DOI: 10.20103/j.stxb.202311272583

孙桐,雷冬梅,刘林,包广静,付祎.基于最小累计阻力模型和情景模拟法的滇池流域最小生态用地量化对比研究.生态学报,2024,44(20):9135-9145. Sun T, Lei D M, Liu L, Bao G J, Fu H.Comparative study on the minimum ecological land quantification in Dianchi Lake Basin based on MCR model and scenario simulation method. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(20):9135-9145.

基于最小累计阻力模型和情景模拟法的滇池流域最小 生态用地量化对比研究

孙 桐¹, 雷冬梅^{1,2,*}, 刘 林¹, 包广静^{1,2}, 付 祎¹

1 云南财经大学财政与公共管理学院,昆明 650221

2 云南省高原山地土地利用重点实验室,昆明 650221

摘要:最小生态用地是保障区域生态系统服务功能完整的关键性生态用地,量化最小生态用地对于维持区域生态系统健康与可 持续发展具有重要意义。从最小生态用地的内涵解析出发,以生态系统服务功能视角为切入点,提出基于最小累计阻力模型 (MCR)与情景模拟法的最小生态用地量化的研究框架,并以滇池流域为例进行实证分析。结果表明:(1)基于 MCR 模型,识别 出研究区最小生态用地栅格数量为 1275560,面积为 1148.00km²,占流域生态用地面积 50.68%,占流域总面积 39.32%。(2)基 于情景模拟法,比较占研究区总生态用地面积 30%、40%、50%及 60% 的四种情景,识别出流域最小生态用地面积为 1129.55km²,占流域生态用地面积 50%,占流域总面积 38.96%。(3)进一步对比分析发现:情景模拟法确定的最小生态用地在 土地利用类型的分布特征方面表现出更高的稳定性和合理性,而在流域尺度上,MCR 模型和情景模拟法确定的最小生态用地 中占比最高的均为林地,分别为 78.17%和 47.32%;情景模拟法量化的最小生态用地的最大斑块面积指数、蔓延度指数及聚合 度指数均大于 MCR 模型的,分别为 10.62、39.57 和 93.39,表明情景模拟法确定的最小生态用地的优势斑块连接度更好,景观集 聚程度更高,景观破碎度更小。

关键词:最小生态用地;最小累计阻力模型;情景模拟法;滇池流域

Comparative study on the minimum ecological land quantification in Dianchi Lake Basin based on MCR model and scenario simulation method

SUN Tong¹, LEI Dongmei^{1,2,*}, LIU Lin¹, BAO Guangjing^{1,2}, FU Hui¹

1 School of Finance and Public Administration, Yunnan University of Finance and Economics, Kunning 650221, China

2 Yunnan Key Laboratory for Plateau Mountain Land Use, Kunming 650221, China

Abstract: The minimum ecological land is the key ecological land in a region, which can ensure that the regional ecosystems provide and maintain the integrity of important ecosystem services. Under the background of rapid urbanization, ecological land has been seriously occupied and destroyed, resulting in the decline of ecosystem services and even affecting the ecological security of the whole region. Therefore, quantifying the minimum ecological land is of great significance for maintaining the health and sustainable development of regional ecosystem. Taking Dianchi Lake Basin as an example, this paper firstly analyzed the connotation of the minimum ecological land. Secondly, from the perspective of ecosystem services, a research framework of the minimum ecological land quantification was proposed based on minimum cumulative resistance (MCR) model and scenario simulation method. Finally, landscape pattern index method was used to compare the quantitative results of the minimum ecological land of these two methods. The results are as follows: (1) Based on MCR

收稿日期:2023-11-27; 网络出版日期:2024-07-08

基金项目:国家自然科学基金(42361049)

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: dmLei@ ynufe.edu.cn

model, the number of grids of the minimum ecological land in the study area is 1275560, with an area of 1148.00km², accounting for 50.68% of the ecological land area and 39.32% of the total area of the basin. (2) Based on scenario simulation method, four scenarios accounting for 30%, 40%, 50% and 60% of the total ecological land area in the study area are compared, and the minimum ecological land area is identified as 1129.55km², covering for 50% of the ecological land area of the basin. (3) Further comparative analysis reveals that the distribution characteristics of land use types of the minimum ecological land identified by scenario simulation method show higher stability and rationality than by MCR model. At the watershed scale, the land use type with the highest proportion of the minimum ecological land identified by scenario simulation, which are 78.17% and 47.32%, respectively. In terms of landscape pattern characteristics, the largest patch index, contagion index and aggregation index of the minimum ecological land identified by scenario simulation method are all higher than those determined by MCR model, with values of 10.62, 39.57 and 93.39, respectively. This indicates that, compared with MCR model, the minimum ecological land determined by scenario simulation method has better dominant patch connectivity, higher landscape agglomeration degree, and smaller landscape fragmentation degree. Accordingly, it is necessary to comprehensively play the advantages of these two methods in the process of the minimum ecological land quantification.

