。其主要原因是：在该情景下，土地利用演变遵循相关政策，林地、草地和水域等生态用地增加，景观破碎度和分离度相应降低，使得高、较高风险区缩小。

表 7　2020 和 2040 年不同情景下景观生态风险对比

等级	2020 年		2040 年自然发展情景			2040 年 MOP 优化情景		
	面积/hm^2	占比/%	面积/hm^2	占比/%	较 2020 年动态度/%	面积/hm^2	占比/%	较自然发展情景动态度/%
低风险	4 131.90	11.51	4 545.18	12.66	1.15	4 793.67	13.35	0.69
较低风险	7 298.01	20.32	7 795.71	21.71	1.39	12 506.49	34.83	13.12
中风险	14 370.29	40.02	14 120.45	39.32	−0.70	12 151.43	33.84	−5.48
较高风险	6 743.70	18.78	8 117.37	22.61	3.83	5 413.14	15.07	−7.53
高风险	3 364.83	9.37	1 330.02	3.70	−5.67	1 044.00	2.91	−0.80

2）MOP 优化情景。相较 2020 年，中、较高及高风险区面积分别减少 2 218.86、1 330.56 和 2 320.83 hm^2，占比动态变化为 −6.18%、−3.71%和−6.46%；低、较低风险区面积分别增加 661.77 和 5 208.48 hm^2，占比动态变化为 1.84%和 14.51%（表 7）。相比自然发展情景，低、较低风险区面积增加 248.49 和 4 710.78 hm^2，占比动态变化为 0.69%和 13.12%；中、较高及高风险区分别减少 1 969.02、2 704.23 和 286.02 hm^2，占比动态变化为−5.48%、−7.53%和−0.80%（表 7）。景观生态风险空间分布与自然发展情景相似，较高和高风险区主要集中于核心区及缓冲区，因此核心区与缓冲区仍是未来景观生态风险防范重点。MOP 优化情景下，较高和高风险区面积与占比均显著降低，表明景观生态风险状况优于自然发展情景。这是因为：MOP 通过目标函数和约束条件限制城乡工矿及居民用地扩张，同时加强退耕还林还草，提高未利用地利用率，促进林地、草地和水域扩展与稳定性，从而减少中、较高和高风险区面积。综上，MOP 优化情景充分考虑并最大化生态效益，有助于优化土地利用结构，更契合自然保护区未来发展和生态修复需求。

4 讨论

4.1 土地利用与景观生态风险演变规律

研究表明，相较 2020 年，自然发展情景下，林地、草地、水域面积增加，耕地、城乡工矿及居民用地、未利用地减少。这主要受政策干预影响，如《中华人民共和国湿地保护法》中明确了湿地保护框架。MOP 优化情景下，耕地、城乡工矿及居民用地、未利用地面积进一步减少，林地、草地、水域显著增加，这是 MOP 模型结合生态服务价值优化土地利用的结果。从景观生态风险来看，研究区的风险从高到低排序为：2020 年、2040 年自然发展情景、2040 年 MOP 优化情景。两种情景下林地、草地和水域的占比增加，其中 MOP 优化情景下增长更为显著，且未显著增加景观斑块的破碎度，表明 MOP 优化情景可有效降低研究区的生态风险，提高生态韧性。空间分布上，研究区中部核心区为高、较高风险聚集区。原因在于研究区以水域为主且景观斑块完整性较低，易受干扰。

从建设用地和非生态用地层面看，两种情景下城乡工矿及居民用地、未利用地减少，与景观生态风险值呈正相关。这与娄妮等[20]研究一致，因这类用地扩张会加剧生态系统的破碎化和分散化，而且由于耕地对景观生态风险的贡献度较高，其面积缩减进一步加剧了风险。从生态用地层面看，林地、草地及水域增加有助于降低整体景观生态风险，这与王鹏全等[21]的研究结论趋同，即生态服务价值与景观生态风险呈负相关，表明生态保护与修复能有效缓解风险。此外，景观生态风险空间分布呈“中间高、边缘低”的特征，与刘可暄等[22]在水源尺度的研究结果相互印证。二者研究区域中部均以水域为主，边缘多为林地、草地，从而形成相似空间格局。

4.2 优化建议

基于研究结果，本文从景观生态风险防范和生态韧性提升的角度提出以下优化建议：

1）聚焦重点区域，推进风险防控。鉴于高、较高风险区主要集中在核心区及缓冲区，应重点关注七里海湿地、潮白新河及黄庄等关键生态功能区，划定防范重点区域。针对中风险区，通过整合林地、草地、水域等生态要素，提升整体生态服务价值，引导其向低风险区转化。

2）保护与修复并举，实施差异化管控。依托天津市以国家公园为主体的自然保护地体系试点，核心区实行刚性保护，逐步搬迁村庄，禁止开发性、生产性建设，并修复破碎景观；边缘区实施弹性管控，允许有限人为活动，以最大程度减少生态影响。

3）优化保护边界，推进生态恢复。针对南部于家岭大桥等人为活动强度较大的区域，结合线性基础设施调整保护区范围，降低边缘地带生态破坏。针对湿地萎缩问题，在高、较高风险区（如七里海湿地）实施引水调蓄，恢复湿地生态功能。

