昆明市生态系统服务多情景模拟评估*

——基于 GMOP-PLUS 模型分析

刘玥含 金爱博 王向荣

北京林业大学园林学院 北京 100083

摘要：【目的】定量分析土地利用变化对生态功能的影响，为合理开发土地资源、协调经济发展与生态保护提供科学参考。【方法】基于 2000—2020 年昆明市土地利用数据，通过 GMOP-PLUS 模型预测 2030 年不同情景下的土地利用，并采用 InVEST 模型评估生态系统服务变化。【结果】1）2000—2020 年昆明市建设用地快速扩张，耕地和草地持续减少，生态系统服务总体呈下降趋势，且南北地区存在差异。2）ND 情景下产水量和土壤保持量上升，碳储量及生境质量下降；EP 情景林地面积占比最大，生态系统服务质量整体显著提升；ED 情景与之相反；SD 情景建设用地与林地同步扩张，兼顾生态保护与经济发展，是未来城市规划的优选方向。3）建设用地扩张对生态系统服务产生负面影响，而林地扩展有助于提升碳储量和生境质量。4）碳储量、土壤保持和生境质量呈协同关系，产水量与碳储量和生境质量呈权衡关系。【结论】快速城市化背景下，昆明市 2000—2020 年土地利用变化显著，生态系统服务质量下降。建设用地与林地的发展变化对于生态系统服务具有重要影响。未来土地利用规划需在生态保护与经济发展之间寻求平衡，实现土地利用与生态服务的协调发展，如同步提升林地保护、生态系统服务，协调建设用地与林地发展速度等。

关键词：土地利用变化；生态系统服务；GMOP-PLUS 模型；多情景模拟

DOI：10.12169/zgcsly.2024.12.04.0001

Multi-Scenario Modeling Assessment of Ecosystem Services in Kunming Based on GMOP-PLUS Model

Liu Yuehan Jin Aibo Wang Xiangrong

(School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract：【Objective】The study is to quantitatively analyze the impact of land use changes on ecological functions, and provide scientific references for the rational development of land resources and the coordination between economic development and ecological protection.【Method】Based on land use data of Kunming City from 2000 to 2020, the study employs the GMOP-PLUS model to predict land use scenarios for 2030 and uses the InVEST model to evaluate changes in ecosystem services.【Result】1) The rapid expansion of construction land and the reduction of farmland and grassland in Kunming from 2000 to 2020 result in an overall decline in ecosystem services, which also presents significant regional differences between the north and the south; 2) Under the ND scenario, the water yield and the soil retention increase, while the carbon storage and the habitat quality decrease. The EP scenario, has the largest proportion of forest land and significantly improved ecosystem service quality, whereas the ED scenario

收稿日期：2024-12-04

*基金项目：国家重点研发计划课题（2022YFC3800203）

第一作者：刘玥含（1999-），女，硕士生，研究方向为风景园林规划与设计。E-mail：lyh2022@bjfu.edu.cn

通信作者：王向荣（1963-），男，博士，教授，研究方向为风景园林规划与设计、风景园林历史与理论。E-mail：xrw@bjfu.edu.cn

displays the opposite trend. In the SD scenario, there is a simultaneous expansion of construction land and forest land, showcasing a balance between ecological protection and economic development, which makes it the preferred direction for future urban planning; 3) Expansion of construction land negatively impacts ecosystem services, while forest land expansion enhances carbon storage and habitat quality; and 4) Carbon storage, soil retention, and habitat quality exhibit synergistic relationships, whereas water yield shows trade-offs with carbon storage and habitat quality.【Conclusion】 Under the background of rapid urbanization, land use changes in Kunming from 2000 to 2020 were significant, and the quality of ecosystem services declined. The development of construction land and forest land has an important impact on ecosystem services, and future land use planning needs to seek a balance between ecological protection and economic development to realize the coordinated development of land use and ecological services, such as synchronizing the improvement of forest land protection and ecosystem services, and coordinating the development rate of construction land and forest land.

Keywords: land use change; ecosystem service; GMOP-PLUS model; multi-scenario simulation

随着我国城市化进程的加速，城市环境压力不断增加，土地资源供需矛盾日益突出，成为制约城市生态可持续发展的关键因素[1]。2024年全国生态环境保护工作会议指出，我国已进入绿色化、低碳化的转型期，推动高质量发展需由重点整治向系统治理转变[2]。在此背景下，土地作为生态建设、经济发展和粮食安全的关键空间载体，其战略价值愈发凸显[3]。科学评估与优化土地利用，深入探讨土地利用与生态系统服务的关系，对于推动中国城市可持续发展及提升环境治理水平具有重要意义[4]。

土地利用情景模拟是土地优化配置的重要研究手段，通过变化模型可深入探讨土地利用的驱动机制、动态规律及环境效应[5]。近年来，学术界在土地利用优化方面开展了大量研究，涌现出元胞自动机（Cellular automata-Markov model, CA-Markov）[6]、小区域土地利用转换及其效应（Conversion of land use and its effects at small regional extent model, CLUE-S）[7]和未来土地利用模拟（Future Land-Use Simulation model, FLUS）[8]等预测模型。其中，斑块生成土地利用变化模拟（Patch-generating Land Use Simulation model, PLUS）模型通过揭示土地利用变化的潜在驱动因素及非线性机制，能够实现更为精确的预测，被视为当前较先进的模拟工具[9]，结合由灰色线性规划和多目标规划发展而来的灰色多目标优化（Gray multi-objective optimization, GMOP）模型，能够有效处理土地利用优化中的不确定性，为土地配置决策提供有力支持[10]。此外，在评估土地利用变化对生态环境的影响时，生态系统服务价值评估是一种较为客观的手段[11]，而InVEST模型因其广泛的适用性和较高的运行效率，成为主流评估工具之一[12]。耦合GMOP与PLUS模型模拟土地利用情景，并采用InVEST模型评估生态服务，可以定量分析土地利用变化对生态功能的影响。

