

基于 Clue-S 模型的石马河流域东莞段生态系统服务价值变化情景模拟

张沐锋^{1,2}, 刘万侠², 王健恩¹, 罗先强¹, 陈平¹, 宫清华^{2,3}

(1. 仲恺农业工程学院 园艺园林学院, 广东 广州 510225; 2. 广州地理研究所, 广东省地理空间信息技术与应用公共实验室, 广东 广州 510070; 3. 南方海洋科学与工程广东省实验室, 广东 广州 511458)

摘要: [目的] 探究生态系统服务价值演变的内在作用机制, 旨在寻求以流域为单元的生态农业和城镇的优化配置模式。[方法] 基于土地利用及生态服务价值相关理论与方法, 以石马河流域东莞段 2010—2020 年土地利用数据为基础, 利用 Clue-S 模型对 2025 年土地利用格局进行模拟, 得出 2025 年区域在生态安全、耕地优先和建设发展 3 种情景下的土地利用空间布局和优化配置结果, 分析各情景下流域生态系统服务价值时空格局。[结果] 在 2010—2020 年, 石马河流域东莞段生态服务价值下降了 1.80×10^7 元, 主要为耕地、林地、园地转出。2025 年在耕地优先、生态安全、建设发展的情境下 ESV 分别为 9.44×10^7 , 9.62×10^7 , 9.38×10^7 元, 除了生态安全之外, 其余两个情景较 2020 年生态系统服务价值 ESV 都有下滑。[结论] 对处于快速城镇化发展且生态与发展矛盾突出的地区, 进行流域生态系统服务价值进行模拟与分析, 有利于增强对区域在不同发展模式下生态系统服务价值空间布局的认识和理解, 为土地利用规划与生态经济协调发展提供宏观的参考。

关键词: Clue-S 模型; 情景分析; 生态系统服务价值; 土地利用

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2021)01-0152-09

中图分类号: X21, X171

文献参数: 张沐锋, 刘万侠, 王健恩, 等. 基于 Clue-S 模型的石马河流域东莞段生态系统服务价值变化情景模拟[J]. 水土保持通报, 2021, 41(1): 152-160. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.01.022; Zhang Mufeng, Liu Wanxia, Wang Jianen, et al. Scenario simulation of ecosystem service value change in Dongguan section of Shima River basin based on Clue-S model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(1): 152-160.

Scenario Simulation of Ecosystem Service Value Change in Dongguan Section of Shima River Basin Based on Clue-S Model

Zhang Mufeng^{1,2}, Liu Wanxia², Wang Jianen¹, Luo Xianqiang¹, Chen Ping¹, Gong Qinghua^{2,3}

(1. College of Horticulture and Landscape Architecture, Zhongkai University of Agriculture

Engineering, Guangzhou, Guangdong 510225, China; 2. Guangdong Open Laboratory of Geospatial

Information Technology and Application, Guangzhou Institute of Geography, Guangzhou, Guangdong

510070, China; 3. Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory, Guangzhou, Guangdong 511458, China)

Abstract: [Objective] To explore the intrinsic mechanism of ecosystem service value (ESV) evolution, an optimal allocation model for ecological agriculture with towns and river basins as units was investigated. [Methods] Based on the theories and methods of land use and ecological service value, with the Shima River basin land use data from 2010 to 2020, the Clue-S model was used to simulate the land use pattern in 2025, and the results of land use spatial distribution and optimal allocation under three scenarios of ecological security, farmland priority and construction and development in 2025 were obtained, and the space-time pattern of watershed ESV under each scenario was analyzed. [Results] From 2010 to 2020, the ecological service value of the Dongguan section of the Shima River basin decreased by 1.80×10^7 yuan, which was mainly converted into cultivated land, forest and orchard. The ESVs were 9.44×10^7 , 9.62×10^7 , and 9.38×10^7 yuan under

收稿日期: 2020-09-15

修回日期: 2020-10-20

资助项目: 国家自然科学基金面上项目“华南地区强降水诱发的群发性滑坡形成机理与预警阈值”(41671506), “华南强降水诱发的群发性滑坡表土液化机理与流态化过程”(41977413); 广东省科学院专项(2020040101, 2020GDASYL-20200102002, 20200301003); 南方海洋科学与工程广东省实验室项目(GML2019ZD0301)

第一作者: 张沐锋(1997—), 男(汉族), 广东省广州市人, 硕士研究生, 研究方向为生态规划。Email: 504823674@qq.com。

通讯作者: 宫清华(1981—), 女(汉族), 内蒙古自治区赤峰市人, 博士, 研究员, 主要从事生态环境研究。Email: gqh100608@com。

the condition of giving priority to the ecological security of the construction and development of cultivated land in 2025. In addition to ecological security, the other two scenarios showed a decline from the ESV in 2020. [Conclusion] In areas with rapid urbanization and a prominent contradiction between ecology and development, the simulation and analysis of watershed ESV is helpful to enhance the understanding of the spatial distribution of ESVs under different development modes and to provide macroscopic reference for land use planning and coordinated development of an ecological economy.