Key Words: minimum ecological land; MCR model; scenario simulation method; Dianchi Lake Basin

生态用地能直接或间接发挥水文和气候调节、生物多样性维持等重要生态服务功能,对维持区域生态系 统平衡具有重要作用^[1-3]。而我国正处于快速城镇化阶段,城镇扩张将许多具有重要生态功能的生态用地转 化为了建设用地。生态用地的过度开发将导致区域生态系统生态调节能力下降、发生生态退化等严重后 果^[4]。随着国家生态文明发展目标与新型城镇化发展战略的确立,中国在新一轮的快速城市化进程中如何 有效保障地域生态需求,实现环境与发展的和谐共赢,成为当前迫切需要解决的问题。在此背景下,最小生态 用地被认为是保障区域水资源安全、生物多样性安全、水土保持安全、维护区域景观格局完整性和连续性的关 键性生态用地^[5-7],对维持区域生态系统健康与可持续发展具有重要意义。因此,最小生态用地的量化研究 逐渐成为相关研究关注的热点^[8-12]。

滇池流域是典型的高原湖泊流域,生态环境具有先天的脆弱性,是国家重要的生态功能区,也是云南省城 镇化水平最高的区域。随着城镇化的不断加速,滇池流域生态用地受到严重的侵占和破坏,生态系统服务功 能下降,甚至影响到整个区域的生态安全。快速城镇化背景下,该区域最小生态用地的量化研究具有紧迫性 和必要性^[13-16]。

学者们对最小生态用地的内涵有着不同的见解。例如,俞孔坚等^[17]认为"最小生态用地"是区域内各类 土地类型中,具有维护生态系统服务功能的最不可替代的土地单元,或最高效、关键的生态系统;张林波等^[18] 认为最小生态用地是一个城市赖以生存发展的自然基底,不得对其进行不合理的开发,否则会对其中的生态 单元产生毁灭性的后果,最小生态用地不仅能满足城市内所有人群对自然环境的最小需要,同时是对城市持 续发展目标的完成不产生阻碍作用的,各种自然、人工的生态单元的生态用地的范围。周联等^[19]认为最小生 态用地能以最少的生态用地数量和最优的空间布局为城市及其居民提供所需的综合生态系统服务。

目前,针对最小生态用地的识别与量化研究,已有研究主要采用碳氧平衡法^[20]、生态足迹法、最小累计阻 力模型(MCR)^[21]、情主模拟法等。其中,情景模拟法使用较为广泛^[22],该方法主要是通过设定区域未来发展 中不同的生态用地占比情景,进行对比分析后,再确定最适宜情景来确定最小生态用地。例如,张林波等^[18] 将 Forman 的景观生态概念模型与生态功能重要性评价结合起来,分别以市域面积的 30%、40%、50%和 60% 提取相应的生态用地,并定性分析了 4 种情景下格局的连通程度,最终将 50%定为深圳市最小生态用地的规 模。关小克等^[23]设定了北京市市域面积的 40%、50%、60%作为生态用地的情景,最后将 60%北京市国土面 积作为关键性生态用地。另一方面,一些学者采用 MCR 模型对区域最小生态用地展开了研究。例如,程迎轩 等^[24]运用景观安全格局分析方法,结合 MCR 模型,对重要生态用地空间和布局优化进行了研究。俞孔坚 等^[17]以北京市东三乡为例,采用 MCR 模型分析了基于雨洪管理和生物保护需求的最小生态用地。上述研究 表明,采用 MCR 模型可以在关注土地斑块本身生态功能大小的基础上,更加关注斑块之间的生态联系,强调 通过提高景观连通性等格局优化策略促进生态用地生态功能的高效发挥^[25-26]。

综合来看,目前最小生态用地的内涵尚不明确,量化研究主要集中在市域尺度,流域尺度研究仍较为薄 弱^[19],尤其是缺乏不同模型方法适用性的综合对比研究。寻找科学严谨的适合当地社会经济发展的最小生 态用地的方法,成为目前区域生态用地研究的一个重要问题^[27—29]。基于此,本文以滇池流域为研究区,在构 建生态系统服务功能视角下最小生态用地量化的理论框架的基础上,采用 MCR 模型与情景模拟法对最小生 态用地进行量化,并进行对比分析。以期能提升对最小生态用地内涵的认识,并对滇池流域发挥生态系统服 务功能、维持生态健康和区域可持续发展提供参考借鉴。

1 理论框架

1.1 最小生态用地的内涵

结合已有研究^[17-20],本文认为最小生态用地可以认为是某一区域内,在保证生态系统服务功能完整的前提下,对城镇化扩张不产生阻碍作用所保有的底线型生态用地。即最小生态用地是以识别出的最少的生态用地数量和最优的空间布局来维持生态系统结构和过程的健康与完整,是维护最低限度生态系统服务的安全底线。