昆明市作为云南省省会及滇中城市群核心城市，是我国面向南亚、东南亚的重要门户[13]。然而，昆明市人均耕地、森林和淡水资源量低于云南省平均水平[14]，面临土壤侵蚀、水土流失、耕地集中度低、开发利用困难等问题。基于此，本研究结合生态系统服务评估，利用GMOP-PLUS耦合模型模拟昆明市土地利用的优化情景，评估不同情景下的生态系统服务功能及其相互关系，旨在为改善昆明市生态环境质量提供对策建议，并为合理开发土地资源、协调经济发展与生态保护提供科学参考。

1 研究区概况

昆明市（102°10′E—103°40′E，24°23′N—26°33′N）地处中国西南边陲，面积约21 012 km^2，三面环山，地势由北向南呈阶梯状逐渐降低，以湖盆岩溶高原地貌为主。该地区气候温和，大部分区域夏无酷暑、冬无严寒，享有“春城”美誉。然而，随着城市化的扩张，昆明市生态保护与经济发展间的矛盾不断增加。

2 研究方法

2.1 数据来源及预处理

研究数据包括来自中科院资源环境科学与数

据中心（https://www.resdc.cn/）和地理空间数据云（https://www.gscloud.cn/）的昆明市土地利用数据及气象、土壤、河流、坡度等自然环境数据；来自全国地理信息资源目录服务系统（https://www.webmap.cn/）和 OpenStreetMap（https://www.openstreetmap.org/）的 GDP、人口密度、夜间灯光、道路、政府距离等社会经济数据。各项数据在 ArcGIS 10.2 中进行投影等预处理，栅格数据分辨率统一为 30 m×30 m。

2.2　多情景土地利用模拟

2.2.1　生态与经济价值系数计算

生态价值系数参考谢高地等[15]的生态系统服务价值当量表及相关研究[16-17]。基于昆明市 2000—2020 年统计年鉴中农业、林业、畜牧业、渔业及第二、三产业单位面积产值数据[17-19]计算经济价值系数，结合 GM（1，1）灰色模型预测 2030 年经济价值系数（表 1）。

表 1　2030 年昆明生态价值系数与经济价值系数　　万元/km²

土地利用类型	耕地（x_1）	林地（x_2）	草地（x_3）	水域（x_4）	建设用地（x_5）	未利用地（x_6）
生态价值系数	96.29	342.73	142.23	552.74	0.00	169.42
经济价值系数	1 657.19	58.75	656.74	137.67	52 780.20	0.00

2.2.2　多情景设定与目标函数构建

本研究以 2030 年为目标年，结合生态与经济效益，模拟 4 种发展情景。

1）自然发展情景（ND）：遵循土地自然演变进程，模拟基于 Markov 预测。

2）生态保护情景（EP）：以生态保护为核心，优先发展林地、湿地、水源等生态保护用地，限制城镇发展和建设用地、耕地面积。其目标函数如下：

$$F_1(x) = \mathrm{Max}\sum_{i=1}^{6} a_i x_i \qquad (1)$$

式(1)中：a_i为各土地利用类型的生态价值系数（万元/km²）；x_i为土地利用类型 i 的面积(km²)。

3）经济优先情景（ED）：加快城市扩张，揭示在经济效益最大化模式下，城市快速发展可能带来的环境问题与潜在威胁。其目标函数如下：

$$F_2(x) = \mathrm{Max}\sum_{i=1}^{6} b_i x_i \qquad (2)$$

式(2)中：b_i为各土地利用类型的经济价值系数（万元/km²）；x_i为土地利用类型 i 的面积(km²)。

4）可持续发展情景（SD）：协调生态保护与经济优先两种发展模式，结合经济和生态最大化目标，实现综合效益的最大化。其目标函数如下[20]：

$$F_3(x) = \mathrm{Max}\{F_1(x)\ ,\ F_2(x)\} \qquad (3)$$

在设置目标函数的同时，考虑政策与研究区现实，提出相应的约束条件（表 2），构建 MOP 多目标规划模型，并将不同情景的目标函数及约束条件导入 LINGO 18.0 进行求解。

表 2　土地利用预测约束条件

约束类型	约束条件	约束含义
土地面积	$\sum_{i=1}^{6} x_i = 21012.16$	各情景下土地利用总面积不变
耕地面积	$3\,548.70 \leqslant x_1 \leqslant 3\,977.72$	考虑耕地保护和退耕还林政策，设定 2020 年耕地面积为上限，并将规划耕地保有量下浮 10%作为下限
林地面积	$8\,508.99 \leqslant x_2 \leqslant 10\,399.87$	将林地的面积变化设定为在 2020 年的基础上变动±10%
草地面积	$4\,518.19 \leqslant x_3 \leqslant 6\,777.29$	考虑退耕还草政策，以 2030 年 Markov 预测面积的 120%作为上限，以 2030 年 Markov 预测面积的 80%作为下限[21]
水域面积	$515.18 \leqslant x_4 \leqslant 647.40$	以 2020 年水体面积为下限，以 2030 年 Markov 预测面积的 120%作为上限
建设用地面积	$1\,193.93 \leqslant x_5 \leqslant 1\,977.57$	以 2020 年建设用地面积为下限，以 2030 年 Markov 预测面积的 120%作为上限[22]
未利用地面积	$63.51 \leqslant x_6 \leqslant 77.62$	将未利用地的面积变化设定为在 2020 年的基础上变动±10%[18]
生物多样性	$\frac{x_3 + x_6}{21\,012.16} \geqslant 2.5\%$	为了保持土地利用的多样性，设定草地和未利用地的面积之和占比不低于 2.5%[20,22]
生态价值	$\sum_{i=1}^{6} a_i x_i \geqslant 4\,675\,238.13$	优化情景下区域的生态价值大于自然发展情景
经济价值	$\sum_{i=1}^{6} b_i x_i \geqslant 97\,569\,074.21$	优化情景下区域的经济价值大于自然发展情景

