

DOI: 10.5846/stxb202006201612

何毅,唐湘玲,代俊峰.漓江流域生态系统服务价值最大化的土地利用结构优化.生态学报,2021,41(13):5214-5222.

He Y, Tang X L, Dai J F. Land-use structure optimization for the Lijiang River basin ecosystem service value maximization. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41 (13): 5214-5222.

# 漓江流域生态系统服务价值最大化的土地利用结构优化

何毅<sup>1</sup>, 唐湘玲<sup>1,\*</sup>, 代俊峰<sup>2</sup>

1 桂林理工大学地球科学学院, 桂林 510004

2 桂林理工大学环境科学学院, 桂林 510004

**摘要:**土地利用结构优化是促进生态系统可持续发展的重中之重,而生态管理的最终目标是优化生态系统服务,使生态系统提供的服务达到最大化。选择典型生态脆弱区漓江流域为研究区,将整个生态系统服务价值的最大化作为研究目标,首先结合野外实验和五期 Landsat 高分遥感影像获取基础数据,对研究区 1998—2018 年各项生态系统服务价值进行估算,然后结合灰色线性模型对 2018—2028 年价值进行预测,借助 Lingo 软件提出生态效益最大化的土地结构优化方案,进而对优化前后研究区生态系统服务价值进行比较与分析。结果表明:(1)近 20 年间研究区主要土地利用类型一直以林地与耕地为主,所占比例保持在整个流域的 95%。水域与耕地面积逐年减少,林地、建设用地及未利用地面积持续增加。此外,未利用地面积发生的变化最为显著,增加了近 30 倍,主要由林地与耕地转变而来。(2)研究区生态系统服务价值总体约减少了  $19.55 \times 10^6$  元,呈现先上升后下降趋势,并将长期处于下降趋势,至 2028 年时流域生态系统服务价值将减少至  $8067.43 \times 10^6$  元。在流域整体生态系统中,林地价值最高,在历年约占流域总价值的 86%,其次是水域及耕地,分别占比 8%、6%。(3)对研究区进行优化后,漓江流域总生态系统服务价值增长了 2%,其中主要来源于林地与水域面积的增加,提高了生态系统调节服务的供给能力,耕地、建设用地面积略微增加,未利用地面积显著减少,基本与 2008 年水平持平。本研究通过优化喀斯特地区关键生态系统服务价值,为该区域生态管理提供科学支撑。

**关键词:**土地利用;生态系统服务价值;灰色线性规划;结构优化

## Land-use structure optimization for the Lijiang River basin ecosystem service value maximization

HE Yi<sup>1</sup>, TANG Xiangling<sup>1,\*</sup>, DAI Junfeng<sup>2</sup>

1 Guilin University of Technology Institute of Earth Science, Guilin 510004, China

2 Guilin University of Technology Institute of Environmental Science, Guilin 510004, China

**Abstract:** The land utilization structure optimization will promote the sustainable development of ecosystems, which is the top priority. The ultimate goal of ecological management is to optimize the ecosystem services to maximize the services provided by the ecosystem. The paper select the typical ecologically fragile Lijiang River basin as the study area, and the maximization of the value of the whole ecosystem services as the research target. First, combined with field experiments and five phases of Landsat high-resolution remote sensing images to obtain the basic data, estimated each item from 1998 to 2018 for the value of ecosystem services research area. Then combined with the gray linear model for predicting the value in 2018—2028. Final, with the help of Lingo software so as to put forward the optimization scheme of land structure to

基金项目:国家自然科学基金(51979046);广西自然基金项目(2018GXNSFAA050009,2018GXNSFAA294087,2020GXNSFAA297266)

收稿日期:2020-06-20; 网络出版日期:2021-04-28

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: txling@glut.edu.cn

maximize ecological benefits, and then further to making comparison and analysis for the ecosystem value in research area where were optimized before and after. The results showed that (1) Nearly 20 years, in study area the principal land-use types are forestland and cultivated land, which accounts for 98% of whole drainage basin. The water area and cultivated land area decreased year by year, but the forestland and construction land as well as unused land area continue to increase. In addition, unused land area had changed obviously, which even increased around 30 times and mainly converted from forest land and cultivated land. (2) During studying, the value of ecosystem service had decreased around  $19.55 \times 10^6$  RMB, which showed the trend of down after up and will keep such trend in long term. Till 2028, the drainage basin ecosystem services values will be reduced to  $8067.43 \times 10^6$  RMB. So, the forest land value is the highest among the overall ecosystem of the drainage basin, which occupies around the 86% of basin total value in past years, followed by the water area and cultivated land area, which account for 8% and 6% separately. (3) After optimizing the study area, the total ecosystem services values in the Lijiang River basin has increased 2%, which mainly because the forest land and water area increased and improved the supply capacity for the ecosystem regulating services. Meanwhile, the arable land and construction land increased slightly, and the area of the unused land decreased significantly, which keeps the same level in 2008. This study provided the scientific support for ecological management in karst areas by optimizing the key ecosystem services values.

