

DOI: 10.5846/stxb202005161250

冯源, 朱建华, 曾立雄, 肖文发. 县域土地利用变化下生态系统服务价值损益预测——以重庆市巴南区为例. 生态学报, 2021, 41(9): 3381-3393.

Feng Y, Zhu J H, Zeng L X, Xiao W F. Prediction of profit and loss of county-scale ecosystem service values under land use change: A case study of Banan District, Chongqing. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(9): 3381-3393.

县域土地利用变化下生态系统服务价值损益预测 ——以重庆市巴南区为例

冯 源¹, 朱建华^{1,2}, 曾立雄^{1,2}, 肖文发^{1,2,*}

1 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所 国家林业和草原局森林生态环境重点实验室, 北京 100091

2 南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 南京 210037

摘要: 土地利用/覆被变化是全球变化的研究热点, 评估县域土地利用变化对生态系统服务价值损益的影响对促进生态环境保护和推动城乡区域协调发展具有重要意义。基于重庆市巴南区 2000 年以来连续 5 期遥感影像及 CLUE-S 模型, 量化土地利用变化对生态系统服务价值的影响并预测 2020—2030 年服务价值损益的时空动态。结果表明 2000—2020 年巴南区土地利用变化主要表现为耕地持续转化为其他用地类型和林地面积的大幅增长, 该趋势将在未来 10 年内延续。2000—2030 年耕地占巴南区面积的比例下降了 39.58%, 而林地占比将增长 28.86% 并在 2025 年后取代耕地成为最主要的地类; 建设用地、水域和未利用地面积占比分别增长 8.29%、2.25% 和 0.18%。土地利用类型变化下巴南区生态系统服务价值在 2000—2020 年由 11.69 亿元增长到 27.64 亿元, 并将持续增长至 2030 年的 30.19 亿元。耕地和林地转化为建设用地、耕地转化为林地 (尤其是转化为针叶林和针阔混交林) 分别是服务价值损失及增益的主要方式。2000—2030 年巴南区生态系统服务价值总损失 0.58 亿元、总增益 19.09 亿元, 净增益 18.50 亿元。土地利用结构变化和生态系统服务当量因子价值升高分别贡献了净增益的 70.96% 和 29.04%。巴南区生态系统服务价值损益与地形密切相关。2000—2030 年间巴南区生态系统服务价值由匀质分布逐渐形成北低南高的发展格局; 价值损益在全局和局域尺度上均呈现出显著的正向空间自相关特性。巴南区现有的土地利用模式能够兼顾经济发展及生态环境保护两方面的需求。未来需要继续实行生态保护工程、合理规划城市用地边界、严守耕地红线以推动城乡区域协调发展。

关键词: 土地利用变化; 生态系统服务价值损益; 空间自相关; 县域

Prediction of profit and loss of county-scale ecosystem service values under land use change: A case study of Banan District, Chongqing

FENG Yuan¹, ZHU Jianhua^{1,2}, ZENG Lixiong^{1,2}, XIAO Wenfa^{1,2,*}

1 Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China

2 Co-innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

Abstract: Land use/cover change is a hot issue in the global change field, and it is of profound significance to assess the impact of county-scale land use change on ecosystem service values to promote eco-environmental protection and evolve the coordinated development of urban and rural areas. Based on CLUE-S model and five consecutive remote sensing images of Banan District of Chongqing from 2000 to 2020, this study predicted the spatial-temporal dynamics of the profit and loss of ecosystem service values under land use change in the next 10 years, quantified the effect of land use change on the service value. The results showed that the dominant land use change in Banan District was continuous conversion of farm land to

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金 (CAFYBB2019ZD001); “十二五”国家科技支撑计划课题 (2015BAD07B04)

收稿日期: 2020-05-16; **网络出版日期:** 2021-03-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiaowenf@caf.ac.cn

other land types with forest area increasing significantly, and this trend would continue for the next 10 years. From 2000 to 2030, the proportion of farm land in Banan District will decrease by 39.58%, while the proportion of forest land will increase by 28.86% and will replace the farm land as the most main land use type after 2025. The proportions of construction land, water area and unused land area will increase by 8.29%, 2.25% and 0.18%, respectively, during the simulation. Ecosystem service value of Banan District increased from 1.169 billion RMB to 2.764 billion RMB from 2000 to 2020, and would continue to increase till 2030 by 3.019 billion RMB. The conversions of both farm land and forest land into construction land, and the conversion of farm land into forest land (especially the conversion of farm land into coniferous forest and coniferous and broad-leaved mixed forest) are main paths of the loss and gain of service values, respectively. From 2000 to 2030, ecosystem service value of Banan District will totally lose 0.058 billion RMB and will totally gain 1.909 billion RMB at the same time, which leads to a net increment of gain by 1.850 billion RMB. Changes of land use structure and the increment of the values of equivalent factors contribute 70.96% and 29.04% of the net gain values, respectively. The profit and loss of ecosystem service values in Banan District are closely linked to the topography. The values of ecosystem service in Banan District gradually form a development pattern of lower in the north and higher in the south from 2000 to 2030. The profit and loss of service values in Banan District have significantly spatial autocorrelation characteristics at both global and local scale, with low values concentrated in the northwestern part with low-altitude, while high values concentrated in the central-south and southeastern regions with high-altitude. The existing land use pattern of Banan District can take into account both economic development and eco-environmental protection needs. There is still a need to carry out ecological engineering continually and design the urban land boundary rationally, as well as strictly observe the red line of cultivated land to promote the coordinated development of urban and rural areas in the future.

Key Words: land use change; the profit and loss of ecosystem service values; spatial autocorrelation; county-scale

生态系统服务指人类从生态系统结构、过程和功能直接或间接得到的产品或惠益^[1]。以货币形式评估的生态系统服务价值(Ecological services value, ESV)是生态功能区划、环境保护及生态补偿的重要指标^[2-3]。土地利用/覆被变化(Land use and land use change, LUCC)是全球变化的重要驱动力,通过影响生态系统格局与过程,改变生态系统服务的提供能力,最终导致生态系统服务价值发生变化^[4-6]。量化土地利用变化对区域生态系统服务的影响有助于优化配置土地资源和宏观调控、全面认识生态环境变化趋势并促进区域可持续发展^[7-8]。

国内外相关研究已从最初基于土地利用数量描述生态系统服务价值^[9-10]发展到应用多种指标、多种模型定量评价土地利用强度变化对生态系统服务的影响^[7,11],并且随着精细尺度的研究需求不断增强,研究者的关注范围也从全国^[12]、省级^[5]或区域^[6]尺度逐渐转向较小的空间尺度^[4,13-14]。Chen 等^[4]研究了 1995—2015 年全国县域生态系统服务强度与土地利用变化之间的联系;郭椿阳等^[13]基于格网探究了 1990—2015 年伏牛山区土地利用变化对生态服务价值的影响;雷军成等^[14]基于 Landsat TM/OLI 影像及当量因子法评估了 1995—2016 年江西省寻乌县生态系统服务价值的变化。县域是我国最基本的行政单元^[15],近年来针对县域土地利用变化及生态系统服务价值方面的研究不断增多^[14-17],但仍存在不足:(1)往往仅从数量上描述时间序列下土地利用变化造成的生态系统服务价值变化,缺乏对生态系统服务价值损益进行空间分析;(2)仅对一级地类进行分析,缺乏对同一地类内部生态系统服务质量差异进行描述;(3)多集中于生态系统服务价值现状评估,不能预测未来的价值损益动态,导致人们对未来县域精细尺度下生态系统服务价值损益的变化规律仍不清楚。