2.2.3 多情景土地利用空间模拟

选取自然环境和社会经济驱动因子，设置土地利用转移矩阵[23-24]（表3）。

表3 各情景下土地利用转移矩阵

	自然发展情景（ND）						经济优先情景（ED）						生态保护情景（EP）						可持续发展情景（SD）					
	a	b	c	d	e	f	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	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0
b	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0
c	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0
d	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0
e	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0
f	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

注：0表示不允许转换，1表示允许转换；a为耕地，b为林地，c为草地，d为水域，e为建设用地，f为未利用地。

2.3 生态系统服务价值评估

2.3.1 产水量

InVEST产水量模块通过计算降水量与实际蒸散发量之差来估算产水量，其中生物物理参数参照研究文献[25-26]及FAO指南设定。计算公式如下：

$$R_{wx} = \left(1 - \frac{AET(x)}{P(x)}\right) \times P(x) \quad (4)$$

式（4）中：R_{wx}表示栅格x处的年平均产水量；$P(x)$为栅格x上的年平均降水量；AET(x)为栅格X处的实际蒸散量。

2.3.2 碳储量

InVEST碳储存模块通过整合地上、地下根系、土壤及死亡有机物4个碳库评估区域总碳储量[27]（表4）。计算公式如下：

$$S_c = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead} \quad (5)$$

式（5）中：S_c为区域总碳储量；C_{above}为地上碳储量；C_{below}为地下根系碳储量，C_{soil}为土壤碳储量；C_{dead}为死亡有机物碳储量。

表4 云南省不同土地利用类型碳密度值 t·hm^{-2}

土地利用类型	地上碳密度	地下碳密度	土壤碳密度	死亡有机物碳密度
耕地	16.83	11.12	75.89	2.11
林地	30.76	18.40	100.24	2.78
草地	14.59	17.50	87.13	2.42
水域	1.62	0	64.09	1.78
建设用地	7.77	1.55	34.36	0
未利用地	10.57	2.11	34.45	0.96

2.3.3 土壤保持量

InVEST泥沙输移比模块通过修正的通用土壤流失方程评估区域土壤保持能力[28]。计算公式如下：

$$SC = R \times K \times LS \times (1 - C \times P) \quad (6)$$

式（6）中：SC为土壤保持量；R为降雨侵蚀因子；K为土壤侵蚀因子；C为植被覆盖因子；P为水土保持因子；LS为坡长坡度因子。

2.3.4 生境质量

InVEST生境质量模块通过结合土地利用类型和生物多样性威胁因素，估算生境质量指数。威胁因子的影响范围、权重以及生境类型对威胁因子的敏感性参考前人研究[29-30]。计算公式如下：

$$Q_{xj} = H_j \times \left[1 - \frac{D_{xj}^z}{(k^z + D_{xj}^z)}\right] \quad (7)$$

式（7）中：Q_{xj}为生境质量指数；H_j为土地利用类型j的生境适宜度，Dz_{xj}为生境胁迫水平；k为半饱和系数。

3 结果与分析

3.1 土地利用变化特征

3.1.1 模型精度检验

为确保模拟精度，以昆明市2010年土地利用数据为基础，采用PLUS模型模拟2020年土地利用，并将结果与实际数据进行比对。验证结果显示Kappa系数为0.868，总体精度0.91，符合研

究要求。

3.1.2　现状土地利用

从图 1、表 5 可以看出，2000—2020 年，昆明市共有 12.96%的土地发生转移，耕地和草地是主要转出类型，转出面积分别为 815.21 km^2 和 975.76 km^2。林地转出 817.38 km^2，转入 675.19 km^2，整体面积减少 1.48%，转入和转出较为平衡。建设用地和水域为主要转入类型，转入面积分别为 765.54 km^2 和 92.88 km^2。建设用地在 20 年间增加 765.54 km^2，扩大 1.46 倍，成为昆明市变化最为显著的土地类型，主要来源于耕地和草地，分别占 2020 年建设用地面积的 32.3%和 19.8%。

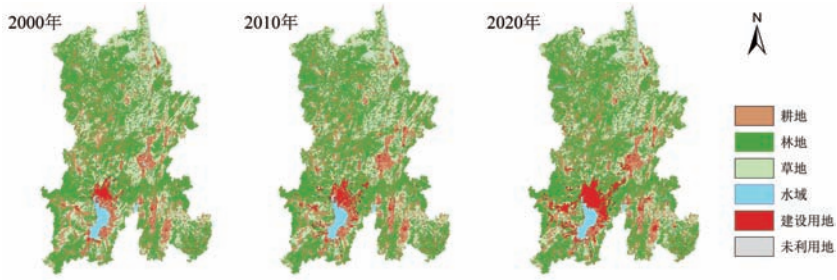


图 1　2000—2020 年昆明土地利用空间分布

表 5　2000—2020 年昆明土地利用面积转移矩阵　　km^2

2000 \ 2020	草地	耕地	建设用地	林地	水域	未利用地	总计	转出面积
草地	5 157.39	264.27	236.13	447.28	22.07	6.00	6 133.15	975.76
耕地	191.97	3 440.38	385.41	211.64	25.44	0.76	4 255.59	815.21
建设用地	10.33	30.94	428.37	11.20	4.03	0.18	485.06	56.69
林地	431.61	223.56	119.71	8 779.00	40.82	1.68	9 596.38	817.38
水域	6.04	17.54	24.16	4.03	422.30	0.28	474.36	52.06
未利用地	3.61	0.99	0.13	1.04	0.51	61.66	67.93	6.27
总计	5 800.96	3 977.68	1 193.91	9 454.19	515.18	70.56	21 012.48	2 723.38
转入面积	643.57	537.30	765.54	675.19	92.88	8.90	2723.38	

