

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.05.013.

赵祖伦, 罗军华, 李威, 等. 喀斯特山地城市群生态系统服务价值演变及影响因素[J]. 水土保持研究, 2024, 31(5): 410-420.

Zhao Zulun, Luo Junhua, Li Wei, et al. Evolution of Ecosystem Service Value and Influencing Factors in Karst Mountainous Urban Agglomeration [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(5): 410-420.

喀斯特山地城市群生态系统服务价值演变及影响因素

赵祖伦, 罗军华, 李威, 黄亮, 尹林江, 吕思思, 赵卫权

(贵州科学院 贵州省山地资源研究所, 贵阳 550001)

摘要: [目的] 研究喀斯特城市群城镇化背景下的生态系统服务价值(Ecosystem service value, ESV)演变及影响因素, 为区域生态环境保护、生态功能区划和生态补偿决策提供科学依据。[方法] 基于黔中城市群 2000—2020 年土地利用数据, 从自然和社会经济角度选取 16 个土地利用变化驱动因子, 构建 Markov-FLUS 模型模拟自然发展和生态约束情景下的 2030 年土地利用格局, 然后采用修正的 ESV 系数评估 ESV 时空演变规律, 利用地理探测器分析 ESV 空间分异影响因素。[结果] (1) 2000—2020 年人造地表对耕地(53%)、林地(12%)和草地(10%)侵占严重; 生态约束情景下重要自然保护区得到有效保护, 人造地表增加 5.55 万 hm^2 , 增速有所放缓。(2) ESV 整体呈现先升后降的趋势, 其中调节服务(71.08%) > 支持服务(23.59%) > 文化服务(4.51%) > 供给服务(0.82%); 自然发展情景下 2030 年 ESV 值为 592.11 亿元, 生态约束情景下 ESV 值为 589.06 亿元。(3) ESV 空间分异因子解释力分别为区县面积(0.79) > 农林牧渔增加值(0.51) > 第一产业增加值(0.50) > GDP(0.41) > 人均 GDP(0.30) > 建成区面积(0.09) > 常住人口(0.04), 区县面积、农林牧渔增加值和第一产业增加值与 ESV 呈显著正相关, 人均 GDP 与 ESV 呈显著负相关关系, 影响因素的交互对于 ESV 具有非线性增强和双因子增强的解释作用。[结论] 区域生态系统服务类型主要为调节服务, 水域与林地生态系统对于整体 ESV 的影响较大, 是区域环境保护与生态建设的重心。

关键词: 生态系统服务价值; Markov-FLUS 模型; 土地利用模拟; 地理探测器; 黔中城市群

中图分类号: X826, P901

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)05-0410-11

Evolution of Ecosystem Service Value and Influencing Factors in Karst Mountainous Urban Agglomeration

Zhao Zulun, Luo Junhua, Li Wei, Huang Liang, Yin Linjiang, Lyu Sisi, Zhao Weiquan

(Institute of Mountain Resource of Guizhou Province, Guizhou Academy of Science, Guiyang 550001, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to investigate the evolution of ecosystem service value (ESV) and its influencing factors urbanization in the Karst city cluster and to provide a scientific basis for regional eco-environmental protection, ecological function zoning, and ecological compensation decision-making. [Methods] Based on the land use data of urban agglomeration of central Guizhou Province from 2000 to 2020, 16 drivers were selected from natural and socio-economic perspectives, and a Markov-FLUS model was constructed to simulate the land use pattern in 2030 under the scenarios of natural development and ecological constraints. Then, the modified ESV coefficients were used to assess the spatial and temporal evolution of ESV and analyze the factors influencing the spatial differentiation of ESV using Geodetector. [Results] (1) The artificial surface seriously encroached on cropland (53%), forest land (12%), and grassland (10%) from 2000 to 2020. Under the ecological constraint scenario, significant nature reserves were effectively protected, and the artificial surface increased by 55 500 hectares, with a slower growth rate.

收稿日期: 2023-10-07

修回日期: 2023-11-01

资助项目: 贵州科技计划项目(黔科合基础-ZK[2022]一般 277); 贵州科技计划项目(黔科合基础-ZK[2024]一般 628); 贵州科技计划项目(黔科合支撑[2023]一般 199; 黔科合支撑[2023]一般 198); 贵州科学院青年科学基金项目(黔科院 J 字[2024]13 号)

第一作者: 赵祖伦(1993—), 男, 贵州毕节人, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为 3S 技术与生态环境应用。E-mail: 769301533@qq.com

通信作者: 赵卫权(1982—), 男, 甘肃庆阳人, 博士, 研究员, 主要研究方向为资源环境与 3S 技术应用、喀斯特生态环境。E-mail: zww82@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

(2) The ESV as a whole showed a trend of rising and then falling, with regulating services (71.08%) > supporting services (23.59%) > cultural services (4.51%) > supplying services (0.82%). The value of ESV in 2030 under the natural development scenario was 59.211 billion yuan, and that was 58.906 billion yuan under the ecological constraint scenario. (3) The explanatory power of ESV spatial differentiation factors followed the order: area of districts and counties (0.79) > value-added of agriculture, forestry, animal husbandry and fishery (0.51) > value-added of primary industry (0.50) > GDP (0.41) > GDP per capita (0.30) > area of built-up area (0.09) > resident population (0.04). The area of districts and counties, value-added of agriculture, forestry, animal husbandry and fishery, and value-added of primary industry were significantly and positively correlated with ESV, and GDP was significantly and positively correlated with ESV. The area of districts and counties, value-added of agriculture, forestry, animal husbandry and fishery, and value-added of primary industry were significantly positively correlated with ESV, and GDP was significantly negatively correlated with ESV. [Conclusion] Regional ecosystem services are mainly regulating services, and water and woodland ecosystems have a more significant impact on the overall ESV, which is the center of gravity of regional environmental protection and ecological construction.

Keywords: ecosystem service value; Markov-FLUS model; land use simulation; Geodetector; urban agglomeration of central Guizhou Province

生态系统提供了一系列对人类福祉至关重要的服务^[1]。然而现代经济过度强调市场商品和服务的生产和消费,导致人类福祉所依赖的基本要素(包括自然和社会资本)被过度使用和破坏^[2]。全球经济发展同时生物多样性锐减的当下,如何建立有效的生态系统核算体系,平衡对自然商品和服务需求及可持续供应能力,对于促进生态系统健康可持续发展具有重要的意义。

生态系统服务定量评估是当前生态系统经济学领域研究的热点,以货币形式评估生态系统服务经济价值存在争议,但是这种方式为政府决策衡量发展效益、社会价值观(认识到生态系统服务重要性)的改变,提供一定的说服力。1997年 Costanza 等核算全世界生态系统服务价值分布,制定了全球生态系统服务价值当量因子表^[3]。2014年 Costanza 等重新估算全球生态系统服务价值的变化情况^[1,4]。2021年3月份,联合国统计委员会的环境经济统计与生态统计体系(SEEAEA),对生态系统服务和资产估值提供了建议。2021年 Nature 发文称加大对生态系统货币价值评估将有助于保护地球濒危地区。但是当前基于生态系统服务价值的货币衡量和转移支付方式未得到各国的统一认可,具有说服力的标准难以确定,全世界或者中国都没有统一 GEP 统计核算标准,如欧阳志云等学者评估了中国陆地生态系统服务功能,计算结果相差5倍之多,因此区域适宜的 ESV 评估理论体系和案例研究有待进一步扩展和丰富^[5]。