Keywords: Clue-S model; scenario analysis; ecosystem services value (ESV); land use

生态系统服务(ecosystem services)是指通过生态系统的结构、过程和功能直接或间接为人类生存发展提供服务,包括供给服务、调节服务、文化服务和支持服务,它是衡量一个地区能否实现可持续发展的核心指标^[1]。生态系统服务价值(ecosystem services value, ESV)是指人类从生态系统功能中直接或间接所获得利益的货币价值化^[2],其分布与区域的自然地理要素分布、社会经济发展状况密切相关^[3]。土地利用作为人类与自然之间联系最紧密的环节,是指人类按照一定的社会、经济目的对地表进行开发利用的过程^[4]。对区域内土地利用及其生态系统服务价值进行研究,有利于揭示研究对象间时间与空间上相互作用的机制,促进城市的可持续发展。因此近年有关土地利用变化对生态系统服务价值的影响成为生态系统服务研究的重点之一。1977年,Westman首次提出“自然服务”的概念及其价值评估的问题。1997年,Costanza等^[5]最早提出了ESV的估算原理与方法,中国研究者谢高地等,基于Costanza的方法并根据中国现有的生态系统和社会经济情况进行修订,建立了适应于中国的生态系统服务评估单价体系。2003年以后在中国生态系统服务研究进入了深化阶段,学者开始从不同的尺度和不同的生态类型开展生态服务价值的研究。如唐衡等通过测算出不同类型农田类型的生态系统服务价值^[6],得出复种模式能够极大提高农田生态系统的服务价值。由于城市化的快速蔓延,学者逐渐集中研究土地利用变化对ESV的影响,也将GIS、遥感等技术手段和相关数据分析方法引入其中,张艳军等^[7]采用生态系统价值密度与ESV保持率等指标反映了重庆近10a的ESV时空变化特征,赵志刚等^[8]利用生态价值评估模型及GIS空间统计方法,分析鄱阳湖生态经济区生态系统服务价值的时空变化。近年来相关研究热点转为ESV的预测,主要通过CA-Markov,CLUE-S以及IMAGE等模型进行土地利用的模拟,通过计算生态系统服务价值来绘制ESV空间分布图^[9]。刘园等^[10]基于CA-Markov对潜江市区的生态系统服务价值进行动态模拟,指出潜江市区域生态环境发展不容乐观,应加强对水资源、耕地等的保护。Clue-S模型在1996

年研发至今,已在中国、英国等多个地区得到利用,其模拟结果对当地的土地利用规划提供了较好的指导^[11-17]。Clue-S相比其他模型,其优点主要体现在模拟中小尺度分析精度高,且在模拟过程中综合考虑了社会经济和生物物理等驱动因子,并能将优化结果表现在空间上。

传统的基于Clue-S模型的生态系统服务价值评价多在宏观尺度,本文试图以小流域为单元,探索Clue-S模型在中小尺度的实现和应用。高密度的人群,高速发展的工业和快速城镇化,导致石马河流域东莞段内农用地锐减、建设用地急剧扩张,并造成了现有用地结构严重失衡、布局分散且有效利用率低的局面。其次在发展途中过度重视经济效益,而忽视了生态环境和土地承载力,形成了较严重的环境污染和生态问题^[18-19]。

因此本文选取石马河流域东莞段为案例。本文立足生态系统的完整性。通过对石马河流域东莞段2025年土地利用进行不同情景下的模拟,旨在探究2010—2025年区域生态系统服务价值的演变的内在作用机制,寻求以流域为单元的生态农业和城镇的优化配置模式。拟通过合理的生态系统服务价值评价以及土地利用模拟,得出区域2025年生态系统服务价值分布,为区域的土地利用规划与生态经济协调发展提供有效的指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

石马河属珠江水系东江下游左岸支流,源于深圳市宝安区龙华镇(北纬 $22^{\circ}35'$ — $22^{\circ}44'$,东经 $113^{\circ}57'$ — $114^{\circ}4'$)大脑壳山,东莞境内河流长度为64 km,流经东莞市塘厦镇、清溪镇、凤岗镇、樟木头镇和谢岗镇,研究区域总面积为469.52 km²。境内群山环抱,地形起伏较大,海拔多在200~600 m,坡度在 30° 左右,群山环绕、水城相融的自然特点突出。区域内2020年生态用地面积达271.22 km²,占总面积58%,生态保护任务责任重大(见表1)。流域内受地形限制,可开发建设范围较小,近年为加快集聚现代产业,实现产业集群发展,接受了深圳大量的产业外溢,使自身快

速城镇化。规划期限内区域,依托塘厦科苑城、清溪低碳产业创新示范区与科技生态城、凤岗人工智能特色小镇,重点发展先进制造业,打造深莞惠的先行区和桥头堡。因此近年建设用地急剧增加,生态空间遭受侵占,如水环境污染、潜在地质灾害与城市内涝等生态问题日益显现。

表 1 2020 年石马河流域东莞段生态用地情况

类别	面积/km ²	比例/%
耕地	14.14	5.21
园地	63.02	23.24
林地	159.78	58.91
牧草地	0.03	0.01
其他农用地	10.73	3.96
陆地水域	14.10	5.20
自然保留地	9.42	3.47
合计	271.22	100

1.2 数据来源与处理

本文参考《土地利用现状分类》(GB/T21010-2007)的分类方法,结合 2010,2020 年土地利用变更调查数据,并将其分为耕地、林地、园地、建设用地、水域、未利用地 6 大类^[20],利用 Arc-GIS10.5 软件将数据转化为 10 m×10 m 的栅格数据,为避免模型计算过程中出现耗时过多等问题,且在保证运行结果质量的同时,将栅格重采样为 50 m×50 m。其他数据主要包括:①河流、水库、建制镇、道路,使用 ArcGIS 软件的欧式距离对相应的数据进行分析,生成相应距离的栅格图,并利用 DEM 数据计算区域起伏度、坡度;②社会经济因素,包括工业产值、农业产值、总人口数量、粮食作物播种面积与总产量等来源于 2018 年东莞市统计年鉴,为了和土地数据在尺度上保持一致,统计数量以乡镇为单元进行统计,人口、人均收入和粮食产量等利用克里金差值进行空间化,并进行重分类。③自然环境因子:野生动物保护分布点、生态极重要区、永久基本农田。收集数据均通过 GIS 空间校正、投影转化等处理,统一采用了 Transverse-Mercator 空间投影和大地 2000 地理坐标系统。

