

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.01.018; CSTR:32311.14.rswc.2025.01.018.

解铭威, 周慧荻, 陈耸, 等. 银川市生态系统服务价值评估及多情景模拟[J]. 水土保持研究, 2025, 32(1): 294-304.

Xie Mingwei, Zhou Huidi, Chen Song, et al. Valuation of ecosystem service value and multi-scenario simulation in Yinchuan city[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(1): 294-304.

# 银川市生态系统服务价值评估及多情景模拟

解铭威, 周慧荻, 陈 耸, 王向荣

(北京林业大学 园林学院, 北京 100083)

**摘 要:** [目的] 土地利用变化影响生态系统服务价值(ESV), 研究多情景下土地利用变化并评估 ESV, 对优化土地管理和维护生态安全具有重要意义。[方法] 设置 4 种情景, 通过多目标规划(MOP)求取不同目标下土地利用结构最优解, 借助 PLUS 模型预测 2030 年土地利用空间分布情况, 采用当量因子法评估 ESV, 并使用空间自相关分析集聚特征、Pearson 相关性探究权衡协同关系。[结果] (1) 2000—2020 年, 银川市土地利用类型以耕地和草地为主, 建设用地扩张 473.1 km<sup>2</sup>, 耕地与草地减少。(2) 自然演变和经济优先情景建设用地增加, 草地减少; 生态优先情景林地、草地增加, 耕地减少 363.9 km<sup>2</sup>; 可持续发展情景耕地几乎不变, 林地、水域增加。(3) ESV 呈下降趋势, 4 种情景总体 ESV 分别为 47.184, 45.404, 53.924, 49.711 亿元, 水文调节和气候调节占主导地位。(4) 11 项 ESV 间存在广泛而显著的协同关系, 食物生产与其他服务的协同性较低。[结论] 可持续发展情景扭转 ESV 的下降趋势并取得较高经济效益, 为规划提供依据, 未来应加强对林地与水域的保护, 有利于提高 ESV。

**关键词:** 土地利用; 生态系统服务; PLUS 模型; 多目标规划; 当量因子

中图分类号: X171.1; X321

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)01-0294-11

## Valuation of ecosystem service value and multi-scenario simulation in Yinchuan city

Xie Mingwei, Zhou Huidi, Chen Song, Wang Xiangrong

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

**Abstract:** [Objective] Land use change affects ecosystem services value (ESV). The aims of this study are to examine land use change, to assess ESV under multiple scenarios, and to optimize land management and maintain ecological security. [Methods] Firstly, four scenarios were set up to find the optimal solution of land use structure under different objectives through multi-objective programming (MOP). And then, the spatial distribution of land use in 2030 was predicted with the help of PLUS model. Moreover, ESV was evaluated by the equivalent factor method. Lastly, spatial autocorrelation was used to analyze the clustering characteristics, while Pearson correlation coefficient was used to explore the synergistic relationship of trade-offs. [Results] (1) From 2000 to 2020, land use types in Yinchuan City were dominated by cropland and grassland, with construction land expanding by 473.1 km<sup>2</sup>, cropland and grassland decreasing. (2) The natural evolution scenario and economic priority scenario increase in construction land and decrease in grassland. The ecological priority scenario increases in forest and grassland, and decreases in cropland by 363.9 km<sup>2</sup>. The sustainable development scenario has almost the same cropland and increases in forest and water area. (3) ESV shows a decreasing trend, and the overall ESV of the four scenarios is 4.718 4 billion yuan, 4.540 4 billion yuan, 5.392 4 billion yuan, and 4.971 1 billion yuan, respectively, with hydrological

收稿日期: 2024-04-02

修回日期: 2024-05-10

资助项目: 国家重点研发计划课题“城市生态空间控制和布局优化技术”(2022YFC3800203)

第一作者: 解铭威(1997—), 男, 内蒙古鄂尔多斯人, 博士研究生, 研究方向: 生态系统服务。E-mail: 2720948576@qq.com

通信作者: 王向荣(1963—), 男, 甘肃兰州人, 博士, 教授, 研究方向: 国土景观。E-mail: wxr@bjfu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

regulation and climate regulation dominating. (4) There are extensive and significant synergistic relationships among the 11 ESV, with low synergies between food production and others. [Conclusion] Sustainable development scenario reversing the downward trend of ESV and achieving high economic benefits can provide a basis for planning. Strengthening the protection of forest and water area is conducive to the improvement of ESV.

**Keywords:** land use; ecosystem services; PLUS model; multi-objective programming; equivalence factor

生态系统服务(Ecosystem services, ESs)指从生态系统中直接或间接取得生命支持产品与服务<sup>[1-2]</sup>,它将社会与自然相关联<sup>[3]</sup>。随着社会的发展人类活动对环境产生巨大压力<sup>[4]</sup>,而土地利用变化影响生态系统供给与分配,从而成为生态系统服务价值(Ecosystem services value, ESV)变化的重要因素<sup>[5]</sup>。研究土地利用变化对 ESV 的影响并预测未来情况,对优化土地管理、维护生态安全具有重要意义。

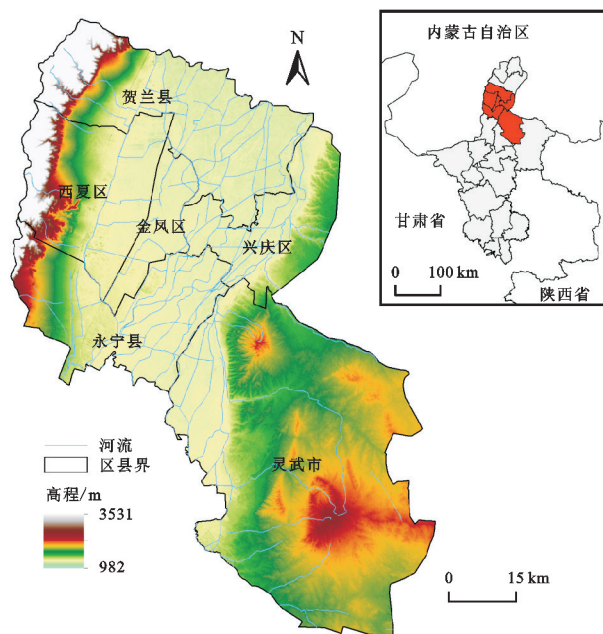
开展多情景模拟研究是优化土地配置的重要途径<sup>[6]</sup>,目前相关模型主要分为结构预测与分布模拟两类<sup>[7]</sup>。结构预测模型有 SD 模型<sup>[8]</sup>、Markov 链<sup>[9]</sup>、MOP 模型等<sup>[10]</sup>,其中多目标规划(MOP)通过建立目标函数并设置约束条件,求得该目标下土地利用需求最优解。由于土地利用变化存在复杂非线性关系,因此与灰色预测模型 GM(1,1)联用能较准确地获取未来目标参数,以提高精度<sup>[7,10]</sup>。分布模拟模型包括 FLUS 模型<sup>[11]</sup>、CA 模型<sup>[12]</sup>、CLUE-S 模型等<sup>[13]</sup>,由 Liang 等<sup>[14]</sup>开发的 PLUS 模型保留 FLUS 模型轮盘竞争优势,能更好地预测斑块级土地利用变化。当量因子法是 ESV 评估的常用方法,最早由 Costanza 等<sup>[15]</sup>提出,学者谢高地等<sup>[16]</sup>提出适用于我国的当量表并进行了优化<sup>[17]</sup>。目前对过去一定时段内 ESV 的评价较多,缺乏对未来的预测分析,多情景模拟有利于把握未来变化方向,为政策的制定提供依据,而 PLUS 模型能有效实现这一目标。此外,相关性分析可以了解 ESV 空间分布特征及指标间的权衡协同关系。