目前预测未来土地利用变化的方法主要有三种,分别是经验统计模型、元胞自动机和系统动力学模型^[16,18-19],其中 CLUE-S 模型(Conversion of land use and its effects at small regional extent)是发展较为成熟且应用最广泛的经验模型,它基于土地利用与驱动要素的关系、对各种地类竞争及空间分配进行系统模拟,适用于

中小尺度研究,而且具有较高的解释力与可信度^[16,20-21]。该模型对县域土地利用变化的预测是量化未来生态系统服务价值损益时空动态的基础。

作为国家中心城市,重庆市在城镇化推进过程中面临着日益严重的环境保护压力,其中巴南区是重庆市主城九区中面积最大、城镇与农村发展相互作用最剧烈的区域^[22],选择该区作为研究对象对了解县域尺度土地利用变化下生态系统服务价值损益的时空动态具有典型意义。基于 2000 年以来连续 5 期遥感影像及 CLUE-S 模型所预测出的未来 10 年巴南区 8 种土地利用类型的变化,评估 2000—2030 年巴南区生态系统服务价值损益的时空动态、构建影响了强度模型度量土地利用变化对生态系统服务价值的影响,旨在评估精细尺度下生态系统服务损益时空动态、提供科学合理的县域土地资源优化配置方案、推动城乡区域协调发展,统筹中、小尺度国土空间规划并促进社会经济及生态的可持续发展。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域

巴南位于重庆市西南部(106°26'2"—106°59'53"E、29°7'44"—29°45'43"N),东接重庆市涪陵区和南川区,南连綦江区,西邻江津区、九龙坡区、大渡口区,北傍南岸区、江北区、渝北区和长寿区(图 1)。巴南区东西横距 46 km,南北纵距 70 km,总面积 $1.83 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。巴南区地貌复杂多样,以丘陵和低山为主,平地极少;地形起伏较大,海拔范围为 154—1133 m;年平均气温为 18.7℃,年均降水量为 1000—1200 mm,日照 1100—1300 h;无霜期大于 300 d,属于亚热带湿润气候。全区生态环境良好,森林覆盖率达 47.6%,拥有树种 227 种,动物资源近百种,并具有丰富的水资源与矿产资源。

1.2 数据来源

本文以 2000—2020 年连续 5 期土地利用/覆被数据为主要数据源。该数据来源于 Landsat TM/ETM+/OLI 遥感影像(<http://glovis.usgs.gov/>),空间分辨率为 30 m,利用 Erdas 9.2 软件进行波段组合、几何校正、辐射校正、裁剪等预处理,采用人机交互式目视解译。根

据 IGBP、FAO 及马里兰大学的全球土地利用分类体系,划分为水域、建设用地、未利用地、耕地和林地 5 种土地利用类型;同时结合巴南区土地利用/覆被特点和研究需求,又将林地划分出针叶林、针阔混交林、灌木林和常绿阔叶林这 4 种二级地类。基于森林资源调查、固定样地等实测数据,应用随机样点进行精度验证,所有影像的总体分类精度均高于 85%,能够满足研究需求。海拔及地形数据来自地理空间数据云的 SRTMDEM 数据(<http://www.gscloud.cn>),空间分辨率为 30 m。该区城镇居民点、道路数据来源于国家基础地理信息中心(<http://www.ngcc.cn/>),将这些作为预测未来土地利用格局变化的驱动要素。巴南区主要农作物类型、总产量、播种面积及价格等数据来源于《重庆市统计年鉴》^[23],并结合 2000—2015 年《全国农产品成本收益资料汇编》^[24]估算生态系统服务价值当量。

1.3 CLUE-S 模型应用

1.3.1 模型介绍

CLUE-S 由荷兰瓦赫宁根大学研究团队开发,基于每种土地利用类型与多个驱动因素的经验关系,对研究区内所有地类进行明确的空间分配,适宜于精细尺度土地利用变化的研究^[20-21],主要步骤如下。

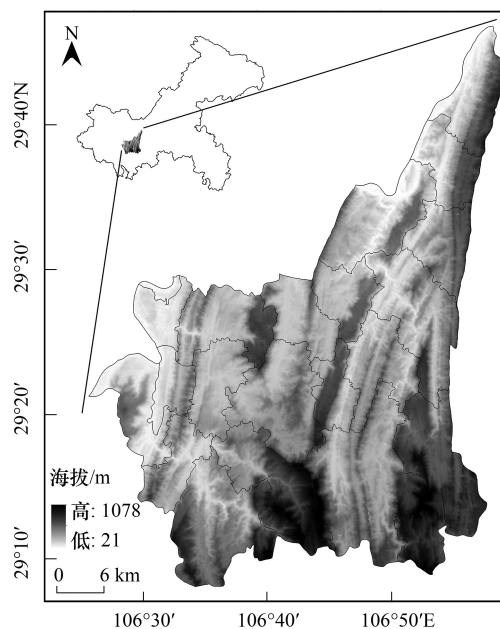


图 1 巴南区位置及乡镇区划

Fig.1 Location and township division of Banan District

①基于 2000—2020 年巴南区土地利用历史变化趋势,应用马尔科夫链模型估算 2025—2030 年各类土地利用类型的面积。马尔科夫链模型是基于时间序列的随机过程,广泛应用于地学数值模拟^[18]。根据巴南区现有土地利用类型集合 $X(t)$ 预测未来各地类集合状态 $X(t+n)$,基本形式为:

$$X(t+n) = X(t) \times P_{ij}^n \tag{1}$$

式中 n 为时间步长; P_{ij} 为土地利用转移概率矩阵。

②设置土地利用转化规则及转化弹性。根据巴南区现有土地利用变化规律设置土地利用转化规则,将历史时段时内不同土地类型间发生过转化情况赋值为 1,将不同地类间未发生过转化情况赋值为 0^[16]。弹性系数描述了不同地类转化的稳定性,参考重庆市主城区已有的研究成果^[25]并经过多次模拟调试,确定巴南区水域、建设用地、未利用地、耕地、林地(含所有二级地类)的弹性系数分别为 0.9、0.7、0.5、0.5、0.6。

③选择地形因子(海拔、坡度、坡向)和区位因子(距道路距离、距城镇距离)作为驱动力对各地类进行 Logistic 回归(表 1),得到各地类在空间某点的分布概率($P_{i,u}$)。

④根据分布概率、弹性系数以及迭代系数得到的总概率对各地类进行空间分配,公式如下。

$$TPROP_{i,u} = P_{i,u} + ELSA_u + ITER_u \tag{2}$$

式中,TPROP_{*i,u*}为栅格 i 是土地利用类型 u 的总概率; $P_{i,u}$ 为 Logistic 回归求得的空间分布概率;ELAS_{*u*}为土地利用类型 u 的弹性系数;ITER_{*u*}为迭代系数。

表 1 巴南区土地利用类型与驱动因子的 Logistic 回归方程及 ROC 值
Table 1 Logistic regression of land-use types and drivers with the ROC values of Banan District