3.1.3　未来土地利用多情景模拟

在 2030 年 4 种模拟情景（图 2）中，水域和未利用地的变化较小，而林地、草地和建设用地的面积变化较为显著。林地面积占比排序为 EP>SD>ND>ED；草地面积占比排序为 ED>ND>EP>SD；建设用地面积占比排序为：ED>SD>ND>EP。图 3 表明，4 种情景下，优势地类均为林地：ND 情景下，林地面积为 9 332.07 km^2，较 2020 年下降 1.29%，耕地、草地和未利用地面积减少，建设用地扩张至 1 647.97 km^2，增幅 38.03%。EP 情景下，林地面积增长 10.00%，水域面积占比最大，建设用地扩张最小，城市发展较缓慢。ED 情景下，建设用地扩展至 1 977.63 km^2，占比增至 9.4%，显著压缩林地空间，林地占比最小。SD 情景下，建设用地、林地和水域同时扩张，草地面积缩小至 4 518.32 km^2，降幅 22.11%。

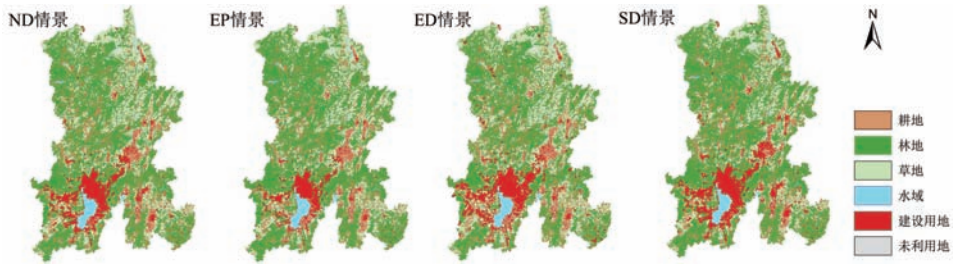


图 2　昆明 2030 年多情景土地利用空间分布

3.2　生态系统服务变化特征

3.2.1　2000—2020 年生态系统服务变化

2000—2020 年，昆明市生态系统服务水平呈现不同程度变化（表 6）。水资源供给服务持续下降，前 10 年降幅为 23.6%，减少 1.43×10^9 t；后 10 年降幅减缓至 5.6%，累计减少 1.69×10^9 t。随

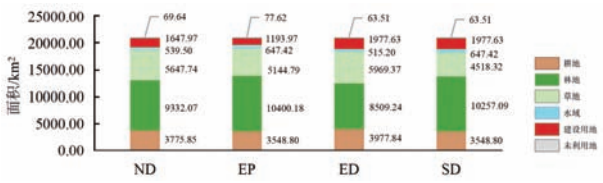


图 3 昆明 2030 年多情景土地利用空间分布比较

着城市化进程加速，部分林地和草地转为建设用地，碳储量下降 2.1%，累计减少 5.80×10^6 t。土壤保持服务呈现先降后升的趋势，前 10 年下降 12.75%（减少 8.29×10^7 t），后 10 年回升 12.87%（增加 7.30×10^7 t），总体下降约 1.5%。生境质量持续下降，中心城区生态环境受损较严重。

在空间分布（图 4）上，产水量呈东高西低格局，北部产水量较高，建设用地和耕地为主要产水来源，其中建设用地由于透水性弱，雨水径流占比相对较高，形成了局部产水量的增加趋势[31]。碳储量呈现北高南低的分布：西北部因以林地为主，碳储量最高；东部耕地面积多，碳储量少于西部；南部建成区面积占比高，碳储量最少，显著低于周边地区。土壤保持能力分布与碳储量相似，北部高于南部，且高值区域集中在最北端。生境质量与土地利用密切相关，南部耕地和建设用地密集，生境质量较差；北部以林地和草地为主，整体生境质量优于南部地区。