1.3 研究方法

本文主要基于石马河流域东莞段 2010,2020 年土地利用数据,通过设定社会、自然等相关驱动因子、限制区域以及土地利用需求量,调整土地利用转移规则,最终利用 Clue-S 模型进行模拟,得出区域在建设发展、生态保护、耕地优先 3 种情景下区域的空间布局;最后分别计算 3 种情形下石马河流域东莞段的生态系统服务价值,得到区域 ESV 分布图。

1.3.1 Clue-S 模型及参数设置 Clue-S 是在原有 Clue 模型的基础上,由 Verburg 等开发适用于模拟小尺度范围内土地利用变化的模型,模型将生物物理驱动因子与社会经济因子相结合^[21],并假设其土地利用与设定的需求量、相关驱动因子等处动态平衡之中^[22],最终使土地利用的变化与结果在空间上反映。模型需要的数据包括:

(1) 限制区域。本研究中,根据石马河流域东莞段土地利用优化配置的实际需求,限制区域为永久基本农田保护区、生态极重要区。

(2) 土地利用转移规则。土地利用转移规则主要包括土地利用转移系数以及转移矩阵。土地利用转移弹性系数用于表示土地利用类型的稳定程度,取值范围在 0~1 之间,值越小,代表越容易转为其他地类,关于转移弹性系数的设置没有精确的计算方法,研究者通过研究区实际情况以及前人研究情况来确定(见表 2)。土地利用转移矩阵表明土地利用间是否可以发生相互转变,1 表示可以,0 则表示不可以,通过相关文献查阅以及区域内土地利用现状布局其未来发展趋势,设定了各情境下土地利用转移矩阵表^[23](见表 3—5)。

表 2 土地利用转移弹性系数

地类名称	建设用地	林地	园地	耕地	水域	未利用地
耕地保护	1	0.6	0.5	0.75	0.6	0.1
建设发展	1	0.3	0.2	0.3	0.7	0.2
生态保护	1	0.7	0.6	0.3	0.8	0.3

(3) 土地利用类型需求。土地利用类型需求量必须借助于独立与 Clue-S 模型之外的其他方法求得,用以限定模拟过程中每种土地利用类型的变化量^[24]。土地需求计算可以充分使用多种数学和经济模型,如情景分析^[25]、灰色模型^[26],趋势外推法、线性内插法、Markov 模型等。本文以 2010—2020 年土地利用数据为基础,利用灰色模型进行土地利用需求的预测。

(4) 土地利用类型空间分析。二元 Logistic 回归是土地利用分析里最常用的二项选择模型,本文选择研究区内土地利用类型作为因变量,驱动因子作为自变量,研究区域内它们之间的因果关系以及变化趋势^[27]。利用 SPSS 软件对 6 种土地利用类型与 9 个驱动因子进行回归分析,可以获得土地利用类型回归方程的系数(β 值)和回归方程常量。

$$\lg \left\{ \frac{p_i}{1-p_i} \right\} = \beta_0 + \beta_1 X_{1,i} + \beta_2 X_{2,i} + \dots + \beta_n X_{n,i} \quad (1)$$

式中: P_i 表示每一个栅格可能出现某种土地利用类型 i 的概率; $X_1, i \sim X_n, i$ 表示某种土地利用类型 i 相关的驱动因素; $\beta_0 \sim \beta_n$ 为驱动因素的回归系数。

表 3 耕地保护情景转移矩阵

土地利用类型	0	1	2	3	4	5
0	1	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	0	0
2	1	1	1	1	1	0
3	1	1	1	1	0	1
4	0	0	0	1	1	0
5	1	1	1	1	1	

表 4 建设发展情景转移矩阵

土地利用类型	0	1	2	3	4	5
0	1	0	0	0	0	0
1	0	1	0	1	0	0
2	0	1	1	1	1	0
3	0	1	0	1	0	0
4	0	0	0	0	1	0
5	1	1	1	1	1	1

表 5 生态优先情景转移矩阵

土地利用类型	0	1	2	3	4	5
0	1	0	0	0	0	0
1	0	1	1	1	0	0
2	0	1	1	1	1	0
3	0	1	1	1	0	0
4	0	0	0	0	1	0
5	0	1	1	1	1	1

注:①0 为建设用地,1 为林地,2 为园地,3 为耕地,4 为水域,5 为未利用地;②列为未来地类,行为现有地类。

1.3.2 Clue-S 模型空间模拟 Clue-S 模型的空间模拟是基于各土地利用相互转化规则、土地利用空间分布概率、土地利用现状图以及各土地利用类型的面积需求,根据总概率对土地利用需求进行空间分配迭代的过程,迭代的方程为:

$$TPROP_{i,u} = P_{i,u} + ELAS_u + ITER_u \quad (2)$$

式中: $TPROP_{i,u}$ 为栅格 i 中土地利用类型 u 的总概率; $P_{i,u}$ 为 Logistic 回归方程土地利用类型 u 的空间分布概率; $ELAS_u$ 为土地利用类型 u 的转换弹性系数; $ITER_u$ 为土地利用类型 u 的迭代变量。

模型的检验主要分为两个方面,一是用 Pontius 提出的 ROV 方法对回归结果进行检验,ROC 系数越接近 1 则代表一致性约好,大于 0.7 才符合概率分布要求;二是 kappa 系数检验,当 $kappa \geq 0.75$ 时,Clue-S 模型的预测精确度较高,当 $kappa < 0.4$ 时,认为模拟的结果较差^[28]。