驱动因子 Driver	水域 Water	建设用地 Construction land	未利用地 Unused land	耕地 Farm land	林地 Forest land			
					针叶林 Coniferous forest	针阔混交林 Coniferous and broad-leaved mixed forest	灌木林 Shrub	常绿阔叶林 Evergreen broad- leaved forest
海拔 Altitude	-0.0131	-0.0039	-0.0056	-0.0015	0.0025	-0.0005	0.0053	0.0032
坡向 Aspect	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0010	0.0020	0.0008	-0.0036	-0.0023
坡度 Slope	-0.2858	-0.1122	-0.1658	-0.0284	0.0256	0.0491	0.0796	0.0648
距道路距离 Distance from the roads	0.0004	-0.0005	0.0000	-0.0001	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000
距城镇距离 Distance from the towns	0.0000	-0.0008	-0.0008	0.0000	0.0001	0.0000	0.0001	0.0000
常量 Constant	1.1224	0.5977	-0.7020	1.0805	-3.3251	-2.3265	-6.5020	-5.3666
R^2	0.2971	0.2859	0.2099	0.0369	0.0863	0.1195	0.1857	0.0723
ROC	0.8831	0.8661	0.8848	0.7032	0.6935	0.7901	0.8161	0.7183

巴南区 8 种土地利用类型与驱动因素的逐步回归结果表明所有土地利用类型均与坡度的关系最密切,同时所有土地利用类型回归模型的 ROC(Relative operating characteristics)曲线面积接近或大于 0.7,表明逐步回归模型能够较好地解释巴南区不同地类的发生概率。

1.3.2 马尔科夫链模拟检验及 CLUE-S 模拟结果检验

应用卡方检验对马尔科夫链所预测的未来各种土地利用面积结果进行验证。使用历史土地利用转移概率矩阵估算 2020 年巴南区各地类面积,并与其真实土地利用格局进行比较(图 2),应用 Kappa 系数检验各种地类空间分布格局预测的准确性。卡方检验结果和 Kappa 系数分别由公式(3)和公式(4)计算得到。

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \tag{3}$$

$$Kappa = (P_a - P_c) / (P_p - P_c) \tag{4}$$

式中, O_i 为观测值, E_i 为模拟值, $\bar{E}_i$ 为模拟期望; P_a 为正确模拟的比例; P_c 为随机情况期望模拟比例; P_p 为理想情况下正确模拟比例。

根据公式(3)得到卡方值为 0.0044, 小于 $\chi^2_{0.95(4)} = 9.49$, 即预测值与观测值差异不显著, 认为马尔科夫链预测的未来各种土地利用类型面积准确可靠。计算得到 Kappa 系数为 0.8835, 即模拟精度为 88.35%, 高于 80% 的检验标准。CLUE-S 能够较准确地预测巴南区未来土地利用变化的空间格局, 结果合理可信。

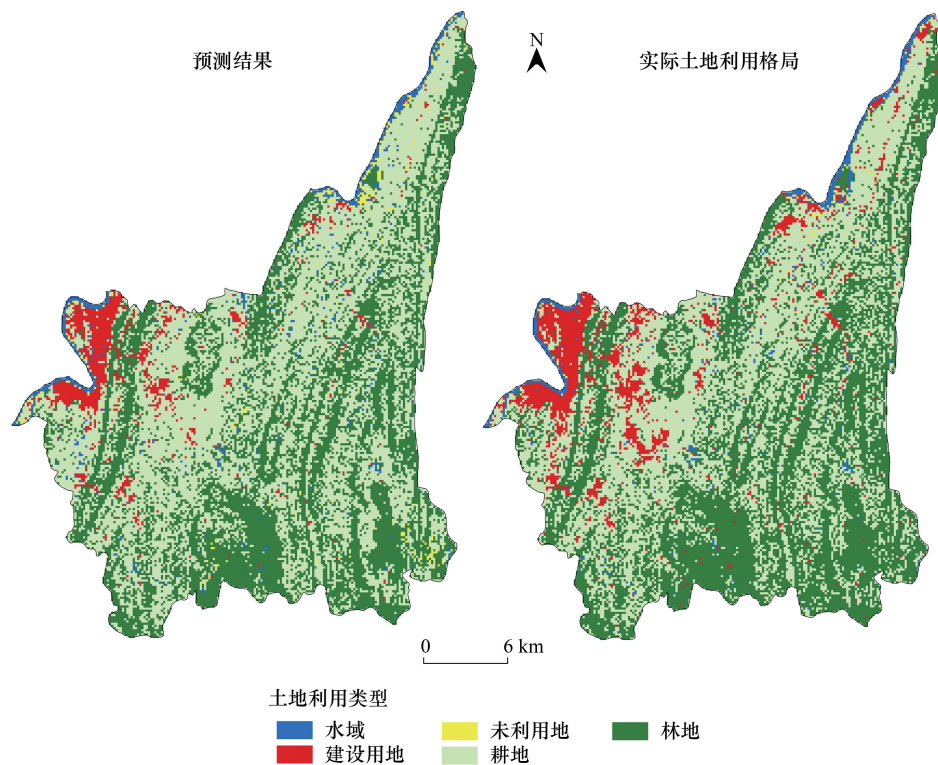


图2 CLUE-S 预测结果及巴南区实际土地利用格局对比

Fig.2 Comparison of CLUE-S simulated result with the real land-use pattern of Banan District

1.4 生态系统服务价值评估

参考谢高地等^[3,26]所提出中国陆地各种生态系统类型单位面积生态系统服务价值当量及生态经济学方法^[27](公式 5—6), 构建了巴南区不同土地利用类型的各项生态系统服务价值当量表(表 2)。建设用地可提供的生态系统服务价值很低, 不参与计算^[28]。生态系统服务价值当量因子的经济价值为当年全国平均粮食市场价值的 1/7^[26]。由《重庆市统计年鉴》^[23]和《全国农产品成本收益资料汇编》^[24]得到 2000—2015 年全国粮食平均出售价格范围为 1098.80—2325.60 元/t, 此期间全国与巴南区单位面积粮食产量范围分别为 4.16—7.01 t/hm²、3.68—3.89 t/hm², 获得巴南区生物量修正因子为 0.56—0.88。由于目前尚未能获得 2020 年粮食产量及价格数据, 因此在 2020—2030 年也以 2015 年的当量因子价值进行估算, 确保未来生态系统服务价值评估与历史时段结果具有可比性。同时为消除物价变动对生态系统服务价值评估的影响, 本文使用居民消费价格指数(Consumer price index, CPI)以 2015 年为基期, 对 2000—2010 年当量因子价值进行修正^[11], 得到 2000—2030 年巴南区生态系统服务价值的当量因子价值范围为 818.53—1335.56 元(图 3)。