研究方法方面,测度 ESV 主要有原始价值评估和价值转移评估两类方法^[6],具体有市场价值法、替

代成本法、避免成本法、旅行成本法、享乐价格法、条件价值法、选择建模法、效益转移法、机会成本法、生态系统服务价值系数等^[7]。国外许多研究是基于生态系统服务估值数据库(ESVD, EVRI, MESP, NZN-MVD 等)和 Costanza 等提出的全球生态系统服务价值当量因子表以及环境经济统计与生态统计体系(SEEAEA),根据区域特点进行价值转移或者修正进行 ESV 评估^[8]。新西兰学者 Schenau 等认为生态系统服务价值估算取决于生态系统的服务类型,供给服务使用基于租金的方法(Rent-based methods),调节服务使用代替成本法(Replacement costs)或者避免成本法(avoided damage costs methods),文化服务使用消费者支出和保值定价的方法^[8]。国内研究主要以谢高地和欧阳志云等学者研究成果为基础进行扩展,如以谢高地等参考 Costanza 的 ESV 系数和 MA(Millennium ecosystem assessment)生态系统分类方法,结合中国区域特点通过生物量参数,制定出“中国陆地生态系统服务价值当量因子表”,当量因子法直观易用,数据需求量小,特别适用于缺乏统计数据的尺度区域进行 ESV 评估^[9-11]。在参数修正方面也有一些研究和探讨,如刘志涛等利用归一化植被指数修订单元生态系统服务价值^[12];封清等利用农田生产力/单位面积产量/植被净初级生产力(NPP)和改进的光能利用率 CASA 模型修订贵州册亨县的单位面积生态系统服务价值当量^[13]; Kulaixi 等依据当地粮食生产和净生产力数据修正塔里木河流域单位面积生态系统服务价值当量^[14]。总体来说,基于原

始评估的方法更加准确,但是耗时且需要大量的数据支撑,价值转移方法不需要大量的调查数据,尤其是借助遥感与 GIS 技术构建生态空间模拟模型,可以实现流域、景观区域尺度的动态评估而被广泛应用。

研究对象方面,当前针对全球、流域、城市群、省级、乡镇、单个生态系统服务等不同尺度进行 ESV 估算研究的较多,但是对于具备喀斯特地域特色的黔中城市群模型估算法的使用和关注较少。由于生态系统本身的区域性、异质性和复杂性,不可能用一套或者几套系数模型,就可以衡量每个地区的生态系统服务实际价值。黔中城市群绿色空间、生态服务缺乏,发展经济需要大规模生态产品和生活资源供给,然而该区域山地面积占比高,土地资源少,受地质背景和水文结构影响,土薄肥力差,水土资源空间不匹配,导致生态系统具有环境容量低、敏感度高、稳定性差、抗干扰能力弱等特点^[15],土地利用结构和分布格局剧烈变化影响生态系统结构、过程和功能,进一步影响生态系统服务能力^[16]。针对喀斯特山地城市群的 LUCC 变化模拟与 ESV 核算,加入岩组类型、石漠化程度以及社会经济 POI 兴趣点驱动因子数据,并修正了一套适合于贵州的 ESV 估算的当量单价表,有利于丰富探索阶段的 ESV 评估理论。

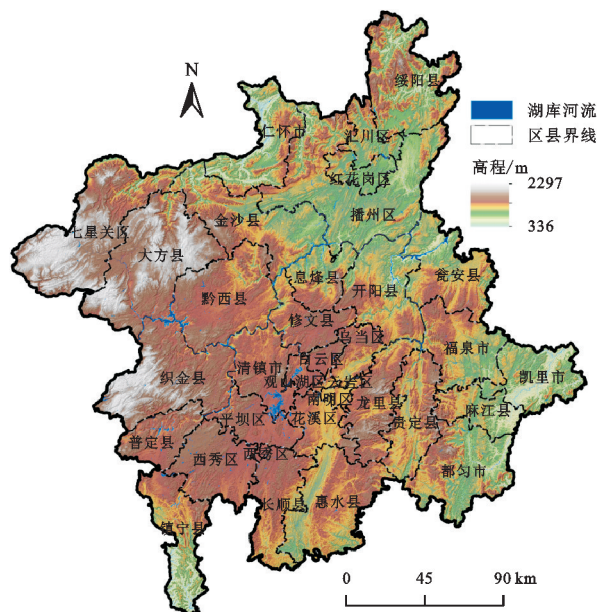
基于 2000—2020 年土地利用/覆被数据,利用 Markov-FLUS 模型模拟自然发展和生态约束情景下 2030 年黔中城市群土地利用变化格局,然后利用修正的单位面积生态系统服务价值系数,测算 2000—2030 年黔中城市群生态系统服务价值的时空演变格局,分析喀斯特城市群高速城镇化与土地利用变化背景下的生态系统服务价值演变规律,最后根据地理探测器分析 ESV 空间分异影响因素,为黔中城市群的可持续发展提供科学依据。

1 研究区域与数据

1.1 研究区概况

黔中城市群地处贵州中部,位于东经 $104^{\circ}51'$ — $108^{\circ}12'$,北纬 $25^{\circ}25'$ — $28^{\circ}29'$,涉 6 个地州市 33 个区县(图 1)。总面积达 5.38 万 km^2 ,2022 年常住人口为 1 885 万,地区生产总值达 12 134 亿元,常住人口与地区生产总值分别占全省 48% 和 60%,是贵州省高质量发展的动力源和增长级,也是国家“十四五”规划纲要和《国家新型城镇化规划(2021—2035 年)》重点培育城市群,西部大开发战略重点区域。黔中城市群以喀斯特地貌为主,是长江珠江上游重要生态屏障,山地面积占比高,土地资源紧缺,洪涝、干旱、滑坡、泥石流等自然灾害较多,生态环境脆弱。近年来由于经济发展迅速,

人类流动频繁,导致区域人地矛盾更为突出,社会经济发展与生态环境可持续问题备受关注。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2019)3266 号的标准地图制作,底图未做修改。