银川市位于西北干旱—半干旱过渡带,是黄河上游重要的生态源地,如今承担黄河流域生态保护和高质量发展先行区的使命,其生态环境关乎西北与黄河中下游的可持续发展<sup>[18-19]</sup>。在临近地区吴忠市目前已开展 ESV 评价,但尺度较小主要关注盐池县<sup>[20]</sup>与红寺堡区<sup>[21]</sup>近 20 年的情况。基于此,研究首先使用 MOP 模型获取不同情景土地利用需求最优解,进而借助 PLUS 模型预测空间分布情况,之后开展 ESV 评价并分析空间集聚特征与权衡协同关系。本文旨在探究银川土地利用过去与未来怎样变化?不同情景下 ESV 如何?各服务功能间存在怎样的权衡协同关系?以期银川市土地管理与可持续发展提供依据。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

银川市(37°29'—38°52'N, 105°48'—106°52'E)位于宁夏平原中部,至 2022 年末,常住人口 289.68 万人, GDP 2 535.63 亿元(图 1)。地形以山脉和平原为主,西侧有贺兰山脉,中部为平原,黄河自南向北流过。属温带大陆性气候,春迟夏短,秋早冬长;降水少,蒸发量大。年平均气温 10.9℃,降水量 164.2 mm,平均日照时数 2 758.1 h<sup>[22]</sup>。境内湖泊湿地较多,动植物资源丰富,但也面临荒漠化、水土流失加剧等环境问题,近年来在生态修复方面取得了一定成效<sup>[1,19]</sup>。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2023)2763 号的标准地图绘制,底图未作修改,下图同。

图 1 研究范围银川市

Fig. 1 Research scope: Yinchuan City

### 1.2 数据来源

本文使用的土地利用数据源自 GlobeLand 30 (www.globallandcover.com),分辨率 30 m。高程(DEM)数据源自地理空间数据云(www.gscloud.cn)ASTER GDEM 30 M 数据集。气温、降水、土壤、蒸发量等数据源自中国科学院资源环境科学与数据中心(www.resdc.cn),分辨率 1 km。行政区划、道路、水域等数据源自全国地理信息资源目录服务系统(www.web-map.cn)。社会经济数据源自《银川统计年鉴 2022》

与统计公报。以上数据利用 ArcGIS 10.6 投影变换、重分类等,统一为 WGS\_1984\_UTM\_Zone\_48 N, 90×90 m 栅格数据。

## 2 研究方法

使用 PLUS 模型设置 4 种情景模拟银川市 2030

年土地利用情况,通常各情景中土地利用需求依据规划或经验设定,本文结合 MOP 模型求得有约束条件下经济与生态情景的最优解,代入 PLUS 模型得到土地利用空间分布预测,之后采用当量因子法评估各情景 ESV,最后使用空间自相关与皮尔逊相关性分析 ESV 空间集聚特征与权衡协同关系(图 2)。

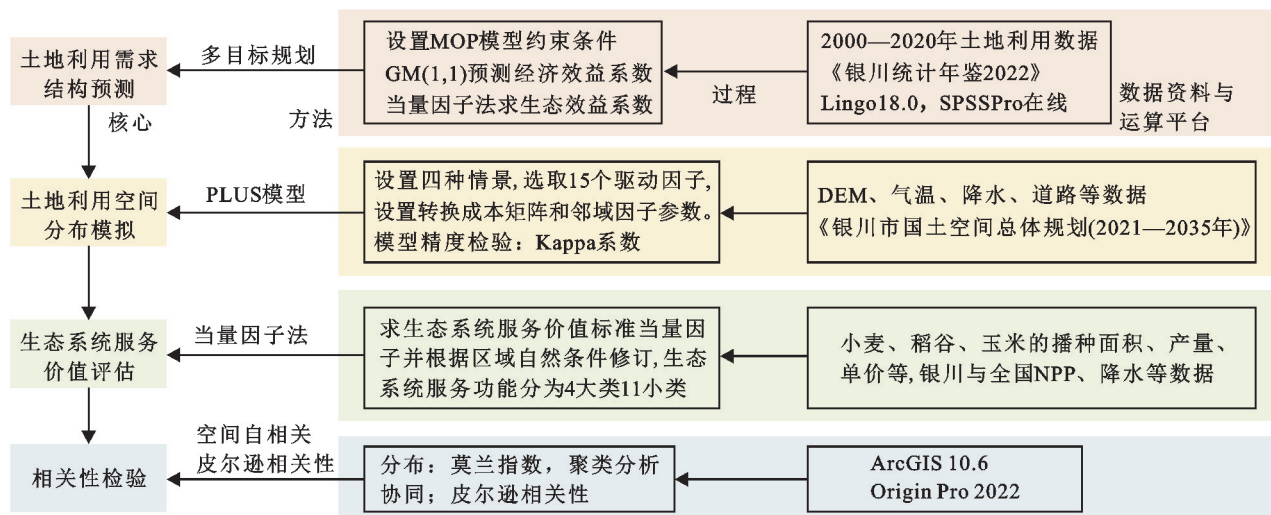


图 2 研究框架

Fig. 2 Research framework

### 2.1 多目标规划下土地利用结构预测

2.1.1 多目标函数构建 多目标规划(MOP)常用于优化土地利用结构,能得到多个约束条件下目标达到最值时的决策<sup>[7]</sup>。

经济效益目标函数公式为:

$$f_1(x) = \sum_{i=1}^n Ec_i \times x_i \quad (1)$$

式中:  $f_1(x)$  为总经济效益;  $x_i$  为各地类的面积;  $Ec_i$  为单位面积地类  $i$  的经济效益。

参照前人研究<sup>[3,23]</sup>,耕地、林地、草地、水域的经济效益由农、林、牧、渔产值估算,建设用地经济效益由二、三产业 GDP 估算。根据《银川统计年鉴 2022》2013—2021 年数据计算各地类产值与面积的比,再使用 GM(1,1) 预测 2030 年经济效益系数,可得函数表达式(单位:  $10^6$  元/ $\text{km}^2$ ):

$$f_1(x) = 4.364x_1 + 2.564x_2 + 3.806x_3 + 11.538x_4 + 678.906x_5 + 0x_6 \quad (2)$$

生态效益目标函数公式为:

$$f_2(x) = \sum_{i=1}^n Esv_i \times x_i \quad (3)$$

式中:  $f_2(x)$  为总生态效益;  $x_i$  为各地类的面积;  $Esv_i$  为单位面积地类  $i$  的生态效益。

采用当量因子法(详见下文 2.3),可得函数表达式(单位:  $10^6$  元/ $\text{km}^2$ ):

$$f_2(x) = 0.339x_1 + 2.046x_2 + 1.014x_3 + 5.116x_4 + 0x_5 + 0.098x_6 \quad (4)$$

2.1.2 约束条件设定 本文借助 Markov 链预测自然

演变情况下银川市 2030 年各土地利用类型的面积,结合过去变化规律与 2020 年实际情况,设置多目标规划的约束条件(表 1)。使用 Lingo 18.0 求解目标函数。