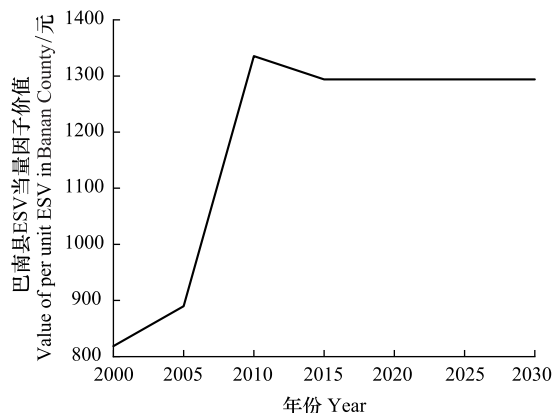


图3 巴南区生态系统服务价值当量因子价值

Fig.3 Per unit value of equivalent of ecosystem service values (ESV) of Banan District

表 2 巴南区不同土地利用类型生态系统服务价值当量

Table 2 The equivalent of ecosystem service values of different land use types in Banan District

生态系统服务 Ecosystem services		水域 Water	建设用地 Construction land	未利用地 Unused land	耕地 Farm land	林地 Forest land			
一级分类 Primary classification	二级分类 Secondary classification					针叶林	针阔 混交林	灌木林	常绿 阔叶林
供给服务 Provisioning services	食物生产	0.51	0.00	0.00	1.17	0.22	0.31	0.19	0.29
	原料生产	0.50	0.00	0.00	0.20	0.52	0.71	0.43	0.66
	水资源供给	2.59	0.00	0.00	-1.66	0.27	0.37	0.22	0.34
调节服务 Regulating services	气体调节	1.90	0.00	0.02	0.95	1.70	2.35	1.41	2.17
	气候调节	3.60	0.00	0.00	0.49	5.07	7.03	4.23	6.50
	净化环境	3.60	0.00	0.10	0.14	1.49	1.99	1.28	1.93
	水文调节	24.23	0.00	0.03	1.82	3.34	3.51	3.35	4.74
支持服务 Supporting services	土壤保持	2.31	0.00	0.02	0.38	2.06	2.86	1.72	2.65
	维持养分循环	0.18	0.00	0.00	0.16	0.16	0.22	0.13	0.20
	生物多样性	7.87	0.00	0.02	0.18	1.88	2.60	1.57	2.41
文化服务 Cultural services	美学景观	4.73	0.00	0.01	0.08	0.82	1.14	0.69	1.06
合计 Total		52.02	0.00	0.20	3.93	17.53	23.09	15.22	22.95

1.5 土地利用变化对生态系统服务价值的影响

使用单一动态度和综合动态度分别描述各种土地利用类型及研究区整体土地利用变化的速率趋势及剧烈程度^[29]。基于土地利用转移矩阵核算得到的生态系统服务价值损益矩阵可揭示服务价值的数量变化特征、增减方向及来源^[7]；应用刘亚茹等^[7]所构建的影响程度指标来评价土地利用变化对服务价值的影响程度（公式 7—10）。为从精细尺度分析 2000—2030 年巴南区生态系统服务价值损益的空间分布格局，本文使用格网作为研究单元对巴南区生态系统服务价值损益做探索性空间分析，了解损益的空间自相关特性。常见的格网尺度有 500 m×500 m、1 km×1 km、3 km×3 km、5 km×5 km 及 10 km×10 km 等^[13,16]。考虑到本文研究尺度精细以及最小可塑性单元对结果的影响，故而增加 120 m×120 m 和 250 m×250 m 这两种尺度，通过分析不同格网尺度下生态系统服务价值损益时空动态及差异，发现以 250 m×250 m 网格尺度的分析结果能够充分体现巴南区生态系统服务价值空间自相关特征，是现有研究尺度、数据量和空间斑块情况下最合适的方案。因此本文将巴南区按 250 m×250 m 大小进行鱼网划分。按照自然断点法将生态系统服务价值损益从高到低分为 5 级，使用 Geoda 软件进行价值损益的全局自相关分析分别计算全局、局部 Moran's *I* 指数及局部 *G_i* 指数。

$$V_{i,k} = \frac{1}{7} \times P \times Q \times D_{i,k} \times B \quad (5)$$

$$ESV = \sum (A_i \times V_{i,k}) \quad (6)$$

$$LP_i = \sum A_i \times (VC_{i,k} - VC_{i,k'}) \quad (7)$$

$$DY_i = \frac{L_{i,t_2} - L_{i,t_1}}{L_{i,t_1}} \times \frac{1}{t_2 - t_1} \times 100\% \quad (8)$$

$$DY_i = \frac{\left| \frac{\sum_{i=1}^n \Delta L_{i-j}}{2 \sum_{i=1}^n L_i} \right|}{\frac{1}{t_2 - t_1}} \times 100\% \quad (9)$$

$$IM_i = \frac{\sum (LP_{i,j} + LP_{j,i})}{2LP} \times 100\% \quad (10)$$

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j \neq 1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq 1}^n w_{ij}} \quad (11)$$

$$I_i = \frac{(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_j - \bar{x})}{S^2} \quad (12)$$

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_i (x_i - \bar{x})^2 \quad (13)$$

$$G_i = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} x_j}{\sum_{j \neq 1} x_j} \quad (14)$$

式中, $V_{i,k}$ 为生态系统服务当量价值(元); P 为粮食平均价格(元/kg); Q 为粮食平均产量(kg/hm²); $D_{i,k}$ 为第 i 类生态系统第 k 项服务功能的当量因子; B 为生态系统服务当量因子调整系数, 巴南区为 0.671; ESV 为生态系统服务价值(元); A_i 为土地利用类型 i 面积(hm²); LP 为生态系统服务价值损益(元); $VC_{i,k}$ 、 $VC_{i,k'}$ 分别为第 i 种土地利用类型的第 k 种生态系统服务在土地利用转变前和转变后的生态系统服务价值当量价值(元/a); DY_i 为单一土地利用动态度(%); L_{i,t_1} 、 L_{i,t_2} 分别为土地利用类型 i 在 t_1 年、 t_2 年的面积(hm²); DY_i 为综合土地利用动态度(%); ΔL_{i-j} 是 t_1 到 t_2 年期间第 i 类土地利用类型转化为非 i 类(j 类)土地利用类型面积(hm²); IM_i 为土地利用变化对生态系统服务价值影响程度(元); $LP_{i,j}$ 为第 i 类土地利用类型转化为第 j 类土地利用类型后生态系统服务价值损益(元); I 、 I_i 分别为全局和局部 Moran's I ; G_i 为局部 G_i 统计量; x_i 为网格 i 在 2000—2030 年的生态系统服务价值损益值(元/hm²); $\bar{x}$ 是所有网格内生态系统服务价值损益平均值(元/hm²); w_{ij} 为网格 i 与网格 j 之间的空间权重, n 为网格个数; S 为网格 i 的生态系统服务价值损益方差。

2 结果分析

2.1 巴南区土地利用变化

2000—2020 年巴南区耕地面积由 1.39×10^5 hm² 减少了 38.77% (图 4)。减少的耕地 76.32% 转化为林地、17.97% 转化为建设用地; 转化为水域和未利用地的比例最低, 分别为 4.82% 和 0.88%。由于耕地的转化, 林地面积增长最多 (4.1×10^4 hm²), 未利用地增加最少 (472.0 hm²)。CLUE-S 模型预测上述土地利用变化趋势将在未来 10 年内延续。2020—2030 年耕地继续减少 1.85×10^5 hm², 其中 63.01% 转化为林地, 29.62% 转化为建设用地。2000—2030 年耕地占巴南区面积的比例由 75.99% 降低到 36.41%, 而林地占比增长了 28.86% 并将在 2025 年后取代耕地成为最主要的土地利用类型, 其中针叶林、灌木林、针阔混交林和常绿阔叶林的面积占巴南区面积比例增长依次降低, 分别增长了 13.42%、7.15%、7.07% 和 1.22% (图 4); 建设用地和水域的比重分别增长 8.29% 和 2.25%; 未利用地占比最小, 其所占比重仅增长 0.18%。