4）建立跨部门协调机制，推进联保共治。组建保护工作小组，推动流域综合治理，环保、林业、国土规划等部门协同治理潮白新河、青龙湾故道等重要河道，探索基于底线约束的国土空间全要素“一张图”管控，提升区域生态安全和可持续管理能力。

5 结论

土地利用变化方面，自然发展情景下，林地、草地、水域较 2020 年分别增加了 0.79%、22.56%和 4.93%，耕地、城乡工矿及居民用地、未利用地分别减少了 1.96%、0.61%和 0.39%；MOP 优化情景下，相较自然发展情景，耕地、城乡工矿及居民用地有序退出更显著，未利用地利用率提高，林地、草地、水域拥有量更优。

景观生态风险预测方面，2040 年自然发展情景下，总体呈改善趋势，但高风险区域仍需重点关注。MOP 优化方案更契合生态保护需求，为研究区土地利用结构优化调整提供有力支持。

未来应进一步拓宽情景设置适用范围，开展跨区域实证分析，探讨不同区域生态风险演变的共性与差异，同时优化模型与政策调控假设，综合考虑更多土地利用变化的驱动因素，为自然保护区等生态敏感区域的绿色发展提供更科学的理论支撑。

参考文献

[1]李雨泽,袁静远,吴冰,等.基于 PLUS-MOP 模型构建韧性城市生态网络[J].中国城市林业,2024,22(3):89-96.

[2]KAPUSTKA L A, GALBRAITH H, LUXON B M, et al. Using landscape ecology to focus ecological risk assessment and guide risk management decision-making[J]. Toxicology and Industrial Health,2001,17(5/6/7/8/9/10):236-246.

[3]LEUVEN R S E W, POUDEVIGNE I. Riverine landscape dynamics and ecological risk assessment[J]. Freshwater Biology, 2002,47(4):845-865.

[4]DORNER B, LERTZMAN K, FALL J. Landscape pattern in topographically complex landscapes: issues and techniques for analysis[J]. Landscape Ecology,2002,17(8):729-743.

[5]LANDIS W G. The frontiers in ecological risk assessment at expanding spatial and temporal scales[J]. Human and Ecological Risk Assessment,2003,9(6):1415-1424.

[6]莫贵芬,冯建中,王中美,等.中亚阿姆河跨境流域景观生态风险时空演变特征分析[J].干旱地区农业研究,2022,40(1):123-131.

[7]蔡葵,王景,吴文春,等.土地利用驱动下的珠峰自然保护区生态风险研究[J].生态科学,2023,42(2):183-192.

[8]杜佳衡,王影雪,潘悦,等.高原河谷县域景观生态风险评价与生态安全格局构建:以云南省大理州永平县为例[J].生态学杂志,2024,43(5):1509-1520.

[9]LIU X P, 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[J]. Landscape and Urban Planning,2017,168:94-116.

[10]LIANG X, GUAN Q F, CLARKE K C, et al. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: a case study in Wuhan, China[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2021, 85:101569.

[11]WANG H, LIU X M, ZHAO C Y, et al. Spatial-temporal pattern analysis of landscape ecological risk assessment based on land use/land cover change in Baishuijiang National nature reserve in Gansu Province, China[J]. Ecological Indicators, 2021, 124: 107454.

[12]刘静静,李旭,彭培好.基于 PLUS 模型的雅康高速路段景观生态风险评价[J].水土保持通报,2023,43(3):148-158.

[13]李玮麒,兰泽英,陈德权,等.广州市土地利用多情景模拟及其生态风险时空响应[J].水土保持通报,2020,40(4):204-210,227,2.

[14]BAO S W, YANG F. Spatio-temporal dynamic of the land use/cover change and scenario simulation in the southeast coastal shelterbelt system construction project region of China[J]. Sustainability,2022,14(14):8952.

[15]胡丰,张艳,郭宇,等.基于 PLUS 和 InVEST 模型的渭河流域土地利用与生境质量时空变化及预测[J].干旱区地理,2022,45(4):1125-1136.

[16]魏玺,邵亚,蔡湘文等.漓江流域陆地生态系统碳储量时空特征与预测[J].环境工程技术学报,2023,13(3):1223-1233.

[17]王磊,夏敏,赖迪辉.基于土地利用变化的天津市生态系统服务价值响应及驱动因子分析[J].科技管理研究,2014,34(23):110-114.

[18]苏海民,何爱霞.基于 RS 和地统计学的福州市土地利用分析[J].自然资源学报,2010,25(1):91-99.

[19]于航,刘学录,赵天明,等.基于景观格局的祁连山国家公园景观生态风险评价[J].生态科学,2022,41(2):99-107.

[20]娄妮,王志杰,何嵩涛.基于景观格局的阿哈湖国家湿地公园景观生态风险评价[J].水土保持研究,2020,27(1):233-239.

[21]王鹏全,刘得俊,李润杰,等.湟水河流域景观格局与生态风险时空特征及驱动因子探测[J].水土保持通报,2023,43(3):213-224.

[22]刘可暄,王冬梅,魏源送,等.密云水库流域多尺度景观生态风险时空演变趋势[J].生态学报,2023,43(1):105-117.