图 1 研究区域

Fig. 1 Study area

1.2 数据来源与处理

2000—2020 年土地利用/覆被数据来源于自然资源部(30 m 全球地表覆盖数据 GlobeLand 30),依据一级分类划分为耕地、林地(包括灌木地)、草地、水域(水体及湿地)和人造地表等 5 大类;土壤类型、植被类型、DEM 数据、年均降水、年均气温、GDP 密度等来源于资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>),人口密度数据来源于 Worldpop 网站(<https://www.worldpop.org/>),公路网、河湖水系数据来源于 91 卫图企业版,POI 兴趣点数据(公司企业、科教文化、交通设施服务)来源于高德开放平台(<https://lbs.amap.com/>)。为方便模型运行与生态系统服务价值的计算,各地理要素数据利用 ArcGIS 软件进行坐标投影、空间分辨率($100\text{ m} \times 100\text{ m}$)和栅格行列数的统一。

2 研究方法

2.1 Markov-FLUS 模型

Markov-FLUS 模型是集成数量预测 Markov 链和空间布局模拟 FLUS 模型优势,并加入人工神经网络和轮盘赌选择机制而构建的模型,研究表明该模型能够将自然、社会、经济多种因素影响作为输入参数,计算土地利用类型在空间上的布局适宜性,较高精度地模拟未来不同土地利用类型的空间布局^[17]。FLUS 模型具体方法介绍和公式参见 Liu 等文献^[18]。

2.1.1 土地利用变化驱动因子 土地利用/覆被变化作为自然生态系统的载体,利用方式和变化程度都会影响生态系统的调节、恢复和生产能力^[4]。土地利用变化模拟研究中,以往大多聚焦于自然地理等静态因子,但是人类日常活动与土地扩张的关系没有得到充分考虑,李立等在研究北京市土地利用模拟中加入了兴趣点(point of interest, POI)数据,为丰富模型

参数提供了新的思路^[19]。因此拟从静态自然因素与动态社会经济因素两个方面考虑,选取高程、坡度、土壤类型、植被类型、石漠化程度、坡向、岩组类型、年均气温、年均降水、GDP 密度、人口密度、公路核密度、河湖距离、公司企业密度、科教文化场所密度、交通设施服务密度等作为驱动因子^[20],模拟各类用地空间适宜性概率,其中驱动因子及数据来源见表 1。

表 1 驱动因子及数据来源
Table 1 Driving factors and data sources

类型	驱动因子	数据来源
自然	高程	资源环境科学与数据中心(https:// www.resdc.cn/)
	坡度	资源环境科学与数据中心(https:// www.resdc.cn/)
	坡向	资源环境科学与数据中心(https:// www.resdc.cn/)
	岩组类型	贵州师范大学
	土壤类型	资源环境科学与数据中心(https:// www.resdc.cn/)
	植被类型	资源环境科学与数据中心(https:// www.resdc.cn/)
	石漠化程度	贵州师范大学
	年均气温	资源环境科学与数据中心(https:// www.resdc.cn/)
	年均降水	资源环境科学与数据中心(https:// www.resdc.cn/)
	GDP 密度	资源环境科学与数据中心(https:// www.resdc.cn/)
社会经济	人口密度	Worldpop 网站(https:// www.worldpop.org/)
	公路核密度	91 卫图企业版下载路网数据, ArcGIS 软件处理
	到湖泊河流距离	91 卫图企业版下载水系数据, ArcGIS 软件处理
	公司企业核密度	高德开放平台(https://lbs.amap.com/)
	科教文化服务核密度	高德开放平台(https://lbs.amap.com/)
	交通设施服务核密度	高德开放平台(https://lbs.amap.com/)

2.1.2 精度验证 利用 Markov-FLUS 模型模拟 2010—2020 年自然发展下的土地利用数据,与实际数据进行比较,验证模型的模拟精度。当 Kappa 系数高于 0.80 时,表示模型在统计学意义上达到较好的精度。通过模拟结果与实际结果对比,模型模拟平均 Kappa 系数为 0.853 4,平均 Fom 系数为 0.154 6,试验模拟精度基本达到要求,表明模型具有一定的适用性^[21]。

2.1.3 情景设定

(1) 自然发展情景(NIS)。在自然发展情景中,不考虑其他因素影响,依据 2000—2020 年土地利用数据变化趋势,利用 Markov 模型预测 2030 年土地利用数量目标,土地转移速率与 2010—2020 年相同,不设置转移限制条件,将该种无约束模式作为一个参考情景同其他情景进行对照^[22]。

(2) 生态约束情景(EPS)。在生态约束情景中,为维护城市群的生态安全,应该严格保护区域内的林地、水域、草地等具有重要生态价值的用地类型,限制水域、林地、草地向人造地表转移的可能性^[21]。在土地利用需求预测时,将林地、草地向人造地表转移的概率减少 20%,水域转为人造地表的概率减少 30%^[23]。并将地质公园、风景名胜區、湿地公园、森林公园、自

然保护区、水产保护区、大面积水域等作为约束条件,限制向其他用地类型转移。

模型参数设置:FLUS 模型的迭代次数设置为 300 次,元胞自动机采用 5×5 摩尔邻域,迭代加速因子设置为 0.1。自然发展情景下,耕地邻域权重为 0.85,林地邻域权重为 0.82,草地邻域权重为 0.68,水体邻域权重为 0.78,人造地表邻域权重为 0.89;生态约束情景下,耕地邻域权重设置为 0.85,林地邻域权重提高到 0.98,草地邻域权重提到 0.82,水体邻域权重提高到 1,人造地表邻域权重设置为 0.89。

2.2 ESV 核算

以谢高地等学者修改后的中国生态系统单位面积生态服务当量表为基础^[9],结合贵州社会经济发展以及土地利用情况,制定黔中城市群生态系统单位面积生态系统价值当量表(表 2),其中人造地表默认等同于建设用地,不同学者对其生态系统服务价值的估算方式不一样,Sharma、谢高地、周寒冰、韩会庆等学者的研究不对建设用地生态系统价值进行估算^[4,9-10,24-25];Costanza 等设定了建设用地(或城市)的生态系统服务价值^[1]。由于人造地表包含众多自然社会经济因素,价值评估复杂且存在争议,因此假定

人造地表(建设用地)的 ESV 系数为 0。通过查询《中国统计年鉴》《全国农产品成本收益资料汇编》等资料,收集贵州省 1980—2020 年谷物、花生、油菜籽、甘蔗等作物的播种面积、单位面积产量、产品价格等数据,利用“1/7 公式”(一个标准生态系统服务经济

表 2 修正后的单位面积生态系统价值当量

Table 2 Revised equivalent value of ecosystem service value per unit area in Guizhou

一级类型	二级类型	耕地	林地	草地	水域	人造地表
供给服务	食物生产	1.11	0.25	0.23	0.66	0
	原料生产	0.25	0.58	0.34	0.37	0
	水资源供给	-2.61	0.30	0.19	5.44	0
调节服务	气体调节	0.89	1.91	1.21	1.34	0
	气候调节	0.47	5.71	3.19	2.95	0
	净化环境	0.14	1.67	1.05	4.58	0
	水文调节	1.50	3.74	2.34	63.24	0
	土壤保持	0.52	2.32	1.47	1.62	0
支持服务	维持养分循环	0.16	0.18	0.11	0.13	0
	生物多样性	0.17	2.12	1.34	5.21	0
文化服务	美学景观	0.08	0.93	0.59	3.31	0

$$E_a = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^3 \frac{P_i \cdot Q_i}{M_g} \quad (1)$$

$$V_{jk} = e_{jk} \cdot E_a \quad (2)$$

$$E = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n V_{jk} \cdot A_j \quad (3)$$