2000—2010 年是巴南区土地利用变化最为剧烈的时期, 土地利用综合动态度由 0.67% 增加到 1.08% (图 5), 主要来源于建设用地和林地的迅速增长, 其中建设用地单一动态度最高, 由 12.16% 增加到 29.29% (图 5), 林地单一动态度也较高 (4.94%—6.40%), 说明建设用地和林地是转化最显著的两种土地利用类型。此后巴南区土地利用变化速率放缓。2020 年以后所有土地利用的单一动态度均趋于平缓, 综合动态度在 2025—2030 年最低 (0.48%)。2000—2030 巴南区建设用地、水域、林地、未利用地和耕地的单一动态度依次降低, 分别为 41.58%、5.26%、4.55%、0.83% 和 -1.74%; 耕地的单一动态度始终小于 0, 即耕地持续转化为其他土地利用类型。

2.2 巴南区生态系统服务价值变化

2000—2020 年巴南区生态系统服务价值由 11.69 亿元增长到 27.64 亿元 (表 3), 此后仍逐渐增长, 到

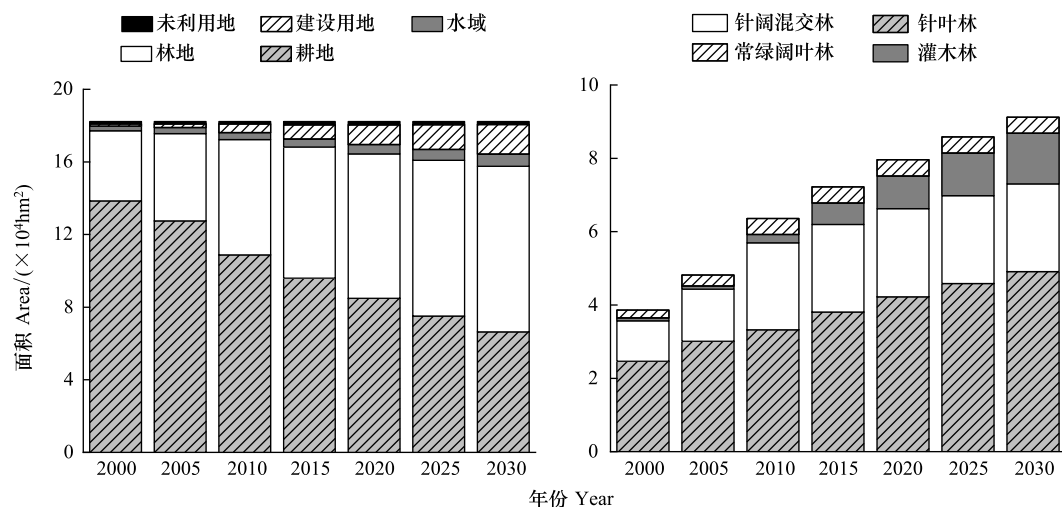


图4 2000—2030年巴南区不同土地利用类型面积变化

Fig.4 Area changes of different land use type of Banan District during 2000 to 2030

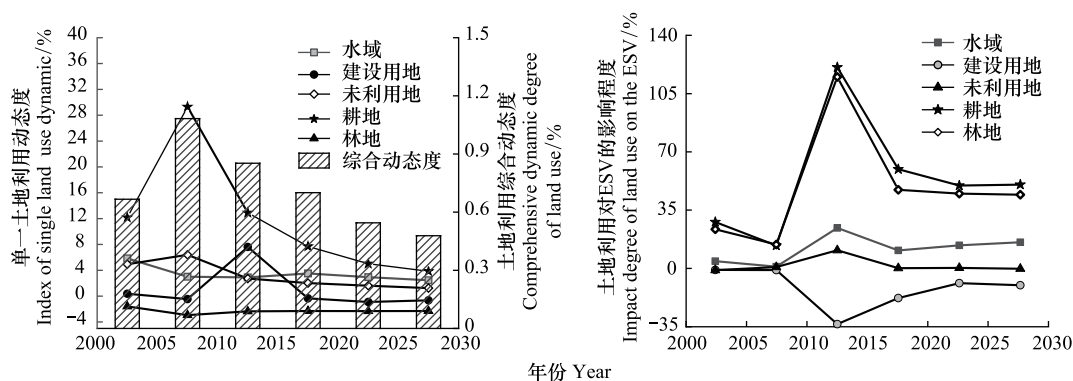


图5 巴南区土地利用动态度及其对生态系统服务价值的影响程度

Fig.5 Dynamics degrees of different land use types and the influence on ecosystem services values of Banan District

2030 年达到 30.19 亿元。耕地生态系统服务价值在 2010 年达到最大值 5.71 亿元,此后逐渐降低至 3.38 亿元。2000—2030 年林地生态系统服务价值共增长 16.19 亿元,其中针叶林和针阔混交林是巴南区生态系统服务价值增长最多的两种地类,分别增加 7.61 亿元和 5.06 亿元;水体生态系统服务价值增长 3.40 亿元,未利用地生态系统服务价值变化极小。2000—2030 年耕地及林地的面积变化对生态系统服务价值影响最明显(图 5),平均影响程度分别为 32.24% 和 30.18%;水域面积增长对服务价值的影响逐渐增强,而未利用地则基本无影响,二者影响程度分别为 5.60% 和 1.29%;建设用地对服务价值的影响程度为 -2.39%,表明其面积增加将导致生态系统服务价值的降低。2000—2030 年除食物生产的服务价值将减少外(减少量为 0.08 亿元),其他服务价值均增加(表 4)。气候调节价值增量最高,为 4.82 亿元,而维持养分循环价值增量最低,为 0.11 亿元。耕地面积减少引起了食物生产价值持续下降,而林地、水域面积的增长则是其他生态系统服务价值增长的主要原因。

2.3 生态系统服务价值损益时空动态

2000—2030 年巴南区生态系统服务价值损失 0.58 亿元、总增益 19.09 亿元,净增益为 18.50 亿元。耕地、林地转化为建设用地是生态系统服务价值损失的主要来源,分别占全区损失的 80.64% 和 8.42%(表 5);而耕地转化为林地是服务价值增益的最主要方式,贡献全区总增益的 57.84%。土地利用结构变化和当量因子价

值升高共同导致了生态系统服务价值增长,二者分别贡献了净增益的 70.96%和 29.04%。

表 3 巴南区不同土地利用类型生态系统服务价值动态/亿元
Table 3 Variations of ecosystem service values of different land use types of Banan District