1.2 生态系统服务功能视角下最小生态用地的量化

生态用地发挥着重要的生态系统服务功能^[30-33]。因此,最小生态用地的识别也应与生态系统服务功能 密切相关^[21]。最小生态用地量化的结果表现为一定的数量规模及空间布局特征:数量规模是在数量上对区 域内生态用地与建设用地(非生态用地)进行权衡,保留一定数量的生态用地是区域生态系统服务功能发挥 的根本保障;空间布局则通过相关自然因子在空间上的特征组合显著影响生态过程,进而对生态用地的生态 系统服务功能产生作用。而基于已有研究^[34],在确定最小生态用地数量规模和空间布局特征方面,情景模拟 法和 MCR 模型均具有一定的适用性。

基于此,本文提出生态系统服务功能视角下最小生态用地量化的理论框架(图1):为识别区域最小生态 用地,以生态系统服务功能重要性综合评价为依据^[12–13],首先,基于源汇理论,运用 MCR 模型,构建"源"地 和"阻力面",识别出最小生态用地的规模和空间分布特征;其次,基于情景分析理论,运用情景模拟法,设置





http://www.ecologica.cn

不同情景,确定最小生态用地占比规模;最后,从土地利用类型与景观格局指数两个方面,对比分析两种方法的最小生态用地识别结果,明晰不同研究方法的适用性。

2 研究区概况与数据来源

2.1 研究区概况

滇池流域位于云贵高原中部,地处长江水系、珠江 水系和红河水系三大水系分水岭地带,地理坐标为东经 102° 30′—103° 02′,北纬 24° 28′—25° 23′,面积约 2900km²(图 2)。其行政区主要包括昆明市六区一县, 六区为官渡、西山、盘龙、五华、呈贡、晋宁,一县为嵩明。 流域整体呈现北窄中宽南较窄的特征,地形主要分为山 地、平原和水域等,亚热带湿润季风气候,气候的变化主 要受西南季风和热带大陆气团交替控制。年平均温度 为14.7℃,多年平均年降雨量935mm,降雨年内分配不 均。流域内土地利用类型主要有林地、草地、水域、农用 地、其他用地和建设用地等。其中,建设用地主要分布 在滇池流域的平地区;而农用地、草地、水域、林地及其 他用地等生态用地面积约 2267km²,主要分布在流域城 镇化水平较低的山地区和湖滨区等区域^[4](图 2)。作 为云南省城镇化水平最高的区域,快速的城镇化扩张, 对滇池流域的水质与环境产生了恶劣的影响,导致水质 下降、环境恶化、生态用地锐减等后果^[15]。目前,为应 对快速城镇化的不良影响,昆明市政府已将滇池流域划 分为三个不同功能区,即生态保护核心区、生态保护缓 冲区和绿色发展区,力求以生态环境高水平保护促进流 域经济社会高质量发展^[35]。





2.2 数据来源

数据源主要包括:(1)2018年的滇池流域遥感影像数据、DEM(30m×30m)、坡度等空间数据。空间数据 来源于中国科学院资源与环境数据云平台、地理空间数据云等。参考《土地利用现状分类(GB/T21010— 2017)》与流域实际情况,将滇池流域土地类型划分为林地、草地、水域、农用地、其他用地和建设用地6类,进 一步把林地、草地、水域、农用地、其他用地5个地类作为生态用地,从而建立研究区土地利用信息数据库(图 2)。(2)滇池流域生态系统服务重要性评价数据与评价图。生态系统服务评价数据与评价图来源于本课题 组前期研究,具体见参考文献^[4]。评价栅格大小均为30m×30m,所有图层数据投影均为Transverse_Mercator, 投影坐标系 WGS_1984_UTM_Zone_48N。

3 研究方法

3.1 MCR 模型

最小累计阻力模型(MCR 模型)是指物种在从"源"到"目的地"运动过程中所需耗费代价的模型。通过源地和 阻力面的确定,获取研究区最小耗费距离图,最终确定研究区最小生态用地范围。MCR 模型计算公式如下:

$$MCR = \int \min \sum_{j=n}^{i=m} D_{ij} \times R_i$$
(1)

式中,MCR 指最小累计阻力值, D_{ij} 指生态用地从源 i 到 j 的空间距离; R_i 表示栅格 i 对生态用地空间扩张的阻

力系数。

源地的确定。生态"源"地对维护区域生态安全和环境可持续具有重要作用,本文将研究区生态用地重 要性综合评价结果^[4]中的极重要生态用地作为 MCR 模型中生态"源"地(表1)。确定的主要原因是,综合评 价结果中的极重要生态用地是保护研究区生态安全和景观格局完整性的不可缺少的区域,是整个区域生态环 境不被破坏和社会经济稳定发展的保障。