式中: E_a 表示农田所提供的单位面积生态服务价值(元/hm²); i 表示粮食作物种类; P_i 表示第 i 种粮食的平均价格(元/kg); Q_i 表示第 i 种粮食总产量(kg); M_g 表示粮食播种总面积(hm²); V_{jk} 表示第 j 种土地类型第 k 种生态服务功能的 ESV 系数(元/hm²); e_{jk} 表示第 j 种土地类型包含的第 k 种生态服务功能价值单位当量; E 表示总生态系统服务价值(元/a); A_j 表示 j 类土地类型面积(hm²); m 表示土地类型数量; n 表示生态服务功能数量。

根据修正的单位面积生态服务价值以及不同土地利用生态系统面积,即可得到 ESV 计算公式^[19,24]:

$$ESV = \sum A_k \cdot VC_k \quad (4)$$

式中:ESV 为生态系统服务价值; A_k 是第 k 类土地利用类型的面积(hm²); VC_k 是 ESV 当量因子的价值量[元/(hm²·a)]。

2.3 地理探测器

地理探测器是探测地理要素空间分异性,以及揭示其背后驱动因子的一种新的统计学方法,通过比较因变量和自变量因子 q 值以及叠加后的 q 值,判断因子之间是否存在交互作用,以及交互作用的强弱、方向、线性和非线性等问题^[7,27]。将黔中城市群 2020 年 33 个区县生态系统服务价值作为因变量,影响生态服

价值等效系数是单位面积农田的食物生产经济价值的 1/7,简称“1/7 公式”)对研究区单位面积粮食产量创造的经济价值进行修正^[22,26],得到贵州省一个标准当量因子的生态系统服务价值量为 989.24 元/hm²,以及单位面积生态系统服务单价表(表 3)。

表 3 单位面积生态系统服务单价

Table 3 The value per unit area of ecosystem services

		in Guizhou					元/(hm ² ·a)
一级类型	二级类型	耕地	林地	草地	水域	人造地表	
供给服务	食物生产	1093.12	249.78	230.82	647.96	0	
	原料生产	242.37	573.76	339.64	361.08	0	
	水资源供给	-2581.93	296.77	187.96	5381.50	0	
调节服务	气体调节	880.43	1886.99	1193.69	1320.64	0	
	气候调节	460.00	5646.13	3155.70	2913.33	0	
	净化环境	133.55	1654.52	1042.01	4525.80	0	
	水文调节	1478.92	3694.84	2311.54	62555.03	0	
	土壤保持	514.41	2297.53	1454.19	1602.58	0	
支持服务	维持养分循环	153.33	175.59	112.11	123.66	0	
	生物多样性	168.17	2092.26	1322.29	5153.98	0	
文化服务	美学景观	74.19	917.53	583.66	3274.41	0	

务价值的驱动因子作为自变量,通过比较分析因变量空间分异的自变量解释力,度量黔中城市群 ESV 空间分异的主控因素,以及因子交互对于 ESV 的影响。具体方法和计算公式参见王劲峰等学者文献^[27]。

3 结果与分析

3.1 土地利用变化

利用 Markov-FLUS 模型模拟自然发展情景和生态约束情景下的 2030 年土地利用空间格局,得到土地利用变化及空间分布格局(表 4,图 2)。2000—2020 年黔中城市群土地利用中耕地和林地占比最多(41%和 39%),草地次之(18%)。耕地主要分布于东北部遵义、中部坝区,面积总体呈下降趋势,20 年减少了 5.09 万 hm²,主要转出类型为林地和草地;林地主要分布于北部大娄山生态屏障区和南部的乌蒙山—苗岭生态屏障区,面积总体呈先增后减趋势,20 年间减少 1.63 万 hm²,主要转出类型为耕地和草地;草地主要分布于东北部金沙至绥阳一带、普定东部、镇宁和贵定南部等区域,面积总体呈下降趋势,20 年间减少了 6.31 万 hm²,主要转出类型为林地(20%)和耕地(11%);水域主要是中部的乌江水域、北部赤水河水域以及东南部清水江水域,大型湖库有洪家渡水库、东风水库、红枫湖、百花湖、夜郎湖等,面积呈现先减后增的趋势,20 年间增加了 1.27 万 hm²,主要来源地类是草地(25%)、耕地(20%)和林地(14%);人造地表面积显著增加,其中 2000—2010 年增加了 8%,2010—2020 年增加了 261%,城镇化扩张速度

明显,扩张区域集中于贵阳贵安核心城市区,以及西秀、七星关、汇川、红花岗区、都匀市、凯里市等区域性中心城市,人造地表增加的面积,主要来源于耕地(53%)、林地(12%)和草地(10%)。

自然发展情景下,2030 年林地、耕地和草地持续减少,分别减少 5.05 万、3.54 万和 2.46 万 hm^2 ;人造地表面积大量增加,城市扩张速度加快,2020—2030 年增加9.96

万 hm^2 人造地表,主要来源于耕地和草地;水域面积增加 1.09 万 hm^2 。生态约束情景下,2020—2030 年林地和耕地的面积减少,草地面积增加 3.05 万 hm^2 ,水域面积保持不变,人造地表面积增加 5.55 万 hm^2 ,与自然发展情景相比,生态约束情景下水体、湿地、重要自然保护区和公园等得到有效保护,人造地表面积增速有所放缓,转入类型主要为耕地。

表 4 黔中城市群土地利用数量变化统计

Table 4 Area of different land types in Urban agglomeration of central Guizhou Province