年份 Year	水域 Water	未利用地 Unused land	耕地 Farm land	林地 Forest land				小计 Subtotal
				针叶林	针阔混交林	灌木林	常绿阔叶林	
2000	1.11	0.002	4.46	3.54	2.08	0.10	0.40	6.12
2005	1.55	0.002	4.46	4.69	2.92	0.12	0.60	8.34
2010	2.68	0.004	5.71	7.78	7.31	0.46	1.34	16.89
2015	2.97	0.005	4.88	8.63	7.14	1.15	1.31	18.24
2020	3.49	0.005	4.32	9.59	7.17	1.76	1.31	19.83
2025	4.01	0.004	3.82	10.41	7.16	2.29	1.31	21.16
2030	4.50	0.004	3.38	11.14	7.14	2.73	1.29	22.31
2000—2015 变化量 Variations from 2000 to 2015	1.87	0.003	0.42	5.1	5.06	1.05	0.91	12.11
2015—2030 变化量 Variations from 2015 to 2030	1.53	0.003	-1.51	2.51	0	1.58	-0.02	4.07
2000—2030 变化量 Variations from 2000 to 2030	3.40	0.002	-1.08	7.61	5.06	2.63	0.89	16.19

表 4 巴南区不同类型生态系统服务价值动态/亿元
Table 4 Variations of different types of ecosystem service values of Banan District

生态系统服务 Ecosystem services		年份 Year							2000—2030 变化量 Variations from 2000 to 2030
一级分类 Primary classification	二级分类 Secondary classification	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	
供给服务 Provisioning services	食物生产	1.42	1.45	1.95	1.72	1.58	1.45	1.34	-0.08
	原料生产	0.43	0.50	0.83	0.83	0.85	0.87	0.88	0.46
	水资源供给	-1.73	-1.67	-2.01	-1.63	-1.34	-1.08	-0.85	0.87
调节服务 Regulating services	气体调节	1.72	1.95	3.14	3.08	3.12	3.14	3.16	1.44
	气候调节	2.43	3.12	5.89	6.18	6.60	6.95	7.26	4.82
	净化环境	0.76	0.98	1.84	1.94	2.09	2.22	2.34	1.58
	水文调节	3.68	4.28	6.86	6.90	7.20	7.48	7.74	4.06
支持服务 Supporting services	土壤保持	1.22	1.50	2.70	2.79	2.94	3.07	3.18	1.97
	维持养分循环	0.25	0.27	0.40	0.38	0.37	0.37	0.36	0.11
	生物多样性	1.04	1.35	2.51	2.66	2.88	3.08	3.25	2.21
文化服务 Cultural service	美学景观	0.48	0.63	1.17	1.24	1.35	1.45	1.53	1.05
合计 Total		11.69	14.36	25.29	26.10	27.64	29.00	30.19	18.50

2000 年巴南区耕地占绝对优势,使全区生态系统服务价值呈现较为均匀的空间分布格局,仅北部水系及海拔较高的桃子荡山的生态系统服务价值较高。随着时间推移,城镇化发展的压力则使地势平坦的中西部地区耕地转化为建设用地,使生态系统服务低值区由最初零星分布于西部边缘逐渐向中部及北部扩张。同时该区中南部、东南部海拔较高的山区耕地大面积转化为以针叶林为主的林地,使生态系统服务价值明显增加,使全区生态系统服务价值分布格局差异逐渐显现(图 6)。探索性空间分析结果显示(表 6),巴南区生态系统服务价值损益的全局 Moran's *I* 指数及 *P* 值分别为 0.6077、0.001,说明该区生态系统服务价值损益表现为显著的正向空间自相关。若将巴南区由东北到西南划一条对角线,其西侧海拔较低、地势平坦而东侧海拔较高。生态系统服务价值冷点集中在对角线西侧海拔较高的李家沱、花溪街道、南泉街道等地区,表现为“低值-低值”集聚特征和冷点(图 7);而生态系统服务价值增益热点主要分布于对角线东侧海拔较高的石龙镇、石滩

镇、接龙镇、跳石镇南部及安澜镇西侧,呈现“高值-高值”集聚特征。

表 5 2000—2030 年巴南区生态系统服务价值损益矩阵/万元
Table 5 Profit and loss matrix of ecosystem service values in Banan District from 2000 to 2030

2000 年土地利用类型 Land use type in 2000	2030 年土地利用类型 Land use type in 2030					
	水域 Water	建设用地 Construction land	未利用地 Unused land	耕地 Farm land	林地 Forest land	合计 Total
水域 Water	6375.34	209.04	6589.64	19227.40	534.16	32935.58
建设用地 Construction land	-26.45	0.00	-3.25	-4700.01	-490.62	-5220.33
未利用地 Unused land	-26.29	0.48	0.41	-441.42	-123.58	-590.39
耕地 Farm land	0.00	0.00	21.42	12405.56	-4.58	12422.40
林地 Forest land	-12.36	0.00	146.61	110389.13	34955.22	145478.60
合计 Total	6310.26	209.52	6754.83	136880.65	34870.60	185025.86

表 6 巴南区生态系统服务价值损益全局自相关
Table 6 Global spatial autocorrelation of ecosystem service value profit and loss of Banan District

全局自相关 Global spatial autocorrelation	Moran's <i>I</i>	<i>Z</i>	<i>P</i>
2000—2030 年巴南区生态系统服务价值损益 The profit and loss of ecosystem service values in Banan District from 2000 to 2030	0.6077	204.8	0.001