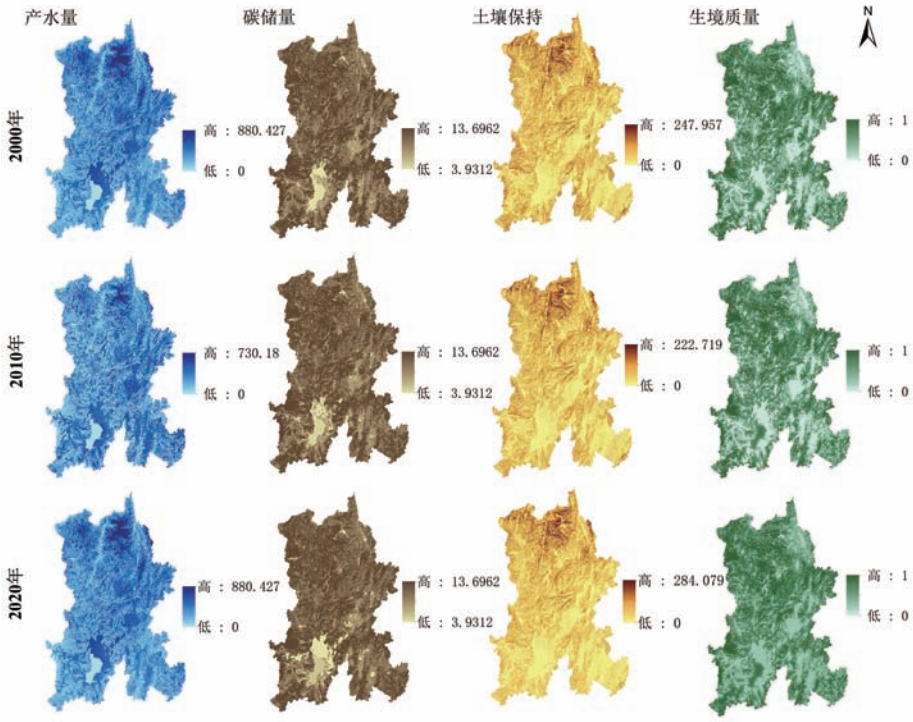


图 4 2000—2020 年昆明生态系统服务空间分布

3.2.2 2030 年生态系统服务预测

在 4 种模拟情景中，产水量在 ED 情景中最高，碳储量和生境质量在 EP 情景中最高，土壤保持则在 SD 情景中最高（表 6、图 5）。

表 6 昆明市生态系统服务总体变化

年份	产水量/ 10^9 m^3	碳储量/ 10^8 t	土壤保持/ 10^8 t	生境质量
2000	6.060	2.714	6.498	0.657
2010	4.630	2.697	5.669	0.656
2020	4.370	2.656	6.399	0.653
2030 年 ND 情景	4.435	2.621	6.406	0.650
2030 年 EP 情景	4.212	2.693	6.486	0.667
2030 年 ED 情景	4.572	2.579	6.385	0.638
2030 年 SD 情景	4.353	2.627	6.511	0.658

由表 6 可知：2030 年昆明市模拟产水量排序依次为 ED>ND>SD>EP，ED 情景产水量较 2020 年增加 2.02×10^8 t，增速 4.62%，EP 情景产水量最低，较 2020 年减少 1.58×10^8 t，降幅 3.62%。碳储量排序为 EP>SD>ND>ED，其中 EP 情景略有上升，增幅 1.39%，而其他情景均呈下降趋势。土壤保持服务排序为 SD>EP>ND>ED，SD、EP 和 ND 情景均有所上升，ED 情景出现下降。生境质量在 SD 和 EP 情景下有所上升，ED 情景最低，与碳储量排序一致，这是因为生境质量主要受林地占比影响，EP 情景中林地占比最大，建设用地

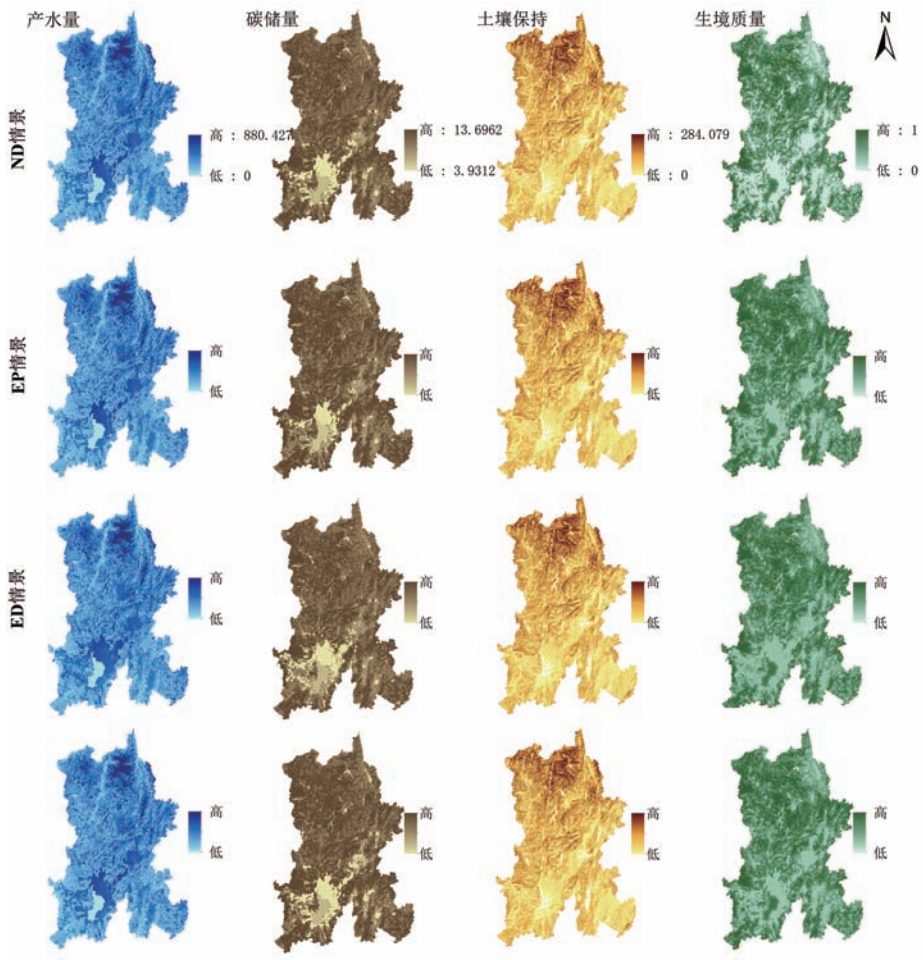
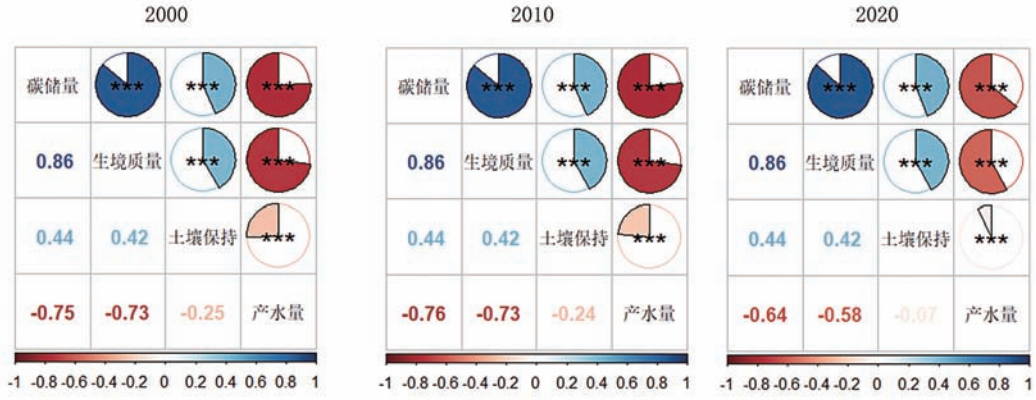