1.3.3 生态系统服务价值计算 关于生态系统服务价值的定量评估,最早由 Costanza 等提出相关方法,在此基础上,后中国学者谢高地等根据中国生态系统的特点经过修正,并指出 ESV 当量因子是生态系统潜在服务价值的相对贡献率,等于每年每 1 hm^2 粮食价值的 1/7。本研究参照次方法,并根据研究区的差异性,对数据进行了修正,由片区内 2018 年粮食作物产量、播种面积,计算出 1 个单位生态系统经济价值为 1 413.91 元/ hm^2 ^[29]。

$$E_a = 1/7 \sum_{i=1}^n \frac{p_i q_i}{M} \quad (3)$$

式中: E_a 为 1 个单位生态系统服务的经济价值(元/ hm^2); p_i 为第 i 种粮食作物全国平均价格(元/t); q_i 为第 i 种粮食作物的产量(t); M 为 n 种粮食作物总面积(hm^2);

经过修正以后,参考中国的生态系统服务价值当量表,计算出生态系统服务的价值量(表 6)。

$$ESV = \sum (A_i \times VC_i) \quad (4)$$

式中: ESV 为生态系统服务总价值; A_i 为单位面积上地类 i 的生态系统服务价值; VC_i 为研究区地类 i 的面积(hm^2)(见表 6)。

表 6 石马河流域东莞段生态系统服务价值系数

一级类	二级类	林地	园地	耕地	水域	未利用地
供给服务	食物生产	410.03	141.39	1 922.92	1 131.13	0.00
	原料生产	933.18	197.95	127.25	325.20	0.00
	水资源供给	480.73	113.11	-3 718.58	11 721.31	0.00
调节服务	气体调节	3 068.18	721.09	1 569.44	1 088.71	28.28
	气候调节	9 190.42	1 894.64	805.93	3 237.85	0.00
	净化环境	2 728.85	622.12	240.36	7 847.20	141.39
支持服务	水文调节	6 701.93	1 385.63	3 845.84	144 558.16	42.42
	土壤保持	3 746.86	876.62	14.14	1 314.94	28.28
	维持养分循环	282.78	70.70	268.64	98.97	0.00
文化服务	生物多样性	3 407.52	791.79	296.92	3 605.47	28.28
	美学景观	1 498.74	353.48	127.25	2 672.29	14.14
总计		32 449.23	7 168.52	5 500.11	177 601.24	282.78

2 结果与分析

2.1 Logistic 回归方程检验

由检验结果可知,石马河流域东莞段各地类分布

概率模拟效果较好,建设用地、林地、园地、耕地、水域、未利用地的 ROC 值分别为 0.878,0.947,0.767,0.762,0.827,0.725 满足模型的回归要求,因此所选取的因子可以用于模型对区域的模拟(见表 7)。

表 7 石马河流域东莞段 Logistic 系数分析结果

项目	建设用地	林地	园地	耕地	水域	未利用地
高程	-0.013 792	0.019 247	-0.015 317	-0.018 114	-0.028 253	-0.008 314
坡度	-0.108 774	0.092 294	0.045 170	-0.063 234	-0.128 684	-0.021 023
起伏度	-0.013 635	0.008 558	0.005 498	-0.003 401	0.002 981	0.007 980
距中心城市距离	-0.000 283	-0.000 119	0.000 206	0.000 580	0.000 485	-0.000 192
距道路距离	-0.000 667	0.000 135	0.000 086	0.000 245	0.000 717	0.000 243
距水系距离	-0.000 648	0.000 796	-0.000 081	-0.000 078	-0.000 104	0.000 194
距水库距离	0.000 274	0.000 045	-0.000 245	-0.000 144	-0.001 236	0.000 185
距野生动物保护点距离	0.000 072	-0.000 020	-0.000 037	-0.000 069	-0.000 044	0.000 046
距自然保护地距离	-0.000 112	-0.000 059	-0.000 126	0.000 115	—	-0.000 150
常量	1.847 665	-4.083 918	-0.926 579	-2.336 520	-0.880 782	-3.750 976
ROC	0.878	0.947	0.767	0.762	0.827	0.725

2.2 土地覆盖模拟精度分析

以石马河流域东莞段 2010 年土地利用数据为基础,以相似的计算方式,将限制区域、土地转移规则、土地利用需求、Logistic 回归结果等相关数据输入模型中,并对石马河流域东莞段 2020 年的土地利用布局进行模拟,将模拟结果与 2020 年实际土地利用进行叠加分析,计算 kappa 系数如下:

$$\text{kappa} = \frac{p_0 - p_c}{p_p - p_c} \quad (5)$$

式中: p_p 为理想情况下的准确比值,值为 1; p_c 为在随机情况下的期望比值; p_0 为正确模拟的比例。

总栅格数为 187 810,其中正确的栅格数为 159 583,正确模拟的比例为 84.97%,研究区域分为 6 种土地利用类型,在随机情况下期待比值为 1/6,可得出 kappa

值(0.812) $>$ 0.75,说明模型模拟效果较好,Clue-S 模型可以用于石马河流域未来土地利用的模拟。

2.3 土地利用变化特征与情景模拟分析

由结果分析可得,石马河流域东莞段土地利用类型以建设用地和林地为主,分别占总面积的 37.97%,33.39%。在动态研究方面,研究期内石马河流域东莞段的土地利用发生了明显的变化。从总体上看 2010—2020 年,建设用地扩张速度较快,由 34.76% 上升为 37.97%;耕地、未利用地及园地减少较多,分别从 4.71%,5.67%,16.41% 减少至 3.70%,4.59%,15.59%;由此可见,生态用地状况受到了较大的威胁,建设用地在沿建制镇中心、与外沿不断扩张,土地利用结构趋于劣化,生态环境正往消极的方向发展。(见表 8—9)。

表 8 2010—2015 年石马河流域东莞段土地利用转移矩阵

hm²

项目	2015 年面积						
	耕地	建设用地	林地	水域	未利用地	园地	
2010 年 面积	耕地	1 855.14	5.36	0.19	0.01	0.07	1.37
	建设用地	118.98	16 285.45	114.04	29.75	375.50	300.40
	林地	0.00	17.50	15 729.24	0.02	0.26	0.27
	水域	0.00	8.49	0.21	2176.11	0.56	0.12
	未利用地	81.59	0.05	3.51	0.34	2 285.42	0.19
	园地	154.15	2.73	0.01	0.00	0.00	7 403.07