### 2.2 土地利用空间分布多情景模拟

PLUS 模型使用随机森林算法与元胞自动机(CA)模型,在斑块级土地利用变化预测中精度高于常用的其他模型<sup>[14]</sup>。其通过提取地类扩张区域,挖掘造成扩张的驱动因子,计算各因子对地类扩张的贡献度,进而估算各地类的发展概率,以精确模拟未来土地利用类型的空间分布情况<sup>[7,11]</sup>。本文参照前人研究与银川实际情况,从自然与社会两方面选取 15 个驱动因子(图 3)。

研究设置 4 个情景:自然演变情景(A)根据 2010—2020 年 Markov 链预测 2030 年土地利用情况。经济优先情景(B)追求经济效益最大化,即  $\max\{f_1(x)\}$ 。生态优先情景(C)取得生态效益最大化,即  $\max\{f_2(x)\}$ 。可持续发展情景(D)谋求经济与生态协调,依据《银川市国土空间总体规划(2021—2035 年)》在预测基础上水域面积上调 8%,林地上调 20%,建设用地下调 20%。

转换成本矩阵表示地类转化难易度<sup>[24]</sup>,参考已有研究<sup>[25-26]</sup>设置转换成本矩阵(表 2)。邻域权重表示地类扩张能力<sup>[27]</sup>,根据历史规律设定一般精度高于经验设定<sup>[3]</sup>,本文计算 2000—2020 年银川市土地利用转移概率并结合情景适当调整(表 3)。依据 2000 年、2010 年土地利用数据预测 2020 年并与真实值对照,若  $Kappa \geq 0.7$ ,则说明精度较高。



表 1 MOP 模型约束条件  
Table 1 Constraints of the MOP model

序号	约束类型	约束条件(km <sup>2</sup> )	说明
1	土地总面积约束	$x_1+x_2+x_3+x_4+x_5+x_6=6883.155$	各土地利用类型总面积规划前后保持不变
2	耕地面积约束	$x_1\geq 2295.832$	耕地面积过去 10 a 呈下降趋势,以 Markov 链预测值的 90%为下限
3	林地面积约束	$69.778\leq x_2\leq 108.945$	以 Markov 链预测值的 95%为下限,假设 2030 年相比 2020 年最多增长 50%,以此为上限
4	草地面积约束	$2499.384\leq x_3\leq 3647.835$	草地面积过去 10 a 呈下降趋势,以 Markov 链预测值的 90%为下限,假设 2030 年相比 2020 年最多增长 20%,以此为上限
5	水域面积约束	$154.418\leq x_4\leq 184.981$	水域面积过去 10 a 有所增加,以 2020 年为下限,以 Markov 链预测值的 110%为上限
6	建设用地面积约束	$678.645\leq x_5\leq 1253.861$	以 2020 年为下限,以 Markov 链预测值的 120%为上限
7	未利用地面积约束	$241.774\leq x_6\leq 305.638$	未利用地面积过去 10 a 略有减少,以 Markov 链预测值的 90%为下限,以 2020 年的 110%为上限
8	决策量非负约束	$x_i\geq 0, i=1,2,3,4,5,6$	各约束变量为非负值

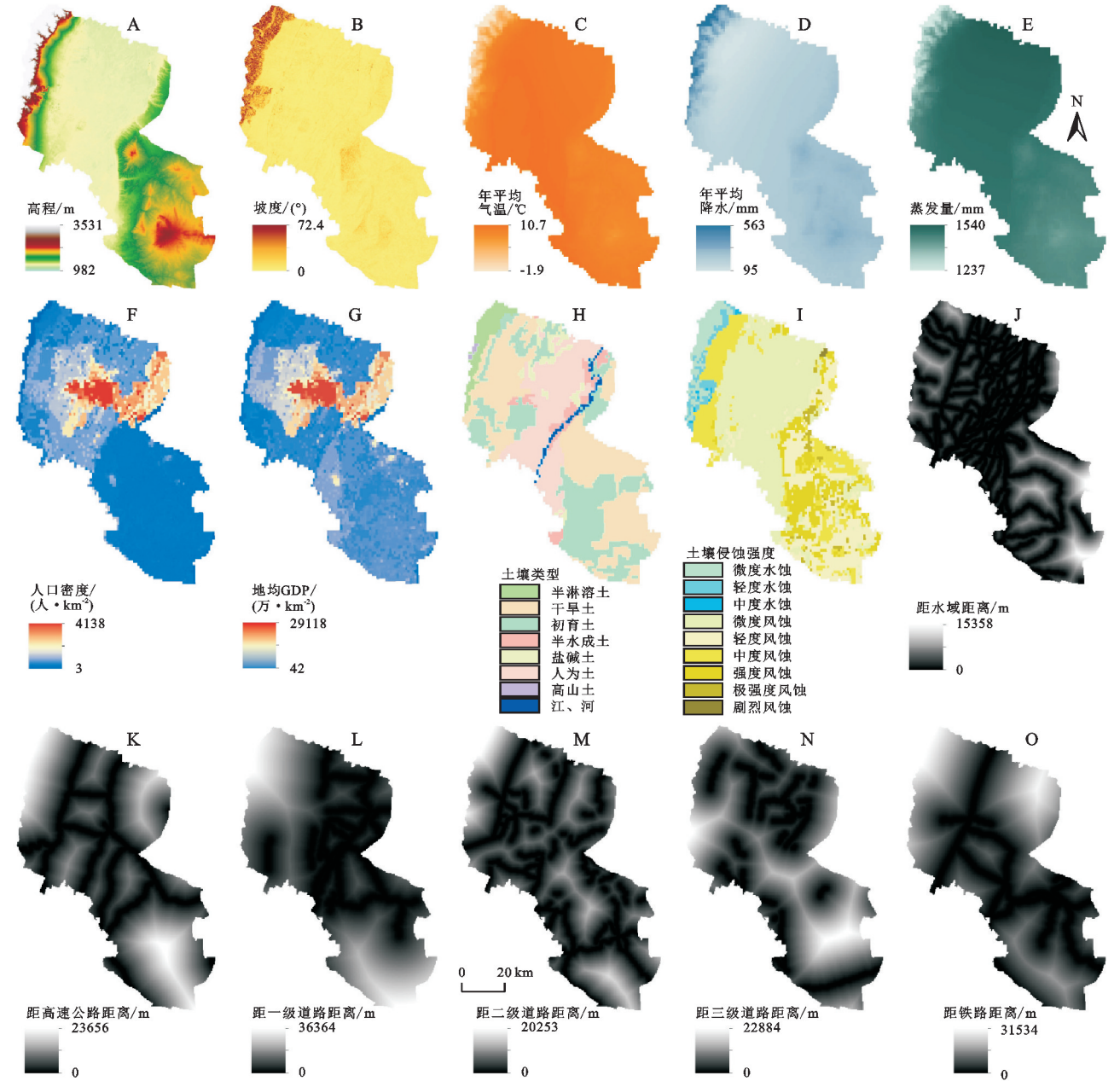


图 3 土地利用变化驱动因子  
Fig. 3 Driving factors of land use change

表 2 转换成本矩阵

Table 2 Conversion cost matrix

类型	自然演变情景(A)						经济优先情景(B)						生态优先情景(C)						可持续发展情景(D)					
	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f
耕地	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
林地	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
草地	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0
水域	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0
建设用地	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1
未利用地	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:a,b,c,d,e,f 依次为耕地,林地,草地,水域,建设用地,未利用地。