阻力面的确定。本文从土地利用覆盖类型、生态系统服务功能重要性和建设用地扩张经济适宜性三个方 面构建"阻力面"(表 2)。

Table 1 Area and proportion of ecological "source" land by land use type									
土地利用类型	林地	草地	水域	农用地	其他用地				
Land use type	Forestland	Grassland	Water	Cropland	Other land				
栅格数量 Number of grids	998193	19219	213197	9870	37012				
面积 Area/km ²	898.37	17.30	191.88	8.88	33.31				
占"源"面积比 Ratio of "source" area/%	78.14	1.50	16.69	0.77	2.90				

表1 生态"源"地各用地类型面积及占比

表 2 MCR 模型中阻力面的综合评价标准

ble 2	Comprehensive	evaluation	criteria	for	resistance	surface	in	MCR	model
-------	---------------	------------	----------	-----	------------	---------	----	-----	-------

		阻力值 Resistance value							
	1	10	100	300	500				
阻力面	土地利用覆盖类型	≤30	30—105	105—177	177—277	>277			
Resistance surface	生态系统服务功能重要性	≤319	319—522	522—683	683—834	>834			
	建设用地扩张经济适宜性	≤32	32—105	105—155	155—227	>227			

3.2 情景模拟法

Та

根据已有研究^[18],结合滇池流域城镇化现状,设定生态用地占研究区总面积 30%,40%,50%,60%四个情景,即情景一(30%)、情景二(40%)、情景三(50%)、情景四(60%),并对各情景下提取的生态用地进行对比分析,最终确定最小生态用地范围。

3.3 景观格局分析法

景观格局分析是对组成最小生态用地的各地类在整个空间上进行数量、类型的对比分析,量化其景观结构特征。本文根据研究区自然地理环境特征,在参考相关研究的基础上^[36-37],在景观类型水平选取最大斑块面积指数(LPI)、聚合度指数(AI),在景观水平选择蔓延度指数(CONTAG),斑块密度(PD)共4个指数,分析研究区景观格局变化(表3)。采用 Fragstate 4.2 软件进行景观格局分析,4 个景观指数的具体计算公式和含义见表 3 所示。

4 结果与分析

4.1 MCR 模型的量化

基于 MCR 模型的最小生态用地量化结果如图 3 所示。从图 3 可以看出,最小生态用地栅格数量为 1275560 个,面积为 1148.00km²,占研究区生态用地面积 50.68%,占研究区总面积 39.32%。从空间分布上来 看,最小生态用地主要分布于研究区东北部、中西部以及东南部,多数呈现大面积成片特征,其中小型斑块数 量较少,多数为大型斑块;分布于研究区四周的最小生态用地区域总体上具有连接性,各斑块之间连通性较 好。从土地利用类型上看,最小生态用地的主要地类包括水域、林地、草地等。其中,林地面积为 901.08km², 占同类型用地面积比 82.49%,占最小生态用地面积 78.17%,而草地与农用地面积相对较少,面积分别为 17.26km²、8.88km²,占同类型用地面积比 12.14%、1.84%。

		Table 3 The index of landscape pattern analysis		
景观指数 Landscape index	名称缩写 Name abbreviation	计算公式 Calculation formula	备注 Remark	描述 Description
最大斑块面积指数 Largest patch index	C LPI	$LPI = \frac{\max(a_{ij})}{A} (100)$	max(<i>a_{ij}</i>) 为景观 中最大斑块的面 积; <i>A</i> 为整个景观 的总面积。	某景观类型的最大斑 块占总面积的比例,主 要反映景观斑块的优 势度和集中度。
聚合度指数 Aggregation index	AI	$AI = C_{\max} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} p_{ij} \ln p_{ij}$	C _{max} 为常数; p _i 为 i 类型斑块和 j 类型 斑块之间邻接的 概率或比例; n 为 景观中斑块类型 总数目。	考察了每一种景观类 型斑块间的连通性。 取值越小,景观越 离散。
蔓延度指数 Contagion index	CONTAG	$\text{CONTAG} = \left[1 + \frac{\sum_{i=1}^{m} \sum_{k=1}^{m} \left[P_i \times \frac{g_{ik}}{\sum_{k=1}^{m} g_{ik}} \right] \times \left[\ln \left(P_i \frac{g_{ik}}{\sum_{k=1}^{m} g_{ik}} \right) \right]}{2\ln(m)} \right] (100)$	P_i 为第 i 类斑块所 占的面积百分比; g_a 为 i 类型斑块和 k类型斑块毗邻的 数目; m 为景观中 斑块类型总数目。	主要少数景观斑块控 制整个区域景观类型 的程度。高蔓延度值 说明景观中的某种优 势斑块类型形成了良 好的连接性;低蔓延度 值则表明景观是具有 多种要素的密集格局, 景观的破碎化程度 较高。
斑块密度 Patch density	PD	$PD = \frac{\left(\sum_{i=1}^{m} N_i - 1\right)}{\sum_{i=1}^{m} A_i}$	N _i 为第 i 类景观要 素的总面积; m 为 景观中斑块类型 总数目; A 为整个 景观的总面积。	单位面积上的斑块数 量,表征景观破碎化程 度。该指标值越高,破 碎化程度越高。