图 5　2030 年昆明生态系统服务空间分布模拟

占比最少，因此生境质量最高，反之，ED 情景由于建设用地扩张，生境质量最差。

3.2.3　生态系统服务预测相关性

基于 Spearman 相关性分析，探讨 2000—2020 年昆明市生态系统服务的权衡与协同关系。结果（图 6）表明，碳储量、生境质量和土壤保持之间年际相关系数保持稳定，均呈显著正相关，表现出协同关系。产水量与碳储量及生境质量呈负相关，且 2010—2020 年相关系数分别由 -0.76、-0.73升至-0.64、-0.58，表明服务间权衡强度减弱。同时，土壤保持与产水量的相关性逐渐减弱，相关系数由-0.24 降至-0.07。



注：*、**、*** 分别表示回归系数 P 在 10%、5%、1%显著性水平上显著，*** 表明结果可信，下同。

图 6　2000—2020 年昆明市生态系统服务权衡/协同分析

在 2030 年昆明市的四种模拟情景中，碳储量、生境质量和土壤保持之间呈现协同关系，尤其是碳储量与生境质量间的协同作用最为显著（图 7）。产水量与碳储量、生境质量则表现出显著的权衡关系。土壤保持与产水量之间的相关性较弱，相关系数介于−0.09～−0.11。

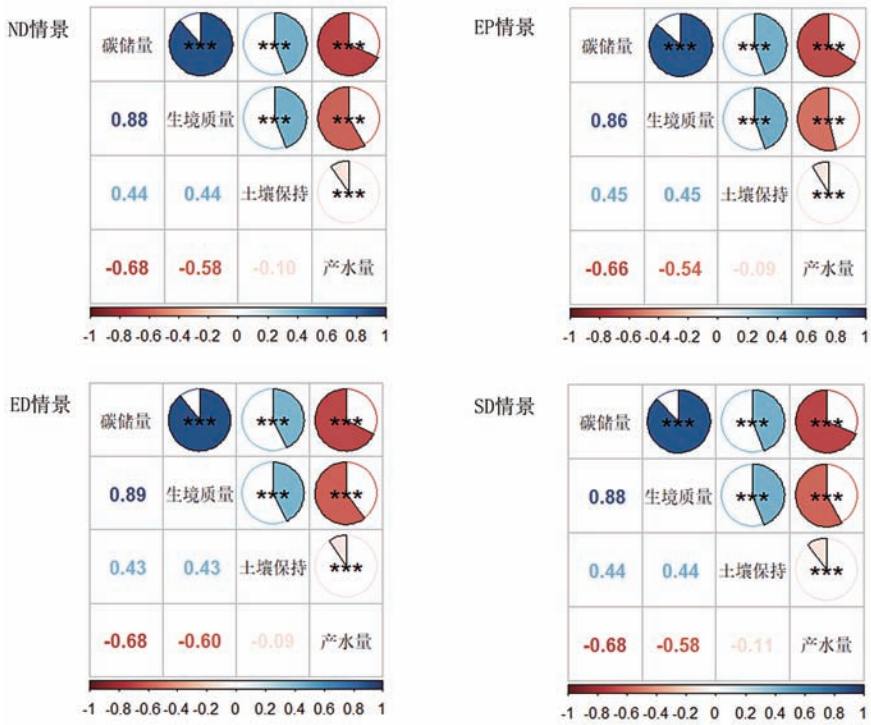


图 7 2030 年不同情景下昆明市生态系统服务权衡/协同分析

4 讨论

研究通过不同情景模拟揭示了城市化进程中土地利用与生态服务之间的复杂关系。结果表明，城市化导致耕地、林地和草地转变为建设用地，进而引发碳储量、土壤保持能力和生境质量的下降，支持了已有研究中关于城市扩张与生态服务供需矛盾加剧的结论[4,9,14]。研究强调，在未来土地利用规划中需在生态保护与经济发展之间寻求平衡，实现土地利用与生态服务的协调发展。

进一步分析研究区生态系统不同服务的关系：碳储量、土壤保持和生境质量之间存在显著协同关系，且相关系数在 20 年内保持稳定，在不同情景模拟中趋于一致，这一结果与秦瑶等[32]在贵州撒拉溪示范区的研究相符。同时，产水量与碳储量、生境质量之间表现出权衡关系，这一发现与苗培培等[33]对云南广南县的研究以及李子辉等[34]对云南省的研究结果近似。因此，昆明未来的土地利用规划应充分考虑生态服务间的相互作用，同步提升碳储量和生境质量的同时，需权衡对产水量的负面影响。

研究还发现，生态系统服务的空间分布存在区域差异。在昆明地区，产水量与土壤保持之间的相关性较弱，这与苗培培等[33]对云南广南县的研究结论有所不同，推测这一差异可能与区域自然资源禀赋及社会经济条件有关[35]。同时，研究显示，昆明市林地比例较高的区域通常表现出较好的碳存储与生境质量，支持了王启名等[36]和刘小波等[37]的研究结论，表明林地在生态系统服务中具有关键作用。因此，未来土地利用规划应在不同区域采取差异化策略，特别是建设用地扩张集中的区域，需适度增加绿地和水体布局，以缓解生态系统服务退化。