表 3 邻域权重

Table 3 Neighborhood weight

情景	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
自然演变情景(A)	0.253	0.011	0.077	0.097	0.500	0.062
经济优先情景(B)	0.182	0.008	0.055	0.070	0.640	0.045
生态优先情景(C)	0.195	0.037	0.259	0.075	0.386	0.048
可持续发展情景(D)	0.231	0.021	0.147	0.088	0.456	0.057

2.3 生态系统服务价值评估

参照 Costanza<sup>[15]</sup> 提出的 ESV 评估模型与谢高地等<sup>[17]</sup>研究适用于我国的当量表,计算公式<sup>[4,7]</sup>如下:

$$ESV = \sum_{i=1}^n (A_i \times E_i) \tag{5}$$

$$E = \frac{1}{7} \sum_{j=1}^m \frac{Q_j \times p_j}{C_{total}} \tag{6}$$

式中:ESV 为生态系统服务价值;A<sub>i</sub> 为地类 i 的面积;E<sub>i</sub> 为单位面积地类 i 的 ESV。E 为标准当量,即银川市 1 单位农田粮食产出价值的 1/7;j 为作物类型;Q<sub>j</sub> 为粮食 j 的产量;p<sub>j</sub> 为粮食 j 的单价;C<sub>total</sub> 为各类粮食作物总播种面积。

根据《银川统计年鉴 2022》可知 3 种主要作物小麦、稻谷、玉米的产量与播种面积,按多年平均单价 1.793 元/kg,2.049 元/kg,1.622 元/kg 计算,可得银川市 1 标准当量生态系统服务价值约为 2 174.76 元/(hm<sup>2</sup> · a)。参照相关研究<sup>[17,19]</sup> 将 ESV 分为 4 大类 11 小类,为适应地域特征,使用植物净初级生产力(NPP)与年均降水量(PRE)修正<sup>[4,18]</sup>(式 7,式 8),最终得到银川市生态系统服务价值系数表(表 4)。

$$\lambda_1 = \sqrt{\frac{PRE}{PRE_0}} \tag{7}$$

$$\lambda_2 = \sqrt{\frac{NPP}{NPP_0}} \tag{8}$$

式中:λ<sub>1</sub> 为水资源供给与水文调节的修正系数;λ<sub>2</sub> 为其他各类的修正系数;下标有 0 的为全国值,无标记为银川值。

2.4 空间集聚特征与权衡协同效应分析

分析 ESV 空间集聚及指标间关联有利于深入研

究区域生态安全格局<sup>[1,28]</sup>。本文使用 ArcGIS 10.6 分析 ESV 空间自相关。借助 Origin Pro 2022 平台使用皮尔逊相关性分析 ESV 间权衡协同关系,其公式<sup>[28-30]</sup>如下:

$$p_{xy} = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \sqrt{n \sum_{i=1}^n y_i^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2}} \tag{9}$$

式中:p<sub>xy</sub> 是 x 和 y 的相关性;n 是数据个数。p<sub>xy</sub> 值域 [-1,1],p<sub>xy</sub> = 0,则不相关;p<sub>xy</sub> > 0,则呈协同关系;p<sub>xy</sub> < 0,则呈权衡关系。p<sub>xy</sub> 绝对值越大,相关性越强。

3 结果与分析

3.1 土地利用演变与模拟

3.1.1 银川市土地利用特征及变化 银川市土地利用类型以耕地和草地为主(表 5)。2000—2020 年建设用地扩张明显,增加了 473.1 km<sup>2</sup>,耕地和草地面积分别减少 191.4 km<sup>2</sup>,290.3 km<sup>2</sup>。有大量耕地向建设用地转移,转移量为 316.0 km<sup>2</sup>;也有较多草地向建设用地和耕地转移,转移量分别为 156.1 km<sup>2</sup>,138.8 km<sup>2</sup>。说明建设用地扩张占用耕地通过开垦草地来弥补。随着生态建设推进,水域面积有一定增加且与耕地间存在相互转化关系。在空间分布上,中部以耕地为主,草地分布在东西部高地(图 4)。2010—2020 年中心城区建设用地明显扩张,东部从无到有迅速发展,这与宁东能源化工基地的建立有关,它是煤炭、电力、化工示范区。总体上,城镇化进程不断推进,建设用地扩张,耕地和草地减少,水域面积有所增加。

3.1.2 银川市 2030 年土地利用多情景模拟 试验 Kappa 系数 0.787,总体精度 0.868,说明 PLUS 模拟精度较高(图 5)。自然演变情景(A)延续 2010—2020 年土地利用变化趋势,建设用地增加 366.2 km<sup>2</sup>,分布于中心城区周边与南部草地区,耕地和草地分别减少 108.8 km<sup>2</sup>,262.8 km<sup>2</sup>。经济优先情景(B)建设用地显著扩张,增量为 575.2 km<sup>2</sup>,增幅达 84.8%,主要分布在灵武市东部。草地明显萎缩,减少 540.5 km<sup>2</sup>,耕地略微减少。生态优先情景(C)建

设用地基本不变,草地明显增加,增量为 333.1 km<sup>2</sup>。林地增加 36.3 km<sup>2</sup>,增幅达 33.3%。但耕地减少 363.9 km<sup>2</sup>,变化十分明显。中心城区周边部分耕地转化为草地,平原北部水域面积有一定提升。可持续发展情景(D)建设用地有一定扩张,增量为 157.3 km<sup>2</sup>。耕地面积几乎不变,草地减少 145.5 km<sup>2</sup>。林地和水域面积均有提升,增量为 20.5 km<sup>2</sup>,27.2 km<sup>2</sup>。建设用地扩张主要位于东南部,北部和东南部水域面积增加。

表 4 银川市生态系统服务价值系数

Table 4 Coefficient table of ecosystem service value in Yinchuan City											
地类	供给服务			调节服务				支持服务			文化服务
	食物生产	原料生产	水资源供给	气体调节	气候调节	净化环境	水文调节	土壤保持	维持养分循环	生物多样性	美学景观
耕地	698.8	328.8	22.7	550.8	295.9	82.2	306.5	846.7	98.6	106.9	49.3
林地	238.4	542.6	386.0	1783.9	5343.4	1586.6	5381.0	2178.5	164.4	1981.2	871.4
草地	180.9	271.3	204.3	937.1	2482.6	822.1	2508.8	1142.7	90.4	1044.0	460.4
水域	419.3	411.0	2940.2	1561.9	2959.4	2959.4	27506.5	1899.0	148.0	6469.6	3888.3
未利用地	8.2	24.7	22.7	90.4	82.2	254.8	238.4	106.9	8.2	98.6	41.1

表 5 银川市 2000—2020 年土地利用转移矩阵

Table 5 Land use transfer matrix of Yinchuan City from 2000 to 2020								
土地利用类型		2020 年						
		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	合计
2000 年	耕地	2403.6	0.0	48.0	80.6	316.0	2.9	2851.1
	林地	0.0	72.4	0.1	0.0	0.0	0.0	72.4
	草地	138.8	0.3	2961.3	16.5	156.1	57.1	3330.1
	水域	68.4	0.0	7.4	56.4	7.3	1.5	140.9
	建设用地	29.5	0.0	3.2	0.4	171.4	1.1	205.5
	未利用地	19.5	0.0	19.9	0.5	27.9	215.3	283.1
	合计	2659.7	72.6	3039.9	154.4	678.6	277.9	6883.2