表 3 景观格局分析指标表

4.2 情景模拟法的量化

四个情景下提取的生态用地结果见图 4 和表 4 所示。 对比分析四种情景:(1)空间分布上,情景一(30%)提取的 生态用地面积最小,主要分布于研究区东北部、中西部以 及南部。情景二(40%)提取的生态用地中大型斑块数量 与面积都有所增加,但各大面积斑块之间连通性仍然较 低。情景三(50%)提取的生态用地中大型斑块之间出现 一定数量的小型斑块,零散分布于大型斑块之间,一定程 度上增强了斑块之间的连接度。情景四(60%)提取的生 态用地整体上各斑块之间存在着较好的连通性,且斑块的 边缘较为完整。(2)土地利用结构上,四种情景下5个地 类随着提取的生态用地范围的增大,各地类面积增长程度 不同。其中,从情景二到情景三,各地类面积增幅最为明 显,其中水域增幅最大,由 72.48% 增长到 85.61%,增幅 13.13%。而情景四以占生态用地 60%的比例提取,尽管能 保护大多数生态用地,其中水域面积高达90%,但忽略了 社会经济的发展,一定程度上限制了城镇化发展。因此, 以情景三(50%)的生态用地范围为研究区最小生态用地 阈值,面积为1129.55km²,占研究区生态用地面积50%,占



图 3 基于 MCR 模型的最小生态用地分布情况图 Fig.3 Distribution of the minimum ecological land based on MCR model

研究区总面积 38.96%。



图 4 滇池流域不同情景生态用地范围对比图

Fig.4 Comparison of the ecological land range in different scenarios of Dianchi Lake Basin

	1	abic 4 Statistica	results of th	e ceological land	use structure	In four scenarios		
	情景一 30% Scenario 1 30%		情景二 40% Scenario 2 40%		情景三 50% Scenario 3 50%		情景四 60% Scenario 4 60%	
土地利用类型 Land use type	面积 Area/km ²	占同类型用 地面积比 Proportion of the same type of land area/%	面积 Area/km ²	占同类型用 地面积比 Proportion of the same type of land area/%	面积 Area/km ²	占同类型用 地面积比 Proportion of the same type of land area/%	面积 Area/km ²	占同类型用 地面积比 Proportion of the same type of land area/%
林地 Forestland	371.14	33.98	416.19	38.10	534.48	48.93	682.06	62.44
草地 Grassland	49.20	34.60	54.18	38.10	66.56	46.81	77.82	54.73
水域 Water	127.96	38.21	242.71	72.48	286.67	85.61	302.08	90.21
农用地 Cropland	118.19	24.52	132.42	27.47	170.86	35.45	204.01	42.33
其他用地 Other land	56.71	26.24	65.56	30.33	70.97	32.83	86.39	39.97

		
	表 4	四种情景下的生态用地土地利用结构统计结果

4.3 对比分析

4.3.1 土地利用类型

从流域尺度和行政区尺度分析两种方法量化的最 小生态用地的土地利用类型特征(图5和图6)。从图5 可以看出,流域尺度上:(1)基于 MCR 模型的最小生态 用地,占比最高的是林地,为78.17%,最低的是农用地, 为0.77%。(2)基于情景模拟法的最小生态用地,占比 最高的是林地,为47.32%,最低的是其他用地,为 6.28%。(3)最小生态用地中各用地类型占同类型用地 的面积比,不同用地类型占比差异较大。其中,林地, MCR 模型>情景模拟法,占比分别为 82.49% 和48.93%;





http://www.ecologica.cn

而草地、水域、农用地和其他用地,则表现为 MCR 模型<情景模拟法。

从图 6 与表 5 可以看出,行政尺度上,在不同行政区范围内,两种方法确定的最小生态用地总面积、组成 的各地类面积分布特征存在差异。(1)总面积来看,MCR 模型和情景模拟法确定的最小生态用地面积最大的 都是晋宁区。(2)从地类来看,林地变化差异较显著,而草地、水域、农用地和其他用地变化较小。其中,官渡 区与嵩明县的林地面积差异较大,两种方法确定的林地面积差值分别为 98.59km²和 43.92km²。官渡区与晋 宁区水域、农用地的差值较其他区域更大,两种方法确定的水域面积差值分别为 2.25km²和 34.49km²,农用地 面积差值分别为 14.75km²和 83.28km²。(3)总体而言,7 个行政区中,在五华区和西山区,两种方法确定的最 小生态用地在总面积与各地类面积分布上差异不大。例如,五华区两种方法确定的最小生态用地总面积分别 为 35.18km²和 35.55km²。





Fig.6 Comparative analysis of the minimum ecological land area quantified by two methods at the administrative scale