2025 年石马河流域东莞段在生态安全、耕地保护和建设发展 3 种情景下的土地利用空间布局模拟结果(见图 1),并将 3 种情境下模拟图与 2020 年土地

利用图进行叠置分析(见表 10)。

(1) 耕地保护情景下。永久基本农田作为限制区域,较好的保护了耕地的数量,耕地趋向于集中连

片。未利用地、园地的复垦使得耕地数量增加,其次由于限制其他土地利用类型对耕地的占用,耕地的稳定性也得到了提高,从而使得耕地的数量上升了

14.85%。由于建设用地具有不可逆的特点,所以建设用地数量基本不发生变化。在耕地保护情景下可以使耕地的保有量得到很好的保证。

表 9 2015—2020 年石马河流域东莞段土地利用转移矩阵

hm²

项目	2020 年面积					
	耕地	建设用地	林地	水域	未利用地	园地
2015 年 面积	1 729.03	8.97	4.75	3.42	1.69	15.02
耕地	107.06	17 134.49	93.69	28.35	227.93	219.25
建设用地	4.92	22.81	15 586.23	9.23	17.75	24.80
林地	3.04	5.45	9.14	2 126.73	3.53	13.89
水域	2.24	23.05	15.53	3.18	2 112.74	6.46
未利用地	15.05	27.38	21.62	14.14	6.63	7 278.25
园地						

(2) 生态安全情景下。林地作为石马河流域东莞段主要地类之一,在空间上呈现集中连片特征;耕地继续保持稳定,地势高的退耕为林地或园地,林地、园地的稳定性得到了提高。该情境下注重城市高质量发展为主,注重植树造林、退耕还湿、人工补水,林地和水域面积相对其他情景保持较高水平。

(3) 建设发展情景下。林地与水域在 2020—2025 年基本保持不变,但中心城区的建设用地面积不断扩张,主要以占用园地、未利用地和耕地的面积为代价,分别减少了 4.55%,19.36%,18.01%。长期以此形式发展,耕地逐渐减少,粮食安全问题逐渐显著。