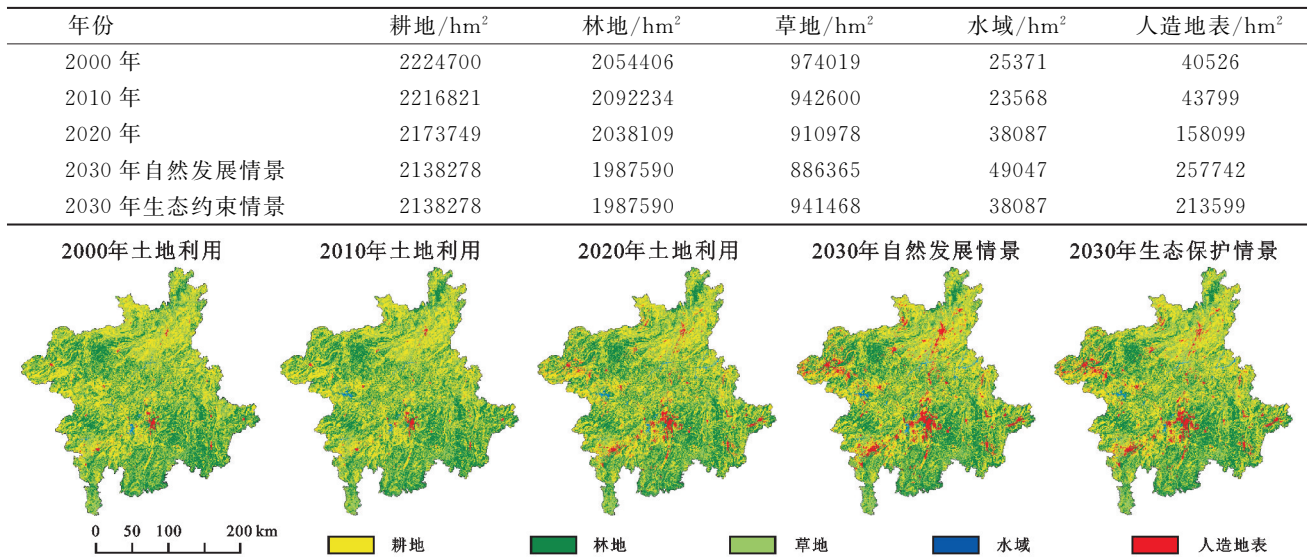


图 2 黔中城市群不同情景下的土地利用空间格局

Fig. 2 Patterns of land use under NIS, EPS scenarios in Urban agglomeration of central Guizhou Province

3.2 ESV 时空演变

(1) 2000—2030 年 ESV 数量变化。基于 2000—2020 年以及 2030 年不同情景土地利用,利用修正的单位面积生态系统服务价值当量表,计算得到不同年份各类型生态系统服务价值变化情况(图 3)。

从 ESV 变化趋势来看。黔中城市群 2000—2020 年生态系统服务价值,呈现先上升后下降的趋势,2000—2010 年人造地表增加 0.33 hm^2 ,耕地减少 0.79 hm^2 ,水域减少 0.18 hm^2 ,草地减少 3.14 hm^2 ,但是因为林地增加 3.78 万 hm^2 ,提升区域调节服务、支持服务与文化服务,增加了区域总体 ESV 值;2010—2020 年,区域人造地表面积增加 261%,增加对耕地和林地生态系统的侵占,但是因为水域面积增加约 29%,极大地提升区域的水文调节、水资源供给和生物多样性服务,降低人造地表对于整体 ESV 的影响。区域土地利用变化对于生态系统服务价值的影响,也从侧面反映出该区域水域和林地生态系统主导着整体 ESV 变化,水域和湿地生态系统与林地生态系统的保护与维持,是区域环境保护与生态建设的重心。2000—2020 年生态系统服务类型占比较高分别为气候调节、水文调节、土壤保持与气体调节,约占整体

ESV 值的 71.41%,75.06%和 75.16%,生态系统服务主要以调节服务为主,价值量呈现增加趋势,说明该区域生态系统主要提供维持水文循环、气候和气体调节等功能,而粮食生产和原料生产能力有限,与国家将区域作为长江珠江上游重要生态屏障、国家级生态文明试验区的定位相符合,从巩固生态环境优势、探索生态产品价值实现机制出发,走绿水青山转化为金山银山的道路。

从不同发展情景变化情况来看。自然发展情景下,2030 年黔中城市群 ESV 值为 592.11 亿元,在生态约束情景下,ESV 值为 589.06 亿元,生态约束情景 ESV 值小于自然发展情景下的 ESV 值。该结论产生的原因是,自然发展情景下是依据土地利用变化历史规律进行预测,不加以转化限制,2010—2020 年贵州省黔中水利枢纽工程、骨干水源工程、引提灌工程等大型饮水灌溉水利工程建设,以及退耕还湿、生态补水以及增加湿地公园等措施,使得水域面积大量增加,虽然草地生态系统面积进一步减少,气体、气候和水文调节能力有所降低,但由于人造地表面积的增加对于生态系统的损耗或者贡献都忽略不计,反而对于水域面积增加无限制,2010—2020 年期间水域面积增加约

1.45 万 hm^2 , 水文调节和水资源供给保障能力进一步提高, 按照该发展趋势 2030 年水域面积也将进一步增加, 然而在谢高地等研究结论中, 水域生态系统的水文调节服务当量值比其他生态系统的当量高许多, 导致

计算过程中, 自然发展情景下, 即使草地生态系统面积减少, 城市扩张加快, 但只要水域面积增加得多, 城市群的总体 ESV 值仍然较高, 也从侧面说明水域对于整体生态系统服务价值维持极端重要性。