Table 5 The area of the minimum ecological land use type in different administrative regions												
					土地利	间用类型					总	面积
					Land ı	use type					Tot	al area
行政区 Administrative region	林地 Forestland		草地 水域 Grassland Water		农用地 Cropland		其他用地 Other land		MCR	情景		
	MCR 模型	情景 模拟法	MCR 模型	情景 模拟法	MCR 模型	情景 模拟法	MCR 模型	情景 模拟法	MCR 模型	情景 模拟法	模型	模拟法
呈贡区	126.84	77.20	0.82	9.83	39.16	51.79	1.24	36.95	3.68	11.71	171.74	187.48
官渡区	88.97	45.05	0.15	1.40	17.10	28.94	1.48	16.23	5.93	8.25	113.63	99.87
盘龙区	137.28	91.48	1.13	9.08	1.75	4.00	0.70	10.70	2.23	10.54	143.09	125.8
五华区	33.39	31.06	0.09	1.30	0.20	0.39	0.02	1.09	1.48	1.71	35.18	35.55
西山区	48.90	36.19	4.03	6.66	68.63	101.39	0.99	7.17	17.31	27.63	139.86	179.04
晋宁区	284.59	172.46	10.69	34.34	65.16	99.65	3.17	86.45	2.04	9.22	365.65	402.12
嵩明县	179.09	80.50	0.33	3.76	0.32	0.29	1.27	11.83	0.38	1.25	181.39	97.63

表 5 不同行政区最小生态用地的土地利用类型面积 $/km^2$	
----------------------------------	--

4.3.2 景观格局

如表 6 所示, MCR 模型与情景模拟法确定的最小生态用地, 从面积上看, 分别占研究区总面积的 37.42% 与 38.96%, 面积占比相近; 从景观格局指数来看, 存在一定的差异。具体而言:(1)最大斑块面积指数、蔓延度指数及聚合度指数, 情景模拟法确定的均大于 MCR 模型的, 表明情景模拟法确定的最小生态用地的优势斑块连接度更好, 景观集聚程度更高, 景观破碎度更小。(2) 而斑块密度, 情景模拟法确定的小于 MCR 模型的, 分别为 5.08 和 6.5, 表明情景模拟法确定最小生态用地的斑块密度更小, 即斑块数量更少, 破碎化程度更轻。

表 6 两种量化方法确定的最小生态用地的景观格局指数对比

Table 6 Compari	son of landscape pattern index of t	the minimum ecologica	al land quantified by two	methods
类型	最大斑块面积指数	聚合度指数	蔓延度指数	斑块密度
Туре	LPI/%	AI/%	CONTAG/%	$PD/(n/100 hm^2)$
MCR 模型 MCR model	6.08	92.45	38.67	6.50
情景模拟法 Scenario simulation met	hod 10.62	93.39	39.57	5.08

5 讨论与结论

5.1 结论

(1)以 MCR 模型确定的滇池流域最小生态用地面积为 1148.00km²,占滇池流域生态用地面积 50.68%, 占研究区总面积 39.32%,用地类型以林地、水域为主,发挥着水源涵养、水土保持等重要生态系统服务功能, 主要分布于滇池流域东北部、中西部以及东南部,呈现出大面积成片集聚分布特征。

(2)以情景模拟法确定的滇池流域最小生态用地面积为1129.55km²,占滇池流域生态用地面积50%,占 研究区总面积38.96%;用地类型以林地、草地、水域为主,土地利用类型多样,发挥着水资源积蓄、农用地保 护、水土流失防治等重要作用,在进行生态用地保护的同时也不对社会经济发展产生阻碍。主要分布于研究 区东北部、中西部以及南部,斑块之间具有较好的连通性。

(3)对比分析 MCR 模型与情景模拟法确定的最小生态用地,在土地利用类型方面,总体上二者的组成地 类都以林地为主,但在流域和行政区尺度上表现出差异化分布特征;而在景观格局特征方面,情景模拟法确定 的最小生态用地,其最大斑块面积指数、蔓延度指数及聚合度指数均大于 MCR 模型确定的,因此,优势斑块连 接度更好,景观集聚程度更高,景观破碎度更小。

5.2 讨论

本文主要通过 MCR 模型法与情景模拟法分别对滇池流域最小生态用地进行量化,得到最小生态用地范

围为1148.00km²和1129.55km²,分别占流域总面积的39.32%和38.96%。识别结果能较好地在空间和数量 上确定出对滇池流域具有重要生态系统服务功能的生态用地,表明本文量化方法具有可行性。进一步对比姚 美岑^[14]、盖兆雪等^[26]的相关研究结果,发现在最小生态用地数量占比上具有相似性,上述研究中松花江流域 和延龙图地区的最小或底线型生态用地约占研究区总面积25%—50%,而本文中确定的滇池流域最小生态用 地也在此范围内。另一方面,识别结果也表明两种方法量化的最小生态用地面积存在差异。分析原因主要 是,虽然两种方法都是在滇池流域生态系统服务功能重要性综合评价结果的基础上进行最小生态用地的识 别,但识别原理不同。MCR模型是通过构建"源"地和"阻力面"进行最小生态用地的识别;而情景模拟法则 是通过重要性综合评价结果的指数,从高到低设定4个不同情景,在综合评价结果中提取相应的生态用地范 围,对比分析各情景下生态用地土地利用类型及空间分布的合理性,最终确定某一情景为区域最小生态 用地^[18]。