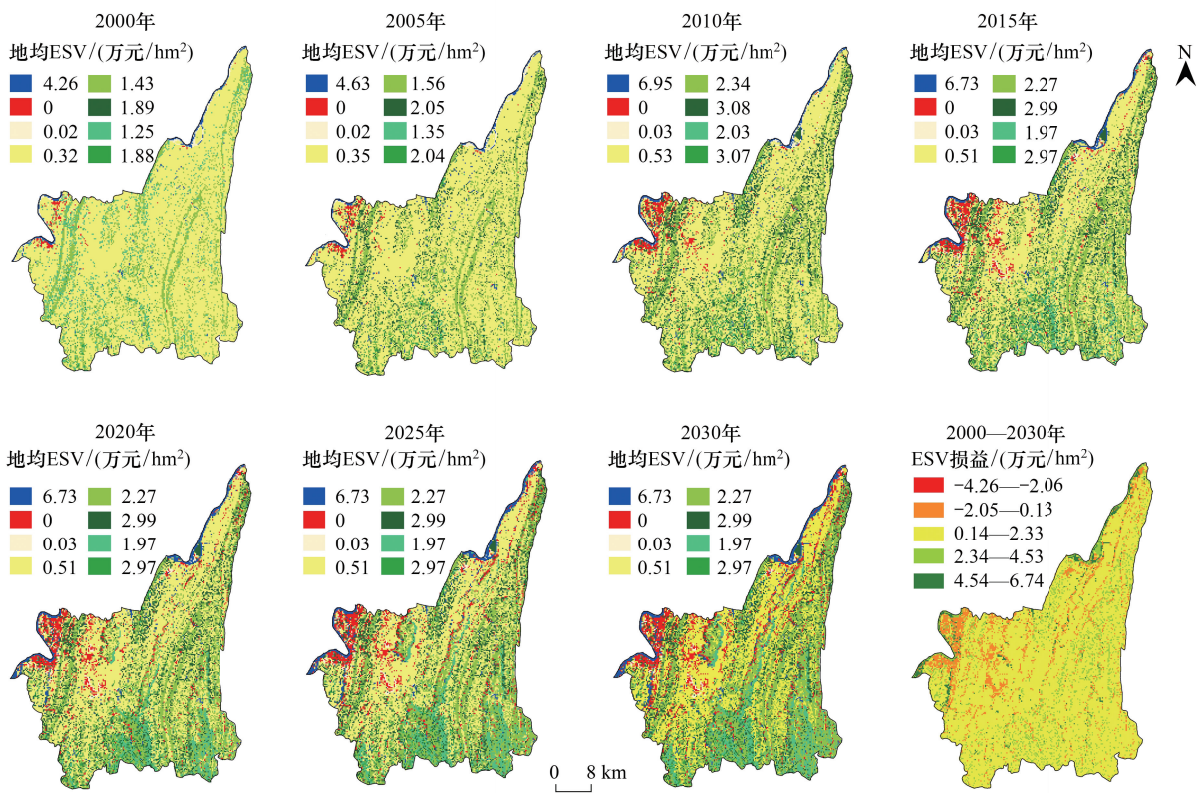


图 6 2000—2030 年巴南区地均生态系统服务价值空间分布格局及损益
Fig.6 Spatial distribution pattern and the profit and loss of ecosystem service values in Banan District

3 讨论

本文基于土地利用变化评估并预测了县域生态系统服务价值损益时空动态,为未来区域土地资源的合理

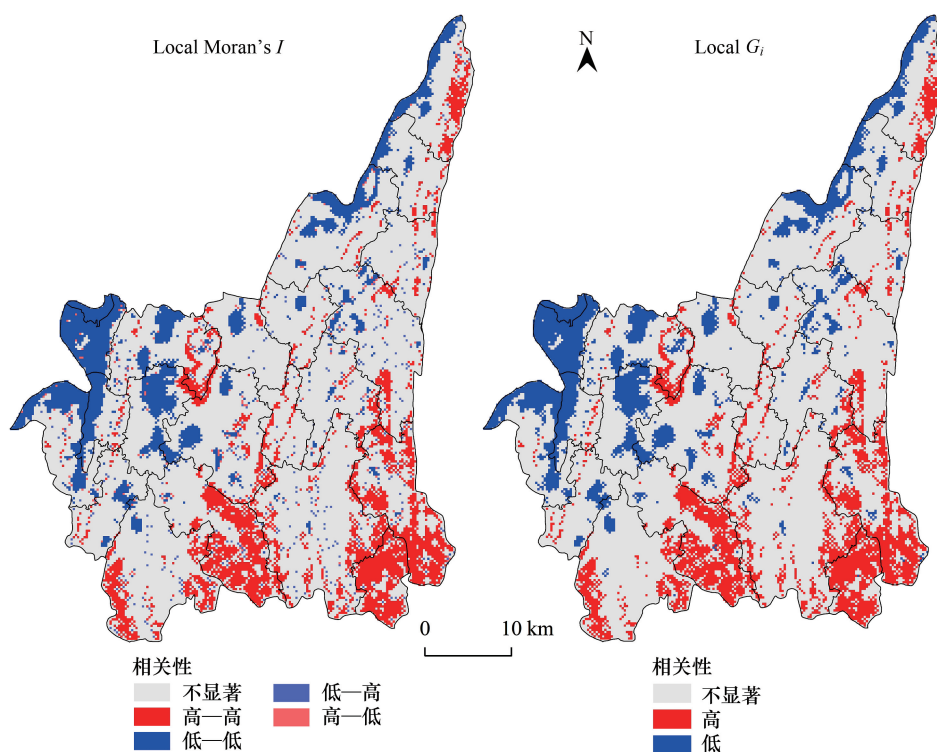


图 7 巴南区生态系统服务价值损益的局域空间自相关分析

Fig.7 Local spatial autocorrelation of the profit and loss of ecosystem service values in Banan District

规划及有效利用提供了科学依据,对保护生态环境和维持区域社会经济发展具有现实的指导意义。过去 20 年间巴南区最明显的变化是耕地持续转化为其他土地利用类型,基于该趋势马尔科夫链模型预测出 2030 年巴南区耕地面积和林地面积分别为 $6.64 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 、 $9.13 \times 10^4 \text{ hm}^2$,符合《巴南区及龙洲湾街道等 22 个镇街土地利用总体规划(2006—2020 年)调整方案》对永久基本农田保护红线($4.66 \times 10^4 \text{ hm}^2$)和生态保护($1.97 \times 10^4 \text{ hm}^2$)的面积规定,表明按现有趋势发展未来巴南区土地利用变化预测合理。

基于 CLUE-S 模型对精细尺度土地利用格局的准确模拟,不仅能够获得未来生态系统服务价值的数量变化,还可直观显示出不同土地利用类型及同一地类内部二级地类的生态系统服务价值损益的空间分异。2000—2030 年巴南区土地利用结构变化导致的价值增长为 13.13 亿元,占净增益的 70.96%;而当量因子价值升高则贡献了净增益的 29.04%。巴南区生态系统服务价值损益与地形密切相关。生态系统服务价值在西部低海拔地区随着城镇化加剧以及耕地转化为建设用地而损失逐渐加剧,而在中南部及东南高海拔地区则随着耕地转化为林地而明显升高,使价值损益在全局和局域尺度上均呈现显著的正向空间自相关特性。与我国同期大部分城市发展导致生态系统服务价值持续减少的情况不同^[7,11],尽管巴南区建设用地逐渐扩张,但林地面积的大幅增长使该区生态系统服务价值增益远高于其损失。这不仅反映出过去十几年间天然林资源保护工程及退耕还林工程的实施能够有效缓解城镇化与生态环境保护的冲突,而且也说明现有土地利用发展模式能够兼顾经济发展及生态环境保护两方面的需求。

县域是介于省市及乡镇之间的中间尺度,优化县域空间布局可有效推动大中城市和小城镇的协调发展。近期在重庆市“一区两群”发展格局规划中巴南区是主城都市区之一,同时也是“国家城乡融合发展试验区”之一,依据本文所得结果可从以下 3 方面优化该区未来空间布局,以构建科学合理的城镇体系:(1)地势较平坦西部及北部地区应提高已有建设用地的利用强度、合理规划城市用地边界以避免减损水域及林地等生态系统服务价值高值区、促进产业结构调整和升级以增强中心城市综合承载能力;(2)南部海拔较高的地区继续

进行退耕还林等生态保护工程、推行造林绿化、加强相邻区县间生态环境保护的联防联控、促进区域生境质量的全面提升;(3)由于耕地面积持续减少会引起食物生产服务的减弱,因此需要严守耕地红线、使用先进技术提高粮食产量和保障粮食安全、搭建城乡产业协同发展平台,推动城乡区域协调发展。

本文局限性主要包含以下 3 个方面:(1)CLUE-S 难以反映政策对土地利用的直接影响,所使用的 Logistic 逐步回归方程所拟合的土地利用类型与驱动因素的关系是单向作用过程,不能反映土地利用类型变化的反馈机制与过程^[30];(2)由于可获得数据及方法的限制,本文未能预测未来生态系统服务当量因子经济价值的变化,仍沿用 2015 年的经济价值进行计算会造成未来生态系统服务价值低估或高估;(3)仅按照当前发展趋势对未来土地利用格局进行预测,未能设置多种土地利用情景进行对比评估。今后需要应用更为准确的生态系统服务价值核算体系进行精细评估,同时需依托各类生态系统定位观测研究站获取连续的自然驱动要素与社会经济数据,设置多种发展模式进行模拟,加强对微观土地利用变化过程与机理的研究、增强对生态系统服务流以及多种生态系统服务权衡与协同关系的认识。