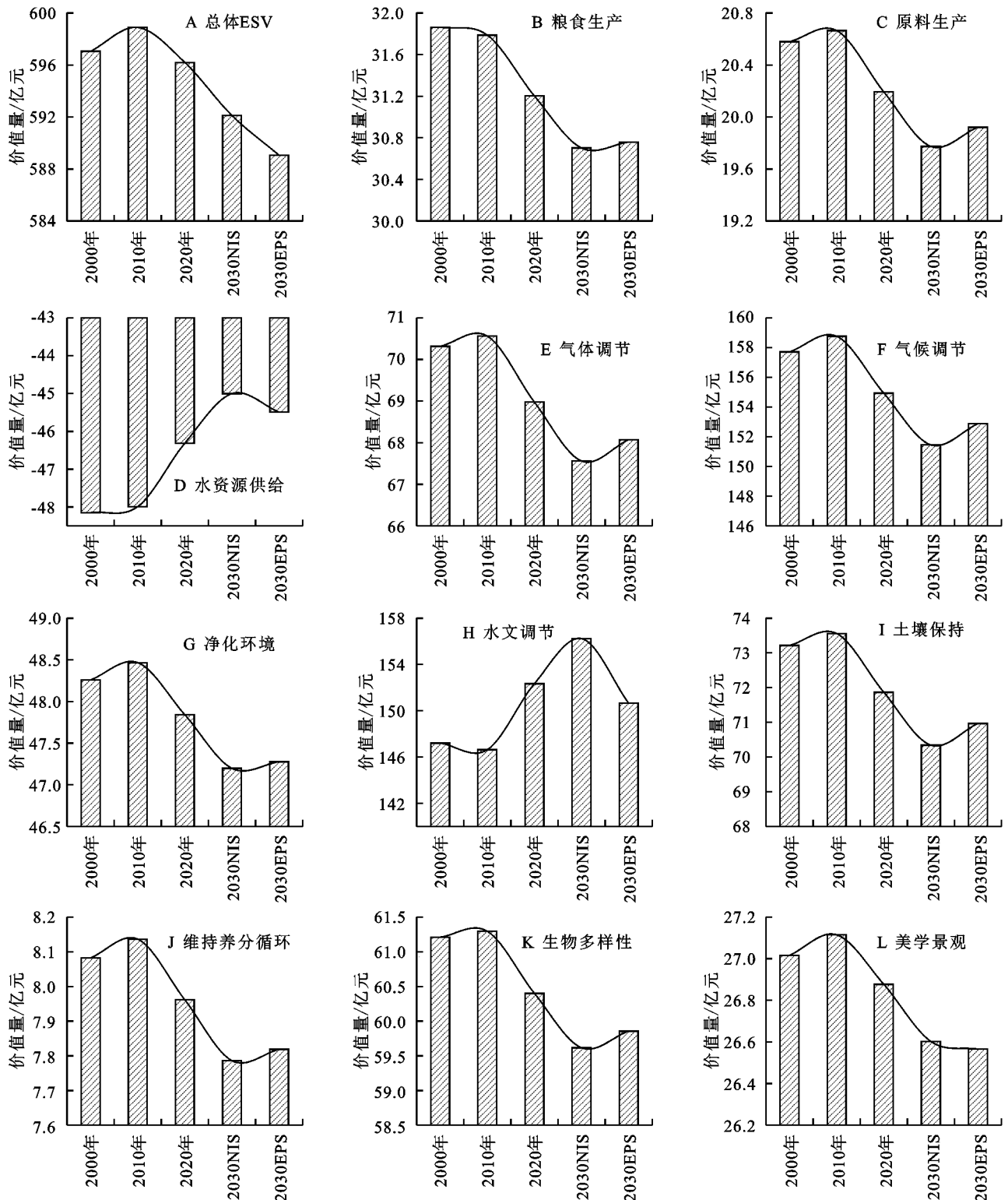


图3 2000—2030 年黔中城市群各项生态系统服务功能价值量变化

Fig. 3 Changes in the value of various ecosystem services in Urban agglomeration of central Guizhou Province from 2000 to 2030

在生态约束情景下, 约束了水域向人造地表的转换概率, 同时将地质公园、风景名胜区、湿地公园、森林

公园、水产种质资源保护区等 28.75 万 hm^2 的重点生态功能保护区作为约束条件。相比较而言, 自然发展情景

下人造地表对于其他生态系统的侵占更严重,但是历史趋势下的水域面积扩张,一定程度上弥补了人造地表对于 ESV 的影响,生态约束情景下水域和重点生态保护区得到保护,人造地表侵占速率较低。从区域总体发展需求来看,稳定增加水域和湿地生态系统面积、降低城市发展对于其他生态系统的侵占速率、保护重点生态功能区,对于区域生态系统服务可持续是必要的,不能因为土地利用变化会降低生态系统服务价值就简单否定之,合理的土地利用变化应该既要促进社会经济发展,又要尽量降低对生态环境的负面影响,达到可持续发展的目标。因此自然发展情景下,尽管预测出的水域面积较大,导致自然发展情景 ESV 高于生态约束 ESV,但是从空间保护、重点功能区的保护角度来说,还是应该选择生态约束发展情景,并考虑持续增加区域水域和湿地生态系统面积的决策方式。

从生态系统服务类别来看。2000—2030 年黔中城市群不同类型生态服务中,ESV 平均占比大小排序为:调节服务(71.08%)>支持服务(23.59%)>文化服务(4.51%)>供给服务(0.82%);2000—2020 年原料生产、气候调节、气体调节、净化环境、土壤保持维持养分循环、生物多样性和美学景观等服务价值皆

出现先升后降趋势,水文调节服务呈现先降后升趋势,水资源供给总体为负数,因为该区域耕地生态系统占比较高,用水需求量较大,随着耕地面积进一步减少,水资源供给服务绝对值(需水量)进一步减少;水文调节服务呈现先减后增的趋势,水源调节主要受水域面积影响,2000—2020 年期间区域大兴水利工程,湖库水域大量增加,水源调节能力进一步增强。

(2) 区县尺度 ESV 时空变化。通过自然断点法对 33 个区县的 ESV 进行计算分级和统计(图 4)。结果表明,区县尺度上,2000—2030 年 ESV 均值较高的分别是大方县、播州区、惠水县、七星关区和织金县,ESV 均值超过 30 亿元;ESV 均值较低的区域分别是云岩区、南明区、白云区、观山湖区和红花岗区,ESV 均值低于 5 亿元。2000—2020 年期间,有 22 个区县(占 66.67%)ESV 降低,都匀、清镇和凯里市的 ESV 降幅最大,分别减少 3.63 亿元、1.35 亿元和 1.06 亿元;ESV 增幅较大的区县是黔西(2.54 亿元)、织金(1.87 亿元)、开阳(1.57 亿元)和瓮安(1.57 亿元)。两种发展情景 ESV 比较表明,自然发展情景下有 15 个区县的 ESV 低于生态约束情景下的 ESV,两种情景下区县 ESV 绝对值之差小于 0.87 亿元。

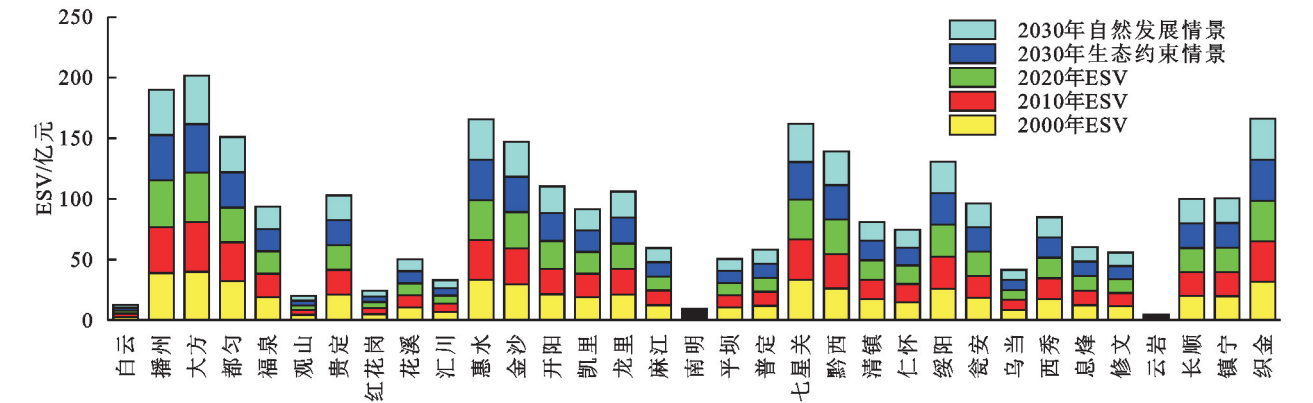


图 4 2000—2030 年黔中城市群各区县 ESV 变化统计

Fig. 4 Changes of ESV in Urban agglomeration of central Guizhou Province by District and County from 2000 to 2030