尽管本研究揭示了土地利用与生态服务的关系，但仍存在许多局限性。首先，历史数据时间跨度较长，可能影响预测精度；其次，气候变化和生物多样性等因素未得到充分考虑，模型的适应性仍需提高。此外，本研究未纳入永久基本农田等信息，限制了政策分析的适用性和全面性。未来研究应增强数据时效性与精度，扩展研究范

围并纳入更多城市情景分析，同时深入探讨气候变化和生物多样性等因素对土地利用与生态服务的影响，为城市可持续发展提供更为全面的理论支持与实践依据。

5　结论

1）2000—2020 年，随着城市化进程的加速，昆明市土地利用变化显著，建设用地快速扩张，耕地和草地面积减少，水域和未利用地面积增加。在未来土地利用规划中需在生态保护与经济发展之间寻求平衡，实现土地利用与生态服务的协调发展。

2）昆明市生态系统服务总体呈下降趋势，尤其是水资源供给和碳储量，受土地利用变化、气候变化和人类活动共同影响较大。南北地区生态服务差异显著，北部生态服务较优。

3）在 2030 年 4 种模拟情景中，SD 情景有助于实现生态与经济双赢，是优选方案；EP 情景有利于碳储量和生境质量提升，ED 情景可能导致生态退化。

4）建设用地扩张显著影响生态系统服务，增加的建设用地与碳储量、土壤保持和生境质量呈负相关，而林地扩展有助于提升这些服务，促进生态安全和城市可持续发展。

5）碳储量、生境质量和土壤保持之间表现出显著的协同关系，产水量与碳储量及生境质量之间存在权衡关系。未来规划应同步提升碳储量、土壤保持和生境质量，协调建设用地与林地发展，实现生态效益最大化。

参考文献

[1]耿甜伟,陈海,张行,等.基于 GWR 的陕西省生态系统服务价值时空演变特征及影响因素分析[J].自然资源学报,2020,35(7):1714-1727.

[2]孙金龙.深入学习贯彻习近平生态文明思想全面推进人与自然和谐共生的美丽中国建设:在 2024 年全国生态环境保护工作会议上的讲话[J].环境保护,2024,52(3):9-13.

[3]林晋大,多玲花,邹自力.城市扩张背景下景观破碎化动态演变及空间自相关分析:以南昌市为例[J].水土保持研究,2022,29(4):362-369.

[4]王文娟,胡世玉,赵振坤,等.不同土地利用情景下河南省生态系统服务价值时空特征分析[J].地理与地理信息科学,2024,40(5):42-50.

[5]胡波洋,张蓬涛,白宁,等.基于 CLUE-S 和 GMOP 模型的青龙满族自治县土地利用情景模拟[J].中国农业资源与区划,2020,41(7):173-182.

[6]肖睿珂,刘恋,张云路,等.基于 CA-Markov 与 MSPA 模型的城市绿色空间格局时空预测:以北京海淀区为例[J].中国城市林业,2021,19(4):17-22..

[7]李衡,陈国银,王世晶,等.基于 CLUE-S 情景模拟的挠力河流域耕地适宜性评价研究[J].农业机械学报,2023,54(10):329-339.

[8]姚龙杰,岳邦瑞,潘卫涛,等.县域碳储量时空演变与多情景模拟:基于 FLUS 和 InVEST 模型[J].中国城市林业,2023,21(5):152-158..

[9]喇蕗梦,勾蒙蒙,李乐,等.三峡库区生态系统服务权衡时空动态与情景模拟:以秭归县为例[J].生态与农村环境学报,2021,37(11):1368-1377.

[10]钱凤魁,王贺兴,项子璇.基于潜在土地利用冲突识别的主城区周边耕地保护[J].农业工程学报,2021,37(19):267-275.

[11]赵筱青,石小倩,李驭豪,等.滇东南喀斯特山区生态系统服务时空格局及功能分区[J].地理学报,2022,77(3):736-756.

[12]冉璇,李渊,郭宇龙,等.基于 InVEST 模型的钱江源国家公园生态系统服务评估及权衡协同关系研究[J].长江流域资源与环境,2023,32(9):1932-1948.

[13]张扣强,徐梦,贾振立.基于 GIS 和遥感的高原山地城市生态资产定量研究:以云南省昆明市为例[J].生态科学,2023,42(4):124-134.

[14]李志英,杨丽,朱晓珊,等.基于生态系统服务和权衡的综合评估模型的昆明市生态系统服务供需关系研究[J].西部林业科学,2023,52(1):9-18.

[15]谢高地,鲁春霞,冷允法,等.青藏高原生态资产的价值评估[J].自然资源学报,2003,18(2):189-196.

[16]李志英,李媛媛,薛梦柯,等.昆明市景观格局变化及其生态环境效应研究[J].西南林业大学学报(自然科学),2023,43(4):152-163.

[17]许静,刘慧.甘肃省生态系统服务权衡协同关系评估与预测[J].中国环境科学,2024,44(4):1863-1874.

[18]曹帅,金晓斌,杨绪红,等.耦合 MOP 与 GeoSOS-FLUS 模型的县级土地利用结构与布局复合优化[J].自然资源学报,2019,34(6):1171-1185.

[19]王子尧,孟露,李俅,等.低碳发展背景下北京市土地利用与生态系统服务多情景模拟研究[J].生态学报,2023,43(9):3571-3581.

[20]王朝阳,张军以,李海懿,等.重庆市土地利用冲突多尺度时空演化与多情景演化模拟[J].生态学报,2024,44(3):1024-1039.