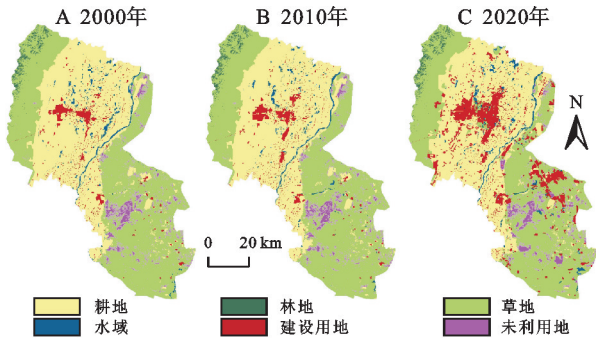


图 4 银川市土地利用空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of land use in Yinchuan City

总体上,经济优先情景建设用地扩张明显,草地萎缩;生态优先情景林地、草地增量可观,但耕地显著减少;可持续发展情景在建设用地适量增加的情况下,保持耕地不受严重侵占,有效减缓草地减少的速率,同时林地和水域面积都有提升。

3.2 生态系统服务价值评估结果

3.2.1 总体 ESV 变化与空间分布 2030 年 4 种情景 ESV 分别为自然演变情景(A)47.184 亿元,相比

2020 年减少 2.320 亿元;经济优先情景(B)45.404 亿元,减少 4.100 亿元;生态优先情景(C)53.924 亿元,增加 4.420 亿元;可持续发展情景(D)49.711 亿元,增加 0.207 亿元(表 6)。使用 ArcGIS 10.6 创建渔网工具建立 900×900 m 的评价单元,经区域制表等操作,得到 ESV 空间分布情况(图 6)。中心城区及平原耕地区 ESV 较低,西北与东南部较高。经济优先情景(B)灵武市 ESV 低价值区域明显增加,生态优先情景(C)和可持续发展情景(D)南部 ESV 中等及以上区域面积较大,中心城区周边有一定改善。

3.2.2 单项 ESV 特征与变化情况 水文调节与气候调节占主导地位(表 7)。2000—2020 年各单项 ESV 均呈下降趋势,后 10 a 更明显。自然演变情景(A)各单项价值均有下降,其中气候调节和土壤保持下降最明显,分别降低 0.640,0.365 亿元。经济优先情景(B)各单项价值降低明显,与自然演变相比调节服务与支持服务的下降突出。生态优先情景(C)食物生产功能 ESV 下降了 0.173 亿元,其余项均有提



升,特别是气候调节与水文调节分别增加 1.001, 1.753 亿元。可持续发展情景(D)在水文调节、水资源供给、生物多样性和美学景观方面价值都有一定提

升,其余项几乎不变。可见加强对林地、草地的保护, 确保天然水域不受侵占有利于提高 ESV,特别是增强水文调节与气候调节能力。

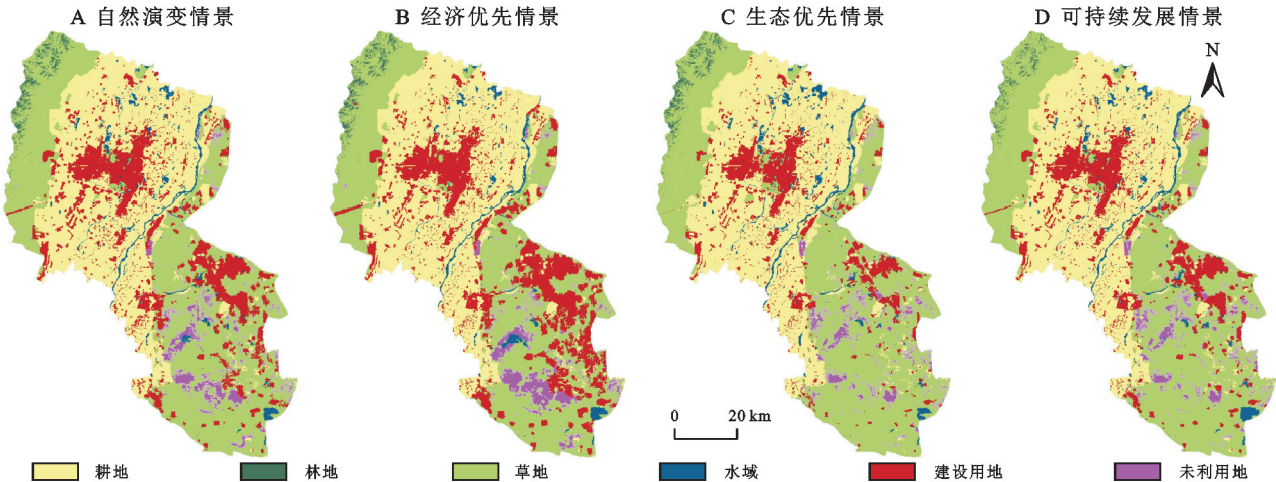


图 5 不同情景下银川市 2030 年土地利用空间分布模拟

Fig. 5 Simulation of land use spatial distribution in Yinchuan City in 2030 under different scenarios

表 6 生态系统服务价值评价结果

Table 6 Evaluation results of ecosystem service value

地类	2000 年	2010 年	2020 年	自然演变 情景(A)	经济优先 情景(B)	生态优先 情景(C)	可持续发展 情景(D)
耕地	9.657	9.597	9.009	8.641	8.920	7.777	8.912
林地	1.481	1.481	1.485	1.504	1.428	2.228	1.905
草地	33.783	33.823	30.839	28.172	25.355	34.219	29.362
水域	7.209	6.641	7.900	8.606	9.465	9.465	9.291
未利用地	0.276	0.276	0.271	0.262	0.236	0.236	0.241
合计	52.406	51.819	49.504	47.184	45.404	53.924	49.711

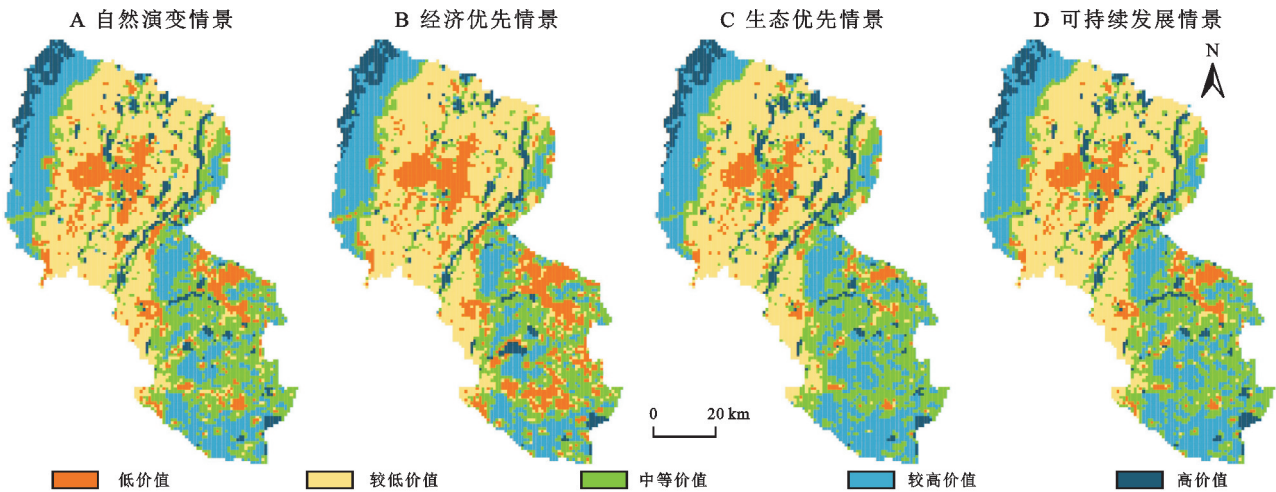


图 6 不同情景下银川市 2030 年生态系统服务价值分布

Fig. 6 Distribution of ecosystem service value in Yinchuan City in 2030 under different scenarios