3.3 ESV 空间分异影响因素

将 2020 年 33 个区县 ESV 值作为因变量,将建成区面积(X_1)、区县面积(X_2)、GDP(X_3)、常住人口(X_4)、人均 GDP(X_5)、第一产业增加值(X_6)和农林牧渔增加值(X_7)等社会经济要素作为自变量,通过自然断点法将各因子数据分为 5 级,输入地理探测器模型,得到 ESV 空间分异 q 值及因子交互探测结果(图 5,表 5),其中 q 值值域为[0,1],值越大表明自变量对于因变量的空间分布解释力越强,反之越弱。探测结果表明,各区县 ESV 值空间分异影响因子解释力大小为:区县面积(0.79)>农林牧渔增加值(0.51)>第一产业增加值(0.50)>GDP(0.41)>人均 GDP(0.30)>

建成区面积(0.09)>常住人口(0.04),区县面积、农林牧渔增加值与第一产业增加值对于 ESV 空间分异解释力较强,其中区县面积、农林牧渔增加值、第一产业增加值和 GDP 等因子通过了显著性 0.05 的 t 检验,因子差异极显著。通过影响因子交互探测结果可知,因子之间的交互作用对于 ESV 解释力作用表现为非线性增强与双因子增强,即影响因子交互作用后的解释力大于各自单独的作用或者大于两个因子的解释力之和,说明综合因素更能有力的解释黔中城市群 ESV 的空间分异。通过 Person 相关性检验可知(表 6),ESV 与各指标的相关性系数分别为:区县面积 X_2 (0.85,高度正相关)、第一产业增加值 X_6 (0.71,显

著正相关)、农林牧渔增加值 X_7 (0.70, 显著正相关)、人均 GDP X_5 (-0.36, 低度负相关)、GDP X_3 (-0.33, 低度负相关)、建成区面积 (0.24, 微弱负相关)、常住人口 X_4 (0.04, 微弱正相关或不相关), 其中农林牧渔增加值、第一产业增加值和区县面积等因子通过 0.01 水平上的相关性显著检验, 人均 GDP 因子通过 0.05 水平上的相关性显著检验。区县面积、第一产业增加值与农林牧渔增加值呈现显著正相关, 区县 ESV 与人均 GDP 呈现显著负相关关系。

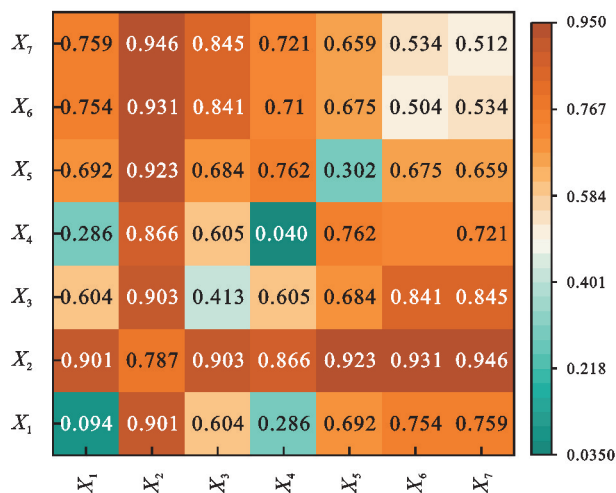


图 5 ESV 空间分异影响因子交互探测结果

Fig. 5 Interaction detection results of ESV spatial distribution influence factor

表 5 ESV 空间分异影响因子 p 值和 q 值结果

Table 5 The q and p value of all factors

影响因子	q 值	p 值	排序
区县面积 (X_2)	0.79	0	1
农林牧渔增加值 (X_7)	0.51	0.04	2
第一产业增加值 (X_6)	0.50	0.04	3
GDP (X_3)	0.41	0.01	4
人均 GDP (X_5)	0.30	0.17	5
建成区面积 (X_1)	0.09	0.85	6
常住人口 (X_4)	0.04	0.92	7

表 6 影响因子与 ESV 相关系数

Table 6 Correlation coefficient between impact factors and ESV

影响因子	与 ESV 相关系数	相关性
建成区面积 (X_1)	0.24	微弱正相关
区县面积 (X_2)	0.85 **	高度正相关
GDP (X_3)	-0.33	低度负相关
常住人口 (X_4)	0.04	微弱正相关
人均 GDP (X_5)	-0.36 *	低度负相关
第一产业增加值 (X_6)	0.71 **	显著正相关
农林牧渔增加值 (X_7)	0.70 **	显著正相关

注: * 表示相关性显著 ($p < 0.05$), ** 表示相关性极显著 ($p < 0.01$)。

4 讨论与结论

4.1 讨论

受自然界本身不确定性、人类活动干扰以及模型结构和模拟方法的不确定性等影响, 评估模型的模拟结果亦存在不确定性。首先是政策因子难以预测与空间化造成的不确定性, 在土地利用模拟影响因素中, 政策性变化难以模拟, 影响模拟精度, 如新的开发区平地起高楼 (贵安新区); 毕节洪家渡水电站建设, 建成一个水域面积 80 km² 的支嘎阿鲁湖; 建设用地沿新建交通沿线增加, 然而此类随机性因素难以在模型中进行有效表达。其次是尺度影响不确定性, 生态系统服务依赖于不同时空尺度的生态与地理系统过程, 这使生态系统服务具有尺度效应。Aziz 等人的研究表明不同分辨率数据对结果影响约为 2%, 土地利用类型二级类归为一级类的类别汇总过程对 ESV 评估结果有更大影响^[2], 例如林地由不同繁茂程度的植被区分, 植被影响着多种生态过程, 在碳汇、水源涵养和水土保持等生态系统服务中的发挥的能力不一样, 故精细区分生态系统类型与服务类型, 并考虑区位差异化因素, 才能得到更加准确的评估结果, 因此尺度效应、区域差异和生态服务精细化分类, 以及生态过程和参数也是下一步需要深入研究的问题。总之, 尽管 ESV 估算与预测过程中存在着较多的不确定性和争议性, 但本研究的探索为喀斯特城市群生态系统服务价值评估与生态补偿工作提供了一定的参考依据。

4.2 结论

(1) Markov-FLUS 模型具有较好的适应性, 模型模拟平均 Kappa 系数为 0.853 4, 平均 Fom 系数为 0.154 6, 在统计学意义上达到较好的精度。

(2) 黔中城市群生态系统类型占比最高的分别为耕地和林地 (分别约为 41% 和 39%), 2000—2020 年耕地和草地分别减少约 5.09 万和 6.31 万 hm², 人造地表对耕地 (53%)、林地 (12%) 和草地 (10%) 的侵占比例较高。

(3) 黔中城市群不同类型生态服务平均占比为: 调节服务 (71.08%) > 支持服务 (23.59%) > 文化服务 (4.51%) > 供给服务 (0.82%)。

(4) ESV 整体呈现先升后降的趋势, 自然发展情景下 2030 年 ESV 值为 592.11 亿元, 生态约束情景下 ESV 值为 589.06 亿元, 水域与林地生态系统变化对于整体 ESV 的影响较大。