结果还显示,MCR 模型与情景模拟法在确定滇池流域最小生态用地的过程中,体现了不同的优势。具体 来说,首先,MCR 模型的研究结果更能体现出滇池流域作为特殊的高原湖泊流域,其生态用地在水源涵养等 生态系统服务功能的重要性。原因是,构建 MCR 模型时,综合考虑滇池流域主要生态系统服务功能,选取生 态用地重要性综合评价结果中面积大于 10km²的极重要等级生态用地为"源",减少了因仅考虑面积大小,直 接选取大面积水域、自然保护区而忽略其他具有重要生态系统服务功能的生态用地造成的误差,这与谢花林 等^[34]研究结果相类似。其次,情景模拟法量化出的最小生态用地,优势斑块连接度更好、景观破碎度更低,其 景观格局具有更强的稳定性,土地利用类型也呈现出多样化特征,使得选出的最小生态用地既符合理论上的 景观格局优化和重要生态功能保护,又能满足滇池流域未来城市发展目标对生态环境的需求;同时也不会因 过度关注生态而忽略经济社会发展,这与张林波等^[18]研究结果相类似。此外,值得注意的是,4 个景观格局 指数中,最大斑块面积指数(LPI),情景模拟法高出 MCR 模型 4.54%,差异较大。原因是,虽然情景模拟法和 MCR 模型两种方法确定出来的最大斑块均为滇池水域,但水域边界范围不同,前者的面积大于后者。因此, 在最小生态用地识别过程中,需要综合发挥两种方法的优势,不仅能优化流域生态用地和景观格局,而且有助 于维护生态用地的景观生态过程与格局的连续性,特别是对维护关键生态过程和提供重要生态系统服务的生 态用地及其空间部位具有重要意义^[17]。

研究结果能为滇池流域未来生态用地的空间布局规划及区域土地利用格局优化提供参考。但对 MCR 模型与情景模拟法确定的最小生态用地进行对比分析时,景观格局指数仅选取部分指数进行对比分析,存在一定局限性。未来研究可以结合流域特征,从边缘密度、整体性指数方面更全面选取景观格局指数,并结合不同时间段的最小生态用地时空演变特征分析,引入新的量化模型,全面评价并筛选出最合适的量化方法。

参考文献(References):

- [1] 彭建, 汪安, 刘焱序, 马晶, 吴健生. 城市生态用地需求测算研究进展与展望. 地理学报, 2015, 70(2): 333-346.
- [2] 陶陶. 我国生态用地的研究进展与展望. 地域研究与开发, 2014, 33(4): 126-130, 167.
- [3] Graymore M L M, McBride D. Socio-ecological value of wetlands: the dilemma of balancing human and ecological water needs. Australasian Journal of Environmental Management, 2013, 20(3): 225-241.
- [4] 刘林, 雷冬梅, 冉玉菊, 张渊. 基于生态系统服务功能的滇池流域关键性生态用地识别. 农业工程学报, 2021, 37(11): 277-284.
- [5] Sousa D, Davis F W, Easterday K, Reynolds M, Riege L, Butterfield H S, Katkowski M. Predictive ecological land classification from multidecadal satellite imagery. Frontiers in Forests and Global Change, 2022, 5: 867369.
- [6] 邢晓露,郭岚,杨梅焕,张全文,王益展.低山丘陵区县域生态用地演变及生态服务价值响应.农业资源与环境学报,2021,38(5): 900-908.
- [7] Yi H, Güneralp B, Kreuter U P, Güneralp İ, Filippi A M. Spatial and temporal changes in biodiversity and ecosystem services in the San Antonio River Basin, Texas, from 1984 to 2010. The Science of the Total Environment, 2018, 619/620: 1259-1271.
- [8] Brown M G, Quinn J E. Zoning does not improve the availability of ecosystem services in urban watersheds. A case study from Upstate South Carolina, USA. Ecosystem Services, 2018, 34: 254-265.