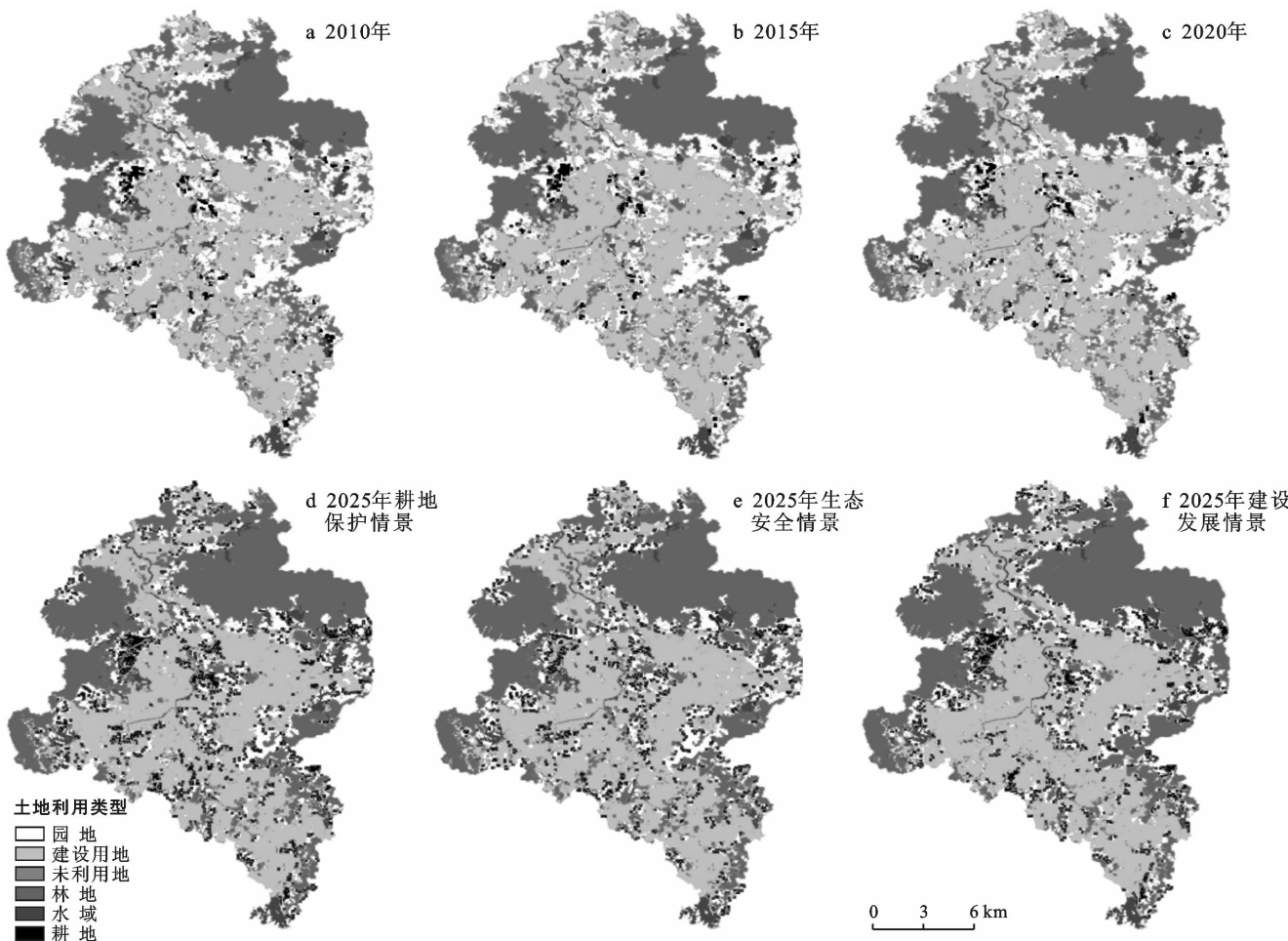


图 1 2010—2025 年石马河流域东莞段土地利用特征

表 10 石马河流域东莞段不同情景下各地类面积及变化

地类名称	土地利用面积/km ²			2025 年耕地保护情景		2025 年生态安全情景		2025 建设发展情景	
	2010 年	2015 年	2020 年	面积/hm ²	变化率/%	面积/hm ²	变化率/%	面积/hm ²	变化率/%
建设用地	16 319.57	17 224.11	17 828.25	18 183.48	1.99	18 024.98	1.10	19 176.48	7.56
林地	15 847.20	15 747.29	15 676.06	15 430.49	-1.57	15 858.24	1.16	15 426.49	-1.59
园地	7 705.42	7 559.96	7 349.88	7 423.49	1.00	7 351.99	0.03	7 015.74	-4.55
耕地	2 209.87	1 862.15	1 769.09	2 032.75	14.85	1 784.75	0.89	1 450.50	-18.01
水域	2 206.22	2 185.48	2 161.61	2 129.10	-1.50	2 156.25	-0.25	2 135.25	-1.22
未利用地	2 661.80	2 371.09	2 167.61	1 753.25	-19.12	1 776.25	-18.05	1 748.00	-19.36

2.4 生态系统服务价值变化分析

采用经过验证的 Clue-S 模型,以 2010 年为基期,

设置相关参数,模拟 2025 年石马河流域东莞段土地利用分布并计算 ESV(见图 2,表 11)。

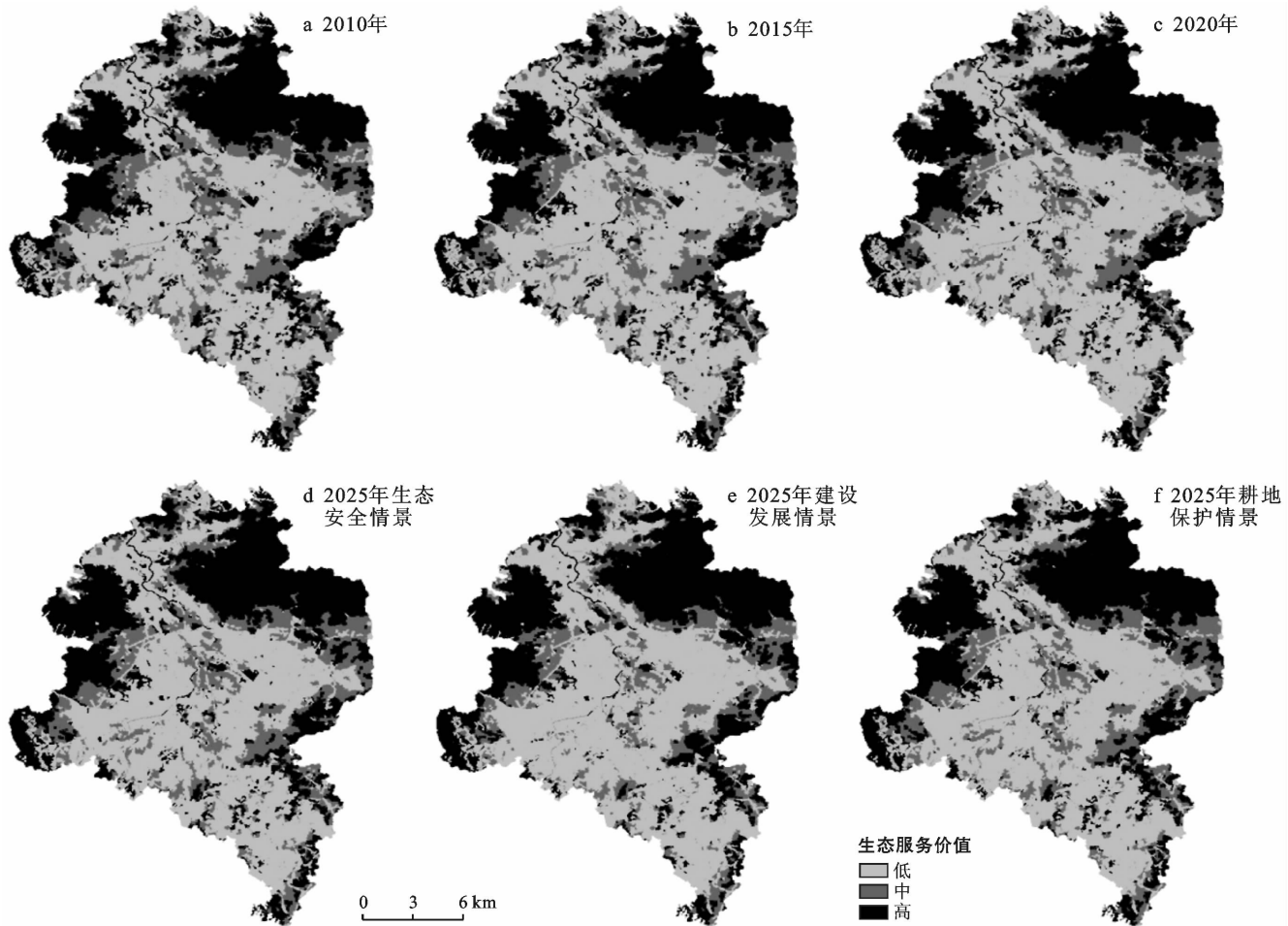


图 2 2010—2025 年石马河流域东莞段生态系统服务价值分布特征及模拟情景

表 11 2010—2025 年石马河流域东莞段生态系统服务价值

10⁸ 元

土地利用类型	2010 年	2015 年	2020 年	2025 耕地 优先情景	2025 生态 优先情景	2025 建设 发展情景
林地	5.14	5.11	5.09	5.01	5.15	5.01
园地	0.55	0.54	0.53	0.53	0.53	0.50
耕地	0.122	0.10	0.097	0.11	0.10	0.078
水域	3.92	3.88	3.84	3.78	3.83	3.79
未利用地	0.008	0.007	0.006	0.005	0.005	0.005
总计	9.74	9.64	9.56	9.44	9.62	9.38