3.3 空间集聚与协同效应分析

3.3.1 ESV 空间集聚特征 为进一步研究 ESV 的空间集聚,使用 ArcGIS 10.6 空间自相关工具与聚类与异常值分析工具计算全局和局部空间自相关(图 7)。Moran's I 分别为 0.619,0.676,0.616,0.624。高一高聚类主要分布在贺兰山区与河漫滩,低—低聚类分

布在中部平原,各情景有差异。

经济优先情景(B)低—低聚类主要位于中心城区与南部工业基地,相比其他情景较少是由于南部草地区ESV 较低使中部耕地区低—低聚类不显著,由此可见生态优先及可持续发展对南部草地 ESV 提升明显。

表 7 多情景模拟下各生态服务类型 ESV  
Table 7 ESV of various ecological service types under multi scenario simulation

一级类	二级类	2000 年	2010 年	2020 年	自然演变 情景(A)	经济优先 情景(B)	生态优先 情景(C)	可持续发展 情景(D)
供给服务	食物生产	2.673	2.657	2.493	2.375	2.388	2.320	2.462
	原料生产	1.945	1.936	1.809	1.708	1.664	1.811	1.782
	水资源供给	1.194	1.162	1.170	1.154	1.147	1.333	1.227
调节服务	气体调节	5.066	5.043	4.710	4.426	4.228	4.931	4.634
	气候调节	9.938	9.910	9.202	8.562	7.925	10.203	9.019
	净化环境	3.576	3.545	3.361	3.175	2.991	3.743	3.344
	水文调节	13.561	13.261	13.146	12.835	12.600	14.899	13.623
支持服务	土壤保持	6.675	6.643	6.207	5.841	5.615	6.413	6.109
	维持养分循环	0.617	0.614	0.574	0.542	0.527	0.579	0.565
	生物多样性	4.864	4.795	4.628	4.432	4.250	5.203	4.687
文化服务	美学景观	2.296	2.254	2.206	2.133	2.071	2.490	2.260
合计		52.406	51.819	49.504	47.184	45.404	53.924	49.711

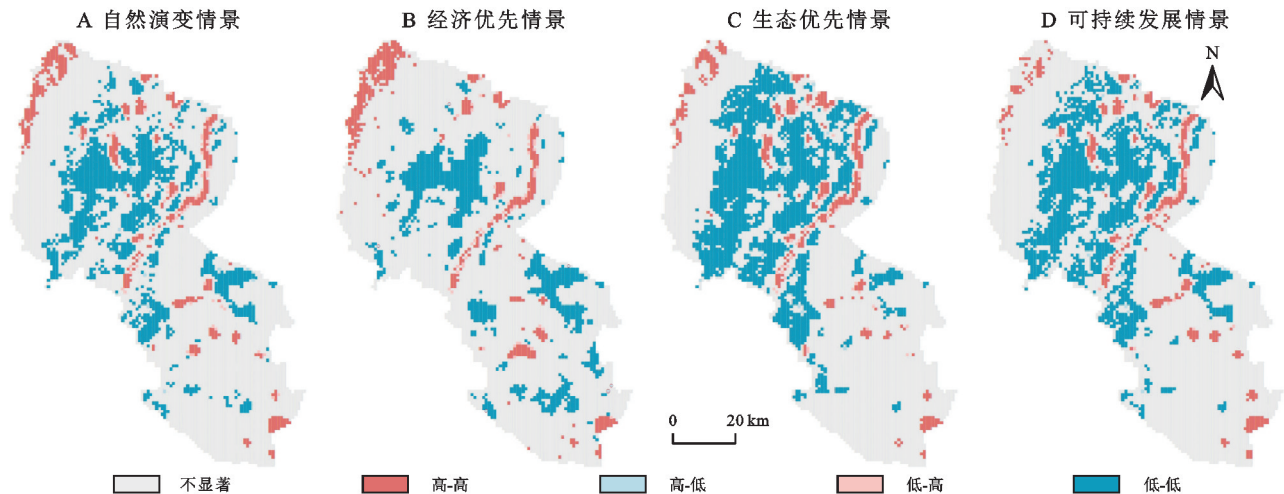


图 7 生态系统服务价值聚类  
Fig. 7 Cluster of ecosystem service values

3.3.2 ESV 权衡协同效应 银川各生态系统服务价值间主要呈协同关系(图 8),多项服务在 0.001 水平显著相关,各情景差异不显著。最强协同关系存在于 RP-MC, WS-HR, HR-AL, BC-AL, PE-BC 等也存在强协同关系。协同关系弱的主要有 FP-CR 和 FP-PE,此外 FP-BC, FP-WS, FP-HR 协同关系也较弱,可见食物生产虽然未与其他服务间有明显冲突,但协同性较差。此外,RP 和 MC 与其他服务间的协同也相对较弱。

4 讨论

土地利用变化影响生态系统供给与分配,从而影响ESV<sup>[3,5]</sup>。银川建设用地侵占农田,通过开垦草地弥补耕地的缺失是土地利用变化矛盾的焦点。分区治理是解决问题的重要途径<sup>[1]</sup>,西北贺兰山林区应注重封育与造林结合,大型项目严格限制范围并进行生态补偿;中

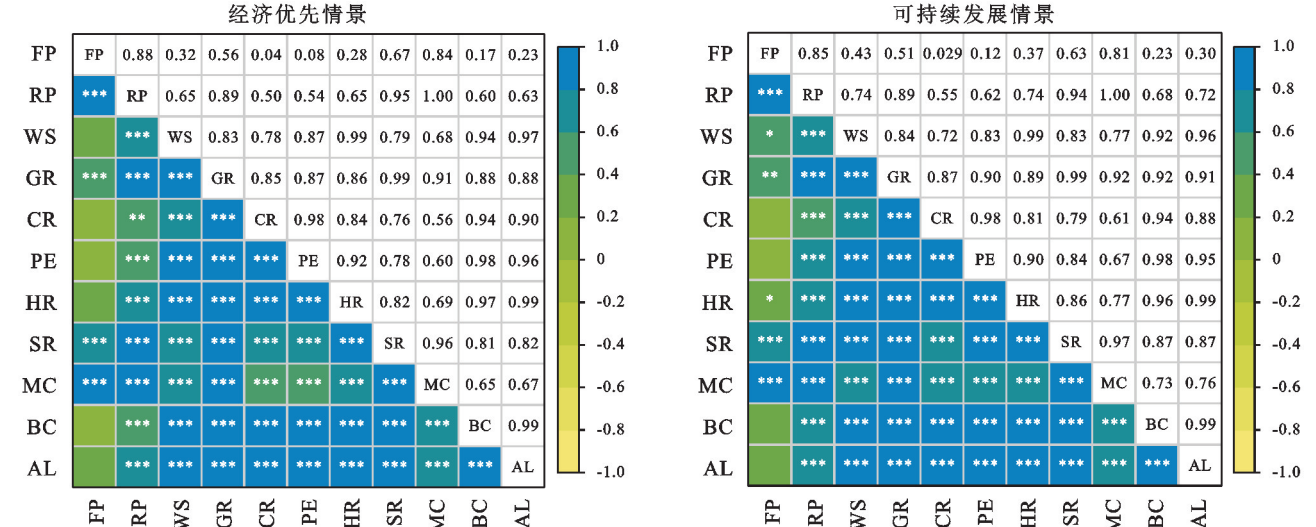
部灌区应发展高效农业,加强黄河滩区治理;东南荒漠草原区应巩固治沙成果,分区轮牧、合理配置水资源。模拟显示,经济优先情景建设用地将明显扩张,草地减少,生态优先情景虽控制了林草地萎缩但耕地显著减少。随着经济发展建设用势必会略微扩张,采取可持续发展策略,在保证耕地不受严重侵占下适当增加林地和水域面积可能是未来发展的首选。