(5) ESV 空间分异影响因子解释力大小为:区县面积(0.79) > 农林牧渔增加值(0.51) > 第一产业增加值(0.50) > GDP(0.41) > 人均 GDP(0.30) > 建成区面积(0.09) > 常住人口(0.04), 区县面积、农林牧渔增加值和第一产业增加值与 ESV 呈显著正相关, 人均 GDP 与 ESV 呈现显著负相关, 因子交互对于 ESV 具有非线性增强和双因子增强解释作用。

参考文献(References):

- [1] Costanza R, de Groot R, Sutton P, et al. Changes in the global value of ecosystem services[J]. *Global Environmental Change*, 2014, 26: 152-158.
- [2] Aziz T, Nimubona A D, Van Cappellen P. Comparative valuation of three ecosystem services in a Canadian watershed using global, regional, and local unit values[J]. *Sustainability*, 2023, 15(14): 11024.
- [3] 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.
- [4] Sharma S, Hussain S, Singh A N. Impact of land use and land cover on urban ecosystem service value in Chandigarh, India: A GIS-based analysis[J]. *Journal of Urban Ecology*, 2023, 9(1): juac030.
- [5] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究[J]. *生态学报*, 1999, 19(5): 607-613.
Ouyang Z Y, Wang X K, Miao H. A primary study on Chinese terrestrial ecosystem services and their ecological-economic values[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(5): 607-613.
- [6] 周鹏, 周婷, 彭少麟. 生态系统服务价值测度模式与方法[J]. *生态学报*, 2019, 39(15): 5379-5388.
Zhou P, Zhou T, Peng S L. Measurement modalities and methodologies of ecosystem services valuation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(15): 5379-5388.
- [7] 韩然, 叶长盛. 珠江三角洲典型基塘生态系统服务价值演变: 以佛山市为例[J]. *热带地理*, 2020, 40(3): 562-574.
Han R, Ye C S. Evolution of ecosystem service value of typical dike-pond in the Pearl River Delta: A case study of Foshan[J]. *Tropical Geography*, 2020, 40(3): 562-574.
- [8] Schenau S, van Berkel J, Bogaart P, et al. Valuing ecosystem services and ecosystem assets for The Netherlands[J]. *One Ecosystem*, 2022, 7: e84624.
- [9] 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.
- [10] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J]. *自然资源学报*, 2008, 23(5): 911-919.
Xie G D, Zhen L, Lu C X, et al. Expert knowledge based valuation method of ecosystem services in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(5): 911-919.
- [11] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 等. 中国生态系统服务的价值[J]. *资源科学*, 2015, 37(9): 1740-1746.
Xie G D, Zhang C X, Zhang C S, et al. The value of ecosystem services in China[J]. *Resources Science*, 2015, 37(9): 1740-1746.
- [12] 刘志涛, 王少剑, 方创琳. 粤港澳大湾区生态系统服务价值的时空演化及其影响机制[J]. *地理学报*, 2021, 76(11): 2797-2813.
Liu Z T, Wang S J, Fang C L. Spatiotemporal evolution and influencing mechanism of ecosystem service value in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(11): 2797-2813.
- [13] 封清, 周忠发, 陈全, 等. 基于易地扶贫搬迁视角的喀斯特生态脆弱区生态系统服务价值的时空演变[J]. *生态学报*, 2022, 42(7): 2708-2717.
Feng Q, Zhou Z F, Chen Q, et al. Spatial-temporal evolution research of ecosystem service value in ecologically vulnerable Karst regions under the perspective of poverty alleviation relocation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(7): 2708-2717.
- [14] Kulaixi Z, Chen Y N, Wang C, et al. Spatial differentiation of ecosystem service value in an arid region: A case study of the Tarim River Basin, Xinjiang[J]. *Ecological Indicators*, 2023, 151: 110249.
- [15] 韩会庆, 苏志华. 喀斯特生态系统服务研究进展与展望[J]. *中国岩溶*, 2017, 36(3): 352-358.
Han H Q, Su Z H. Research progress and prospects of Karst ecosystem services[J]. *Carsologica Sinica*, 2017, 36(3): 352-358.
- [16] 黄木易, 岳文泽, 方斌, 等. 1970—2015 年大别山区生态系统服务价值尺度响应特征及地理探测机制[J]. *地理学报*, 2019, 74(9): 1904-1920.
Huang M Y, Yue W Z, Fang B, et al. Scale response characteristics and geographic exploration mechanism of spatial differentiation of ecosystem service values in Dabie Mountain Area, central China from 1970 to 2015[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(9): 1904-1920.
- [17] Liang X, Liu X P, Li X, et al. Delineating multi-scenario urban growth boundaries with a CA-based FLUS

- model and morphological method[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2018, 177: 47-63.
- [18] 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.
- [19] 李立, 胡睿柯, 李素红. 基于改进 FLUS 模型的北京市低碳土地利用情景模拟[J]. *自然资源遥感*, 2023, 35(1): 81-89.
- Li L, Hu R K, Li S H. Simulations of the low-carbon land use scenarios of Beijing based on the improved FLUS model[J]. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2023, 35(1): 81-89.
- [20] 张晓瑶, 张潇, 李冬花, 等. 城市土地利用变化对生态系统服务价值影响的多情景模拟: 以深圳市为例[J]. *生态学报*, 2022, 42(6): 2086-2097.
- Zhang X Y, Zhang X, Li D H, et al. Multi-scenario simulation of the impact of urban land use change on ecosystem service value in Shenzhen[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(6): 2086-2097.
- [21] 谢凌凌, 许进龙, 臧俊梅, 等. 基于 Markov-FLUS 模型的广西土地利用变化模拟预测[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(2): 249-254, 264.
- Xie L L, Xu J L, Zang J M, et al. Simulation and prediction of land use change in Guangxi based on Markov-FLUS model[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(2): 249-254, 264.
- [22] 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.
- [23] 袁雪. 基于 PLUS 模型的武汉市土地利用变化情景模拟与景观生态风险研究[D]. 抚州: 东华理工大学, 2022.
- Yuan X. Scenario Simulation of land use change and landscape ecological risk research in Wuhan based on PLUS model[D]. Fuzhou: East China Institute of Technology, 2022.
- [24] 周寒冰, 王志泰, 王志杰, 等. 喀斯特山地城市生态系统服务价值地形梯度响应: 以贵阳市中心城区为例[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(6): 337-347.
- Zhou H B, Wang Z T, Wang Z J, et al. Response of ecosystem service value of Karst mountainous city to terrain gradient—a case study of downtown of Guiyang city[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(6): 337-347.
- [25] 韩会庆, 刘悦, 蔡广鹏, 等. 快速城镇化背景下山地城市生态系统服务价值变化梯度特征: 以贵阳市为例[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(5): 295-303.
- Han H Q, Liu Y, Cai G P, et al. Characteristics of gradient change of the value of mountain ecosystem services with the rapid urbanization in urban area: A case study of Guiyang[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(5): 295-303.
- [26] 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 Tibetan Plateau[J]. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(2): 189-196.
- [27] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.
- Wang J F, Xu C D. Geodetector: Principle and prospective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134.