20 期

[9]	陈忠媛, 高永年.	长江水系湖泊型流域生态用地长时间序列时空变化分析.	中国科学院大学学报,	2022, 39(2):	172-184
-----	-----------	---------------------------	------------	--------------	---------

- [10] 卫新东, 张健, 王筛妮, 蔺康莉, 王宁, 刘永鹏. 黄河流域 2000—2020 年生态用地格局变化与分异趋势. 生态学杂志, 2021, 40(11): 3424-3435.
- [11] Tran D, Xu D W, Alwah A A Q, Liu B X. Research of urban suitable ecological land based on the minimum cumulative resistance model: a case study from Hanoi, Vietnam. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 300(3): 032084.
- [12] Méndez López M E, Pujadas Botey A, Castillo A. Analysing participation from a retrospective approach: the Ecological Land Use Planning Program of the Jalisco Coast (ELUPPJC), Mexico. Regional Studies, Regional Science, 2020, 7(1): 445-462.
- [13] 张亦清,赵翔,潘雨飘,刘中秋,尹峰. 湖北省 2009—2019 年主要生态用地的时空演变特征及驱动因素. 水土保持研究, 2023, 30(5): 417-426.
- [14] 姚美岑. 基于 GIS 的延龙图地区最小生态用地范围空间识别研究[D]. 延吉: 延边大学, 2018.
- [15] 朱加应,彭双云.近30年来滇中城市群生态用地变化轨迹时空演变特征及其驱动机制.水土保持学报,2024,38(1):278-288.
- [16] 陈瑜琦,张智杰,郭旭东,吕春艳,汪晓帆.中国重点生态功能区生态用地时空格局变化研究.中国土地科学,2018,32(2):19-26.
- [17] 俞孔坚,乔青,李迪华,袁弘,王思思.基于景观安全格局分析的生态用地研究——以北京市东三乡为例.应用生态学报,2009,20(8): 1932-1939.
- [18] 张林波,李伟涛,王维,熊严军.基于 GIS 的城市最小生态用地空间分析模型研究——以深圳市为例.自然资源学报,2008,23(1): 69-78.
- [19] 周朕,蒙吉军.基于改进生态足迹模型与生态重要性识别的最小生态用地优化——黑河中游案例研究.干旱区地理,2016,39(3): 513-520.
- [20] 张颖, 王群, 李边疆, 王万茂. 应用碳氧平衡法测算生态用地需求量实证研究. 中国土地科学, 2007, 21(6): 23-28.
- [21] 张继平,乔青,刘春兰,王海华,裴厦.基于最小累积阻力模型的北京市生态用地规划研究.生态学报,2017,37(19):6313-6321.
- [22] 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: 253-260.
- [23] 关小克,张凤荣,王秀丽,赵华甫,姜广辉.北京市生态用地空间演变与布局优化研究.地域研究与开发,2013,32(3):119-124.
- [24] 程迎轩,王红梅,刘光盛,郑标,王海云,刘翠霞.基于最小累计阻力模型的生态用地空间布局优化.农业工程学报,2016,32(16): 248-257,315.
- [25] Williamson J C, Bestelmeyer B T, McClaran M P, Robinett D, Briske D D, Ben Wu X, Fernández-Giménez M E. Can ecological land classification increase the utility of vegetation monitoring data? Ecological Indicators, 2016, 69: 657-666.
- [26] 盖兆雪,孙萍,张景奇. 松花江流域哈尔滨段最小生态用地需求研究. 地域研究与开发, 2020, 39(2): 132-136.
- [27] 贵立德. 兰州市城镇化水平与其生态用地的供求关系. 水土保持通报, 2012, 32(4): 298-302.
- [28] 夏敏,张子红,赵炳梓,文博,刘敬杰.快速城镇化地区镇域生态用地变化模拟及其生态系统服务价值响应.土壤,2018,50(5): 1022-1031.
- [29] 党雪薇,周亮,胡凤宁,袁博,唐建军.关中平原城市群扩张对生态用地的多尺度影响.生态学报,2022,42(7):3020-3032.
- [30] 王志涛, 哈凯, 门明新. 沽源县生态用地重要性识别及生态用地类型划定. 土壤通报, 2016, 47(4): 769-776.
- [31] 高吉喜,刘晓曼,王超,王勇,付卓,侯鹏,吕娜.中国重要生态空间生态用地变化与保护成效评估.地理学报,2021,76(7): 1708-1721.
- [32] 刘林. 基于生态系统服务功能的滇池流域最小生态用地量化对比研究[D]. 昆明:云南财经大学, 2021.
- [33] 管青春,郝晋珉,石雪洁,高阳,王宏亮,李牧.中国生态用地及生态系统服务价值变化研究.自然资源学报,2018,33(2):195-207.
- [34] 谢花林,姚干,何亚芬,张道贝.基于 GIS 的关键性生态空间辨识——以鄱阳湖生态经济区为例.生态学报, 2018, 38(16): 5926-5937.
- [35] 昆明市人民政府办公室.昆明市人民政府关于印发滇池"三区"管控实施细则(试行)的通知.(2022-12-29)[2024-3-23].https://www.km.gov.cn/c/2022-12-29/4624543.shtml.
- [36] 邱陈澜,王彩侠,章瑞,冯悦,张云路,李雄,王凯平.京津冀城市群生态空间固碳服务功能及其与景观格局的关系特征.生态学报, 2022,42(23):9590-9603.
- [37] 杨婉清,杨鹏,孙晓,韩宝龙.北京市景观格局演变及其对多种生态系统服务的影响.生态学报, 2022, 42(16): 6487-6498.