自然演变情景(A)与经济优先情景(B)ESV 均降低,生态优先情景(C)ESV 增加却需付出高额经济代价(经济效益 A:7 332.2 亿元,C:4 859.8 亿元),可持续发展情景(D)实现扭转 ESV 下降趋势的同时仍能收获 5 923.3 亿元的经济效益。银川 ESV 呈下降趋势,在其他研究中新疆<sup>[3]</sup>、汉中<sup>[4]</sup>上升,北京<sup>[5]</sup>下降。近年来,银川采取了众多生态措施,如贺兰山麓生态修复、“蓝天保卫战”“净土保卫战”、划定耕地红线等<sup>[19]</sup>,取得了良好成效但总 ESV 仍在下降,这与



地域特征有关。建设用地扩张造成草地、耕地减少,其他地区往往可以通过增加林地、拓展水域来弥补ESV(新疆是开发未利用地),银川林地面积小,植树造林需要考虑西北干旱区水资源匮乏、蒸发量大的问

题,所以未来应深入研究植树的可行性与实施途径。当然银川特质也使ESV间广泛存在协同关系,处理好食物生产与其他服务功能的关系,采取提升ESV的生态措施往往能“一劳多得”。



注:FP 食物生产,RP 原料生产,WS 水资源供给,GR 气体调节,CR 气候调节,PE 净化环境,HR 水文调节,SR 水土保持,MC 维持养分循环,BC 生物多样性,AL 美学景观;\*表示 $p\leq 0.05$ ,\*\*表示 $p\leq 0.01$ ,\*\*\*表示 $p\leq 0.001$ 。

图 8 生态系统服务价值权衡协同关系

Fig. 8 Ecosystem service value balancing and synergistic relationships

本文的创新性在于耦合 MOP-PLUS 模型获取不同目标下土地利用结构最优解,模拟 4 种情景 2030 年土地利用空间分布,进而评估银川生态系统服务价值,并研究其空间集聚特征与权衡协同关系,能为研究区土地管理与生态保护提供参考。局限性在于试验中 MOP 约束条件设置存在主观性,但相比以往研究凭经验调整 Markov 链预测的土地利用需求设置 PLUS 情景,有不小提升;目标函数中各土地利用类型的经济效益根据农、林、牧、渔业产值、第二三产业 GDP 估算,目前在市域尺度以分析年际相对变化为主,能满足研究需要,未来可考虑增加社会商品零售额、固定资产投资额、地均财政收入等其他指标,建立综合指标体系,并考虑地貌、区位、政策、旅游等其他因素的影响;ESV 计算中当量因子和系数表均经过银川粮食、气象等数据修正,但结果仍可能与真实值存在差距;目前主要根据土地利用情况评价 ESV,而其影响因素还有气候变化、自然基底、人类活动等<sup>[3]</sup>,之后可考虑补充。

5 结论

(1) 2000—2020 年银川市土地利用类型以耕地和草地为主,建设用地扩张 473.1 km<sup>2</sup>,耕地、林地减少,水域增加。建设用地侵占耕地通过开垦草地来弥补是土地利用变化的主要矛盾。

(2) 自然演变情景(A)建设用地增加,耕地、草地减少。经济优先情景(B)建设用地增加 575.2 km<sup>2</sup>,扩张区主要位于东南部,草地明显减少。生态优先情景(C)林地、草地增加,但耕地减少 363.9 km<sup>2</sup>。可持续发展情景(D)建设用地增加 157.3 km<sup>2</sup>,耕地几乎不变,林地、水域面积均有提升。

(3) 4 种情景 ESV:(C) 53.924 亿元>(D) 49.711 亿元>(A) 47.184 亿元>(B) 45.404 亿元。单项 ESV 水文调节和气候调节占主导地位。可持续发展情景(D)在 ESV 略微提升的情况下取得较高经济效益。

(4) 银川 11 项生态系统服务价值间主要呈协同关系,情景差异不明显。食物生产与其他服务间协同性相对较低。

参考文献 (References):

[1] 张春悦,白永平,杨雪获,等.多情景模拟下宁夏平原生态系统服务簇识别研究[J].地理研究,2022,41(12): 3364-3382.  
Zhang C Y, Bai Y P, Yang X D, et al. Identification of ecosystem service bundles in Ningxia Plain under multi-scenario simulation[J]. Geographical Research, 2022,41 (12):3364-3382.

[2] Jiang W, Wu T, Fu B J. The value of ecosystem services in China: a systematic review for twenty years[J]. Ecosystem Services, 2021,52:101365.