[21]马瑞,范燕敏,武红旗,等.耦合 GMOP 与 PLUS 模型的干旱区土地利用格局模拟[J].农业资源与环境学报,2023,40(1):143-153.

[22]张潇,谷人旭.土地利用冲突的时空格局刻画与多情景模拟研究:以长江三角洲城市群为例[J].地理研究,2022,41(5):1311-1326.
[23]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.
[24]姜昕彤,翟石艳,王铮,等.基于未来土地利用模拟模型的郑州市"三生空间"模拟及生态环境效应分析[J].生态学报,2023,43(15):6225-6242.
[25]杜佳衡,王锦.基于InVEST模型的大理州永平县水生态系统服务功能时空变化分析[J].西部林业科学,2021,50(6):91-102.
[26]张恩伟.滇中城市群产水服务和土壤保持服务时空格局演变及其影响因素研究[D].昆明:云南师范大学,2021.
[27]帕茹克·吾斯曼江,艾东,方一舒,等.基于InVEST与CA-Markov模型的昆明市碳储量时空演变与预测[J].环境科学,2024,45(1):287-299.
[28]刘宇.基于InVEST模型的喀斯特地区茶园生态系统服务功能评估:以云南省广南县为例[D].昆明:云南大学,2021.
[29]胥丽,国朝胜,罗绍龙.基于PLUS模型和InVEST模型的昆明市生境质量研究[J].三峡生态环境监测,2023,8(1):102-112.
[30]曾欣怡,宋钰红.基于关键物种与生境质量评估的昆明市中心城区绿色空间生物多样性分布格局研究[J].中国园林,2023,39(9):126-132.
[31]彭建,李慧蕾,刘焱序,等.雄安新区生态安全格局识别与优化策略[J].地理学报,2018,73(4):701-710.
[32]秦瑶,熊康宁,陈起伟,等.喀斯特地区生态系统服务变化及权衡协同关系[J].环境科学与技术,2021,44(9):228-236.
[33]苗培培,赵筱青,普军伟,等.喀斯特山区生态系统服务权衡/协同时空分异研究:以云南广南县为例[J].山地学报,2023,41(1):103-114.
[34]李子辉,张亚,巴永,等.云南省植被固碳能力与产水、土壤保持服务冷热点识别[J].中国环境科学,2024,44(2):1007-1019.
[35]戴尔阜,王晓莉,朱建佳,等.生态系统服务权衡:方法、模型与研究框架[J].地理研究,2016,35(6):1005-1016.
[36]王启名,杨昆,李立晓,等.滇池流域水文生态系统服务权衡与协同时空异质性及其归因分析[J].生态学报,2023,43(12):4876-4891.
[37]刘小波,王玉宽,刘勤,等.基于城市化梯度的中国西南地区生态系统服务权衡与协同[J].生态学报,2023,43(22):9416-9429.

(上接第142页)

[14]四川植被协作组.四川植被[M].成都:四川人民出版社,1980.
[15]刘敏.重庆地理[M].北京:北京师范大学出版社,2020.
[16]重庆市林业局.新华网:生物多样性保护|218、800、6000……领略重庆生物多样性之美[EB/OL].(2021-10-14)[2024-07-17].https://lyj.cq.gov.cn/zwxx_237/mtbd/202110/t20211014_9808355.html.
[17]陈灵芝.中国植物区系与植被地理[M].北京:科学出版社,2014.
[18]HOVEKA L N,VAN DER BANK M,DAVIES T J.Winners and losers in a changing climate:how will protected areas conserve red list species under climate change? [J].Diversity and Distributions,2022,28(4):782-792.
[19]中共中央办公厅 国务院办公厅印发《关于在国土空间规划中统筹划定落实三条控制线的指导意见》[EB/OL].(2019-11-01)[2024-07-17].https://www.gov.cn/zhengce/2019-11/01/content_5447654.htm.
[20]中共中央办公厅 国务院办公厅印发《关于建立以国家公园为主体的自然保护地体系的指导意见》[EB/OL].(2019-06-26)[2024-07-17].https://www.gov.cn/gongbao/content/2019/content_5407657.htm.
[21]杨锐,侯姝彧,张引,等.论建立中国自然保护兼用地的必要性和可行性[J].生物多样性,2024,32(4):1-16.
[22]LIU C R,WHITE M,NEWELL G.Selecting thresholds for the prediction of species occurrence with presence-only data[J].Journal of Biogeography,2013,40(4):778-789.
[23]BROWN J L.SDMtoolbox:a Python-based GIS toolkit for landscape genetic,biogeographic and species distribution model analyses[J].Methods in Ecology and Evolution,2014,5(7):694-700.
[24]靳彤,卜君玉,马建忠.其他有效的区域保护措施的国际经验及对中国2020年后生物多样性保护的启示[J].西部林业科学,2022,51(1):1-8.
[25]吕植.中国生物多样性保护与"3030目标"[J].人民论坛·学术前沿,2022(4):24-34.
[26]周海涛,那晓东,臧淑英,等.最大熵(Maxent)模型在物种栖息地研究中的应用[J].环境科学与管理,2016,41(3):149-151.
[27]汪殿蓓,暨淑仪,陈飞鹏.植物群落物种多样性研究综述[J].生态学杂志,2001,20(4):55-60.
[28]王荷生,张镱锂.中国种子植物特有属的生物多样性和特征[J].云南植物研究,1994,16(3):209-220.
[29]生态环境部关于发布《中国生物多样性保护优先区域范围》的公告[EB/OL].(2015-12-31)[2024-07-17].https://www,mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201601/t20160105_321061.htm.
[30]张欢,吴婧,吕信运,等.重庆市分布的重点保护野生植物多样性特征[J].植物资源与环境学报,2024,33(4):81-91.