2025 年研究区域在耕地优先、生态优先、建设发展 3 种情景下 ESV 分别为 9.44×10^7 , 9.62×10^7 , 9.38×10^7 元,较 2020 年的 0.956 分别增幅为 -1.26% , 0.63% , -1.88% ,较 2010 年的 0.974,增幅为 -3.08% , -1.23% , -3.70% 。由此看,石马河流域东莞段生态系统服务功能略有下降。在耕地保护情景下,由于永久基本农田的限制区与园地的控制,耕地稳定性较好,耕地转入地区主要集中于片区北部以及中部盆地内,该区域地势较为平缓,且水土资源优越,是耕地集中分布的区域。在生态优先情景之下,2025 年 ESV 达到最高,主要是由于此情景下存在水域、林地、耕地的转入,而人工用地与其他用地相对稳定,强调可持续发展的重要性,对保护区的严格限制转出所导致,耕地在研究区中部保持稳定,而在地势较高的山区,由于水土条件不佳、居民搬迁等原因逐渐撂荒并退耕为林地。在建设发展情景下,存在人工用地和其他用地由水域、耕地、林地、未利用地转入的情况,主要是由于经济增长使建设用地需求的急剧扩大所致,在此情景下,流域内城镇规模最大,特别是在研究区域内中部,建设用地密集,成片分布。

2.5 未来土地利用变化对策

石马河流域东莞段是一个典型的丘陵地貌,山地面积较大,且生态保护任务繁重,加上东莞市的城市化和工业化以及国家土地政策、经济政策等大背景的影响,片区内耕地的分布较为零碎。特别在片区中心,耕地受到严重的威胁,会导致耕地的撂荒,加剧片区的粮食安全。应加强对生态红线、永久基本农田的管理,促进退耕还林、生态补偿机制等的建立,保证区域的生态安全,按照“谁受益谁补偿”的原则,进一步完善长效多元化生态补偿机制,引导生态受益地区与保护地区之间、流域上游与下游之间实行生态共建共享。推进横向生态保护补偿,对因生态保护建设措施而限制或丧失发展机会的区域,给予生态损失补偿,促进区域协调可持续发展^[30]。

3 讨论与结论

3.1 结论

利用 Clue-S 模型为基础,通过对未来石马河流域土地利用布局的模拟,对不同情景下生态系统服务价值布局进行比较,得出适宜区域发展土地利用优化配置结果,用于指导区域协调可持续发展。文中所选的社会、生物物理因子对模型的模拟有良好的解释能力,且对研究期间土地利用类型模拟精度均较高。以流域为研究单元,体现了生态系统的完整性,促进了

区域以石马河流域东莞段 2010,2020 年土地利用现状图为基础,设置耕地优先、生态优先、建设发展 3 种情景,通过设置合理的驱动因子、土地利用转换规则等相关参数,模拟不同情景下流域土地利用的布局,并对模型进行验证和分析,得出了一下的结论:

(1) 将 Logistic 回归分析用于判断石马河流域东莞段研究土地利用与各驱动因子的相关性,结果表明建制镇、水系、起伏度与是影响土地利用格局变化的重要因素。对 2020 年土地利用格局进行模拟,结合现状数据验证(κ 指数为 0.812)。表明该模型及设置的相关参数可用于石马河流域东莞段未来土地利用格局的预测。

(2) 在不同的情境下,未利用地逐年减少。在耕地保护情景下,未利用地、园地的复垦使得耕地数量有了明显的上升,耕地趋向于集中连片。在生态安全情境下,耕地保持稳定,位于地势较高的耕地转化为林地或园地,该情境下注重植树造林、退耕还湿、人工补水,城市以高质量发展为主。建设发展情景下,以占用未利用地、耕地、园地为代价,中心城区与建设用地不断扩张,粮食安全问题日益显现。

(3) 在研究期间,石马河流域东莞段生态系统服务价值总量在呈逐年下降的趋势,生态环境往消极的方向发展,2010,2015,2020 年生态系统服务价值总量分别为 9.74×10^8 , 9.64×10^8 , 9.56×10^8 ,其中林地、水域、园地对区域生态系统服务价值总量较大,价值变化也相应较大。流域内的生态系统服务价值具有空间异质性,分布极不平衡,以流域中部地区为中心,呈现中—低—高的空间分布格局。不同情景下的石马河流域生态系统服务价值分布有较为明显的差异,其中生态安全情境下生态系统服务价值最高,其次是耕地保护情景,最差的为建设发展情景。

3.2 讨论

通过 Clue-S 模型模拟未来土地利用分布格局,更为直接的显示了土地利用类别的转入与转出情况,增强了土地利用规划多情景布局的空间预测性。其次通过生态系统服务价值的可视化表达,揭示了其时空变化特征。目前利用 Clue-S 模型对数据的模拟停留在以省市范围作为研究单元,割裂了生态系统的完整性,无法体现区域协同规划的综合性和系统性。本文在前人研究的基础上,通过模型的优化,寻求以流域为单元的生态农业和城镇的优化配置模式,此研究方法数据来源较为简便,数据模拟结果具有较高的实用性。对自身处于快速城镇化发展且生态与发展矛盾突出的地区,进行流域生态系统服务价值进行模拟与分析,有利于增强对区域在不同发展模式下生态系