[3] 曲艺,丁建丽,包青岭,等.多情景模拟下的新疆生态系统服

- 务价值评估[J].环境科学与技术,2023,46(4):195-204.
- Qu Y, Ding J L, Bao Q L, et al. Valuation of ecosystem service value with multi-scenario simulation in Xinjiang[J]. Environmental Science & Technology, 2023, 46(4): 195-204.
- [4] 杨朔,苏昊,赵国平.基于 PLUS 模型的城市生态系统服务价值多情景模拟:以汉中市为例[J].干旱区资源与环境,2022,36(10):86-95.
- Yang S, Su H, Zhao G P. Multi-scenario simulation of urban ecosystem service value based on PLUS model: a case study of Hanzhong city[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022,36(10):86-95.
- [5] 牟燕,冯飞.基于土地利用的北京市多情景模拟下生态系统服务价值影响评估[J].北京林业大学学报,2023,45(5):14-24.
- Mou Y, Feng F. Impact assessment of ecological service value under multi scenario simulation in Beijing based on land use [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023,45(5):14-24.
- [6] 袁雪松,周俊,胡蓓蓓,等.基于 FLUS 模型粤港澳大湾区“三生空间”多情景模拟预测[J].地理科学,2023,43(3):564-574.
- Yuan X S, Zhou J, Hu B B, et al. Multi-scenario simulation and prediction of ecological-productive-living spaces in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area based on FLUS model[J]. Scientia Geographica Sinica, 2023, 43(3):564-574.
- [7] 王子尧,孟露,李惊,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.
- Wang Z Y, Meng L, Li L, et al. Multi-scenario simulation of land use and ecosystem services in Beijing under the background of low-carbon development [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(9):3571-3581.
- [8] 顾茉莉,叶长盛,李鑫,等.基于 SD 模型的江西省土地利用变化情景模拟[J].地理与地理信息科学,2022,38(4):95-103.
- Gu M L, Ye C S, Li X, et al. Scenario simulation of land use change in Jiangxi Province based on SD model [J]. Geography and Geo-Information Science, 2022, 38(4):95-103.
- [9] 王旭东,姚尧,任书良,等.耦合 FLUS 和 Markov 的快速发展城市土地利用空间格局模拟方法[J].地球信息科学学报,2022,24(1):100-113.
- Wang X D, Yao Y, Ren S L, et al. A coupled FLUS and Markov approach to simulate the spatial pattern of land use in rapidly developing cities[J]. Journal of Geo-Information Science, 2022,24(1):100-113.
- [10] 杨雪获,陈兴鹏,车磊,等.融入生态安全的兰西城市群土地利用功能布局优化[J].生态学报,2023,43(7):2583-2593.
- Yang X D, Chen X P, Che L, et al. Optimizing the functional layout of land use integrated ecological security in Lanzhou-Xining Urban Agglomeration[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(7):2583-2593.
- [11] 任胤铭,刘小平,许晓聪,等.基于 FLUS-InVEST 模型的京津冀多情景土地利用变化模拟及其对生态系统服务功能的影响[J].生态学报,2023,43(11):4473-4487.
- Ren Y M, Liu X P, Xu X C, et al. Multi-scenario simulation of land use change and its impact on ecosystem services in Beijing-Tianjin-Hebei Region based on the FLUS-InVEST Model [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(11):4473-4487.
- [12] 王柯文,秦见,马海涛.基于 CA-Markov 模型的重庆西部新城城市扩张时空演化模拟与生态响应[J].中国科学院大学学报,2023,40(4):496-505.
- Wang K W, Qin J, Ma H T. Spatial-temporal evolution simulation and ecological response of urban expansion in Western New City of Chongqing based on CA-Markov model[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2023,40(4):496-505.
- [13] 顾汉龙,马天骏,钱凤魁,等.基于 CLUE-S 模型县域土地利用情景模拟与碳排放效应分析[J].农业工程学报,2022,38(9):288-296.
- Gu H L, Ma T J, Qian F K, et al. County land use scenario simulation and carbon emission effect analysis using CLUE-S model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022,38(9):288-296.
- [14] 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.
- [15] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997,387:253-260.
- [16] 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.
- Xie G D, Lu C X, Leng Y F, et al. Ecological assets valuation of the Xizangan Plateau[J]. Journal of Natural Resources, 2003,18(2):189-196.
- [17] 谢高地,张彩霞,张雷明,等.基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J].自然资源学报,2015,30(8):1243-1254.
- Xie G D, Zhang C X, Zhang L M, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area [J]. Journal of Natural Resources, 2015,30(8):1243-1254.

- [18] 王化齐,尹立河,李彦娥,等.宁夏沿黄生态经济区生态系统服务价值及其提升对策[J].西北地质,2023,56(3):196-203.  
Wang H Q, Yin L H, Li Y E, et al. Ecological system service value assessment and improving countermeasures in Ningxia Yellow River ecological economic zone [J]. Northwest Geology, 2023, 56(3):196-203.
- [19] 张卫红,谢家丽,刘志鹏,等.2000—2020 年宁夏生态系统服务价值变化[J].中国沙漠,2023,43(4):157-167.  
Zhang W H, Xie J L, Liu Z P, et al. Assessment of the ecosystem service value change in Ningxia in 2000—2020[J]. Journal of Desert Research, 2023, 43(4):157-167.
- [20] 杨亚芳,何杰,刘振沧,等.宁夏盐池县土地利用转型的生态系统服务价值评估[J].石河子大学学报:自然科学版,2021,39(6):720-726.  
Yang Y F, He J, Liu Z C, et al. Evaluation of ecosystem service value of land use transformation in Yanchi County of Ningxia[J]. Journal of Shihezi University: Natural Science, 2021, 39(6):720-726.
- [21] 安斯文,马彩虹,袁倩颖,等.生态移民区“三生”用地变化对生态系统服务的影响:以宁夏红寺堡区为例[J].干旱区地理,2021,44(6):1836-1846.  
An S W, Ma C H, Yuan Q Y, et al. Effects of ‘ecological-production-living’ land changes on ecosystem services in ecological migration area: a case of Hongsi-bu District in Ningxia [J]. Arid Land Geography, 2021, 44(6):1836-1846.
- [22] 银川市人民政府.银川概况—自然地理[EB/OL]. (2023-05-04)[2023-10-13]. <https://www.yinchuan.gov.cn/sshc/ycgk/zrdl/>.  
Yinchuan municipal people's government. Overview of Yinchuan-natural geography [EB/OL]. (2023-05-04) [2023-10-13]. <https://www.yinchuan.gov.cn/sshc/ycgk/zrdl/>.
- [23] 张瀚宇,史名杰,曹月娥,等.基于 MOP-PLUS 模型的新疆阿克苏地区土地利用景观格局优化及多情景模拟[J].西南农业学报,2022,35(10):2256-2264.  
Zhang H Y, Shi M J, Cao Y E, et al. Optimization of land use landscape pattern and multi scenario simulation in Aksu Region of Xinjiang based on MOP-PLUS model[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2022, 35(10):2256-2264.
- [24] 陈逸航,黄秋昊,郑锦浩,等.多情景模拟下城市周边耕地功能分区[J].农业工程学报,2023,39(10):227-236,285.  
Chen Y H, Huang Q H, Zheng J H, et al. Functional zoning of the cultivated land around the city under multi-scenario simulation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(10):227-236,285.
- [25] 孙欣欣,薛建辉,董丽娜.基于 PLUS 模型和 InVEST 模型的南京市生态系统碳储量时空变化与预测[J].生态与农村环境学报,2023,39(1):41-51.  
Sun X X, Xue J H, Dong L N. Spatiotemporal change and prediction of carbon storage in Nanjing ecosystem based on PLUS model and InVEST model[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2023, 39(1):41-51.
- [26] 杨伟青,张会兰.基于 GeoSOS-FLUS 的涪江流域生态系统服务价值评估及多情景模拟[J].水土保持研究,2022,29(5):253-262.  
Yang W Q, Zhang H L. Ecosystem service value assessment and multi-scenario simulation of Fujiang River Basin based on GeoSOS-FLUS[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(5):253-262.
- [27] 李琛,高彬嫔,吴映梅,等.基于 PLUS 模型的山区城镇景观生态风险动态模拟[J].浙江农林大学学报,2022,39(1):84-94.  
Li C, Gao B P, Wu Y M, et al. Dynamic simulation of landscape ecological risk in mountain towns based on PLUS model[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2022, 39(1):84-94.
- [28] 夏楚瑜,国焜,赵晶,等.京津冀地区生态系统服务对城镇化的多空间尺度动态响应[J].生态学报,2023,43(7):2756-2769.  
Xia C Y, Guo H, Zhao J, et al. Dynamic responses of ecosystem services to urbanization at multi-spatial scales in the Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(7):2756-2769.
- [29] 如克亚·热合曼,阿里木江·卡斯木,哈力木拉提·阿布来提,等.基于 InVEST 模型的天山北坡城市群生境质量时空演化研究[J].生态与农村环境学报,2022,38(9):1112-1121.  
Reheman R, Kasim A, Ablat H, et al. Research on the temporal and spatial evolution of habitat quality in urban agglomeration on the northern slope of Tianshan Mountains based on InVEST model[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(9):1112-1121.
- [30] 邵明,李雄,刘志成.城市热环境对城市生态系统服务功能时空变化的响应:以成都市为例[J].中国城市林业,2021,19(2):22-28.  
Shao M, Li X, Liu Z C. Response of urban thermal environment to spatial and temporal changes of urban ecosystem services: a case study of Chengdu city[J]. Journal of Chinese Urban Forestry, 2021, 19(2):22-28.