4 结论

基于土地利用变化及 CLUE-S 模型可以直观评价并预测未来县域尺度生态系统服务价值损益时空动态。2000—2030 年巴南区生态系统服务价值损失 0.58 亿元、总增益 19.09 亿元,净增益 18.50 亿元;土地利用结构变化和当量因子价值升高分别贡献了净增益的 70.96% 和 29.04%。耕地、林地转化为建设用地是导致巴南区生态系统服务价值损失的主要途径,而耕地转化为林地则促进生态系统服务价值增益。巴南区生态系统服务价值损益与地形密切相关,呈现显著的正向空间自相关特性。巴南区现有土地利用发展模式能够兼顾经济发展及生态环境保护两方面的需求,但未来仍需实施生态工程、合理规划城市用地边界、严守耕地红线以实现区域长期可持续发展。

参考文献 (References):

- [1] Daily G C, Söderqvist T, Aniyar S, Arrow K, Dasgupta P, Ehrlich P R, Folke C, Jansson A M, Jansson B O, Kautsky N, Levin S, Lubchenco J, Mäler K G, Simpson D, Starrett D, Tilman D, Walker B. The value of nature and the nature of value. *Science*, 2000, 289 (5478): 395-396.
- [2] Vallecillo S, La Notte A, Zulian G, Ferrini S, Maes J. Ecosystem services accounts: valuing the actual flow of nature-based recreation from ecosystems to people. *Ecological Modelling*, 2019, 392: 196-211.
- [3] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 陈文辉, 李士美. 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*, 2015, 30(8): 1243-1254.
- [4] Chen W X, Chi G Q, Li J F. The spatial association of ecosystem services with land use and land cover change at the county level in China, 1995-2015. *Science of the Total Environment*, 2019, 669: 459-470.
- [5] Li F, Zhang S W, Yang J C, Chang L P, Yang H J, Bu K. Effects of land use change on ecosystem services value in West Jilin since the reform and opening of China. *Ecosystem Services*, 2018, 31: 12-20.
- [6] 韩增林, 孟琦琦, 闫晓露, 赵文祯. 近 30 年辽东湾北部区土地利用强度与生态系统服务价值的时空关系. *生态学报*, 2020, 40(8): 2555-2566.
- [7] 刘亚茹, 王聪, 严力蛟. 华北平原农区土地利用变化对生态系统服务的影响——以河南省商丘市为例. *应用生态学报*, 2018, 29(5): 1597-1606.
- [8] Ye Y Q, Bryan B A, Zhang J E, Connor J D, Chen L L, Qin Z, He M Q. Changes in land-use and ecosystem services in the Guangzhou-Foshan Metropolitan Area, China from 1990 to 2010: implications for sustainability under rapid urbanization. *Ecological Indicators*, 2018, 93: 930-941.
- [9] 赵同谦, 欧阳志云, 郑华, 王效科, 苗鸿. 中国森林生态系统服务功能及其价值评价. *自然资源学报*, 2004, 19(4): 480-491.
- [10] 谢高地, 肖玉, 甄霖, 鲁春霞. 我国粮食生产的生态服务价值研究. *中国生态农业学报*, 2005, 13(3): 10-13.
- [11] 荣益, 李超, 许策, 严岩. 城镇化过程中生态系统服务价值变化及人类活动影响的空间分异——以黄骅市为例. *生态学杂志*, 2017, 36(5): 1374-1381.
- [12] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 肖玉, 鲁春霞. 中国生态系统服务的价值. *资源科学*, 2015, 37(9): 1740-1746.
- [13] 郭椿阳, 高尚, 周伯燕, 高建华. 基于格网的伏牛山区土地利用变化对生态服务价值影响研究. *生态学报*, 2019, 39(10): 3482-3493.
- [14] 雷军成, 王莎, 汪金梅, 吴松钦, 游细斌, 吴军, 崔鹏, 丁晖. 土地利用变化对寻乌县生态系统服务价值的影响. *生态学报*, 2019, 39

(9): 3089-3099.

- [15] 游旭, 何东进, 肖赓, 王莉雁, 宋昌素, 欧阳志云. 县域生态保护成效评估方法——以峨山县为例. 生态学报, 2019, 39(9): 3051-3061.
- [16] 赵旭, 汤峰, 张蓬涛, 胡波洋, 徐磊. 基于 CLUE-S 模型的县域生产-生活-生态空间冲突动态模拟及特征分析. 生态学报, 2019, 39(16): 5897-5908.
- [17] 李岩, 王珂, 刘巍, 李燕坤, 王时军, 张大红. 江苏省县域森林生态安全评价及空间计量分析. 生态学报, 2019, 39(1): 202-215.
- [18] Chu L, Sun T C, Wang T W, Li Z X, Cai C F. Evolution and prediction of landscape pattern and habitat quality based on CA-Markov and InVEST model in Hubei Section of Three Gorges Reservoir Area (TGRA). Sustainability, 2018, 10(11): 3854.
- [19] 熊鹰, 陈云, 李静芝, 阎晓静. 基于土地集约利用的长株潭城市群建设用地供需仿真模拟. 地理学报, 2018, 73(3): 562-577.
- [20] 许小亮, 李鑫, 肖长江, 欧名豪. 基于 CLUE-S 模型的不同情景下区域土地利用布局优化. 生态学报, 2016, 36(17): 5401-5410.
- [21] 王清睿, 刘瑞民, 门聪, 郭力嘉. 基于 CLUE-S 的香溪河土地利用变化预测与总磷污染负荷分析. 农业环境科学学报, 2018, 37(4): 747-755.
- [22] 李靖. 都市功能拓展区城乡建设用地演变机制及利用战略研究——以重庆市巴南区为例[D]. 重庆: 西南大学, 2015.
- [23] 重庆市统计局. 重庆市统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2016: 112-115.
- [24] 国家发展和改革委员会价格司. 全国农产品成本收益资料汇编 2016. 北京: 中国统计出版社, 2016: 12-31.
- [25] 朱康文, 李月臣, 周梦甜. 基于 CLUE-S 模型的重庆市主城区土地利用情景模拟. 长江流域资源与环境, 2015, 24(5): 789-797.
- [26] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 郑度, 李双成. 青藏高原生态资产的价值评估. 自然资源学报, 2003, 18(2): 189-196.
- [27] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature, 1997, 387(6630): 253-260.
- [28] 段彦博, 雷雅凯, 马格, 吴宝军, 田国行. 郑州市生态系统服务价值时空变化特征. 浙江农林大学学报, 2017, 34(3): 511-519.
- [29] 黄春波, 滕明君, 曾立雄, 周志翔, 肖文发, 朱建华, 王鹏程. 长江三峡库区土地利用/覆盖的长期变化. 应用生态学报, 2018, 29(5): 1585-1596.
- [30] 黄大全, 黄静. CLUE-S 模型应用与研究进展. 亚热带资源与环境学报, 2017, 12(3): 77-87.