统服务价值空间布局的认识和理解,为土地利用规划与生态经济协调发展提供宏观的参考。

生态系统服务价值模拟评估涉及到生态经济学、地理学等多种学科,影响生态系统服务价值格局分布的因子较多,其量化分析与可视化显示技术还有不足。本文对相关部门政策因子的输入考虑较少。在今后研究中,应针对不同情景需要,选择不同的人为政策影响因子,实现区域政策、经济等人为因素空间化,将进一步提高模拟精度。

[参 考 文 献]

- [1] 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):3-5.
- [2] 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.
- [3] 许倍慎,周勇,徐理,等. 湖北省潜江市生态系统服务功能价值空间特征[J]. 生态学报,2011,31(24):7379-7387.
- [4] 傅伯杰,张立伟. 土地利用变化与生态系统服务:概念、方法与进展[J]. 地理科学进展,2014,33(4):441-446.
- [5] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. *Ecological Economics*, 1998,25(1):3-15.
- [6] 唐衡,郑渝,陈卓,等. 北京地区不同农田类型及种植模式的生态系统服务价值评估[J]. 生态经济,2008,24(7):56-59.
- [7] 张艳军,官冬杰,翟俊,等. 重庆市生态系统服务功能价值时空变化研究[J]. 环境科学学报,2017,37(3):1169-1177.
- [8] 赵志刚,余德,韩成云,等. 2008-2016年鄱阳湖生态经济区生态系统服务价值的时空变化研究[J]. 长江流域资源与环境,2017,26(2):198-208.
- [9] 陆汝成,黄贤金,左天惠,等. 基于 CLUE-S 和 Markov 复合模型的土地利用情景模拟研究:以江苏省环太湖地区为例[J]. 地理科学,2009,29(4):577-581.
- [10] 刘园,任意,周勇,等. 基于 CA-Markov 的江汉平原生态系统服务价值动态模拟:以湖北省潜江市为例[J]. 中国农业资源与区划,2020,41(4):159-167.
- [11] Verburg P H, Overmars K P. Combining top-down and bottom-up dynamics in land use modeling: Exploring the future of abandoned farmlands in Europe with the Dyna-CLUE model [J]. *Landscape Ecology*, 2009, 24(9):1167-1181.
- [12] Verburg P H, Overmars K P, Huigen M G A, et al. Analysis of the effects of land use change on protected areas in the Philippines [J]. *Applied Geography*, 2006,26(2):153-173.
- [13] Lesschen J P, Kok K, Verburg P H, et al. Identification of vulnerable areas for gully erosion under different scenarios of land abandonment in Southeast Spain [J]. *Catena*, 2007,71(1):110-121.
- [14] 黄明,张学霞,张建军,等. 基于 CLUE-S 模型的罗玉沟流域多尺度土地利用变化模拟[J]. 资源科学,2012,34(4):769-776.
- [15] 梁友嘉,徐中民,钟方雷. 基于 SD 和 CLUE-S 模型的张掖市甘州区土地利用情景分析[J]. 地理研究,2011,30(3):564-576.
- [16] 冯仕超,高小红,顾娟,等. 基于 CLUE-S 模型的湟水流域土地利用空间分布模拟[J]. 生态学报,2013,33(3):985-997.
- [17] 张丁轩,付梅臣,陶金,等. 基于 CLUE-S 模型的矿业城市土地利用变化情景模拟[J]. 农业工程学报,2013,29(12):246-256.
- [18] 彭俊华,邓宇鹏. 东莞市土地利用的问题及其原因研究[J]. 特区经济,2011(11):43-45.
- [19] 侯春飞,韩永伟,孟晓杰,等. 雄安新区 1995—2019 年土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J]. 环境工程技术学报,(2020-05-25).
- [20] 李全,李腾,杨明正,等. 基于梯度分析的武汉市生态系统服务价值时空分异特征[J]. 生态学报,2017,37(6):2118-2125.
- [21] 吴健生,冯喆,高阳,等. CLUE-S 模型应用进展与改进研究[J]. 地理科学进展,2012,31(1):3-10.
- [22] 蒙菲,李小丽,陈笑扬,等. 基于 CLUE-S 模型的长沙市望城区土地利用变化预测[J]. 地理信息世界,2018,25(2):72-77.
- [23] 许月卿,罗鼎,郭洪峰,等. 基于 CLUE-S 模型的土地利用空间布局多情景模拟研究:以甘肃省榆中县为例[J]. 北京大学学报(自然科学版),2013,49(3):523-529.
- [24] 王丽艳,张学儒,张华,等. CLUE-S 模型原理与结构及其应用进展[J]. 地理与地理信息科学,2010,26(3):73-77.
- [25] 张学儒,王卫,Verburg P H,等. 唐山海岸带土地利用格局的情景模拟[J]. 资源科学,2009,31(8):1392-1399.
- [26] 谭永忠,吴次芳,牟永铭,等. 经济快速发展地区县级尺度土地利用空间格局变化模拟[J]. 农业工程学报,2006,22(12):72-77.
- [27] 盛晟,刘茂松,徐驰,等. CLUE-S 模型在南京市土地利用变化研究中的应用[J]. 生态学杂志,2008,27(2):235-239.
- [28] 刘淼,胡远满,常禹,等. 土地利用模型时间尺度预测能力分析:以 CLUE-S 模型为例[J]. 生态学报,2009,29(11):6110-6119.
- [29] 吴攀,杨木壮,刘伟聪. 2007—2015 年东莞市土地利用及其生态系统服务价值的时空演变[J]. 水土保持通报,2020,40(1):250-255.
- [30] 郭荣中,申海建,杨敏华. 基于改进生态价值当量的长株潭地区生态补偿空间选择[J]. 环境监测管理与技术,2020,32(3):19-23.