**Key Words:** land use; ecosystem service value; grey linear programming; structure optimization

生态系统服务理论的研究首次出现是在 Marshall 于 19 世纪 60 年代出版的《Man and Nature》这一著作中,他对第一次工业革命期间人类认为资源无穷无尽的错误想法进行了深入的批判<sup>[1-2]</sup>。早期人们对生态系统提供的各项服务功能的认知大多局限在其供给的物质产品,而容易忽视生态系统所具备的调节、支持及文化功能,进而催生出许多因盲目发展、扩张而导致的环境问题<sup>[3]</sup>。在这一背景下,2001 年联合国首次提出要开展面向全球的生态系统评估方案,结果表明在人类活动的影响下,目前自然界生态系统的各项服务功能正处于持续衰退的状态,并可能在未来 50 年间长期处于这一趋势<sup>[4-6]</sup>。此后,随着广大学者研究的进一步深入,关于生态系统服务的各项理论不断朝着更科学合理的方向发展<sup>[7-12]</sup>。

目前国内外对生态系统服务价值(Ecosystem Services Values, ESV)评估的方法已逐步成型<sup>[13-18]</sup>。由此引申出众多通过优化研究区整体土地利用结构来改善提高地区土地生态价值的方法,如徐杰等<sup>[19]</sup>和魏中龙等<sup>[20]</sup>通过研究不同植物间光合作用对环境的生态补偿量,对研究区土地利用现状进行优化,但此类研究没有充分考虑不同土地利用类型及其变化对生态系统服务价值的影响。又如唐丽静等<sup>[21]</sup>采用生态足迹法、史云扬等<sup>[22]</sup>采用模糊两阶段算法及郑江坤等<sup>[23]</sup>采用 CLUE-S 模型,通过对国民经济产值的测算进行土地利用的优化,此类研究虽然弥补了上述研究的不足,但较为关注的是土地利用的数量变化方面,却忽略了自然、经济、政策等多重因素对土地利用结构的影响。此外,还有部分学者通过改变土地利用的空间结构以实现其优化,如 Arowolo 等<sup>[24]</sup>、姜忆湄等<sup>[25]</sup>、郭椿阳等<sup>[26]</sup>虽然考虑了土地利用的空间变化,但未将其与生态系统服务价值空间变化有机结合。目前,生态系统服务价值的评估与研究大多基于一段时期的统计数据进行静态评价<sup>[27-30]</sup>,而对其未来变化的动态预测及优化的研究较少。本文采用的灰色线性规划是一种动态的线性规划,可通过对不同参数之间的调整得出最优的方案,从而使规划在设计上灵活变通,给予决策者更大的选择空间,进而提出土地利用优化的可行性措施与建议。

漓江流域是世界岩溶地貌代表性区域<sup>[31]</sup>。2018 年 3 月,广西桂林获批国家可持续发展议程创新示范区。其中漓江流域作为桂林岩溶地貌中的典型,应超前并长期重视保护漓江流域的生态环境,使其持续保持优良状态<sup>[32-34]</sup>。而如今在经济和当地旅游服务行业快速发展的影响下,其城镇化的加快,经济活动和大量游客的涌入使得漓江流域土地利用格局发生了显著的变化,不少生态环境问题也陆续涌现。因此,本文选取典型喀斯特生态脆弱区——漓江流域为研究区,分析了 1998—2018 年 20 年间流域土地利用结构的调整对生态系统

的影响,在此基础上选用 GM(1,1) 灰色线性模型对 2018—2028 年漓江流域未来生态价值进行预测,探讨出一种以生态效益最大化为目标的土地利用结构优化方案,旨在通过提高喀斯特关键地区生态系统服务价值,为该区域生态建设、城市规划管理提供参考与数据支持。

## 1 研究区概况

漓江流域地处广西壮族自治区东北部,发源于桂林市兴安县越城岭猫儿山,由北向南途经桂林市区,至平乐三江口为止,全段约 214 km。地跨兴安县、灵川县、桂林市、阳朔县及平乐县等 5 个县市,总流域面积约 5857.11 km<sup>2</sup>,漓江流域介于 110° 07'—110° 47' E, 24° 38'—25° 53' N 之间(图 1),地处低纬,气候温和,降水主要集中在夏季,属于典型的亚热带季风气候,日照充足,年均温度为 18.8℃,年均蒸发量为 1482.5 mm,流域内降水主要分布于西北部地区,东南部地区降水较少,平均降水量为 1725.5 mm。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源与预处理

本研究选择漓江流域 5 期 Landsat 影像作为遥感数据源,其由美国地勘局(USGS)官方网站(<https://earthexplorer.usgs.gov>)提供,空间分辨率为 30 m,对于部分缺乏高质量遥感影像(云覆盖率低于 5%)的区域,则主要采用对比分析法,即利用相近时段的影像数据分类处理来替换云覆盖区。基于 Envi 5.3 软件,对 5 期遥感影像预处理后,根据《中国土地分类系统》与遥感影像等特点,采用最大似然法和人工目视判读的方式对流域土地利用类型分类,将土地利用类型划分为耕地、林地、水域、建设用地、未利用地等 5 种类型,最后获得整个流域的土地利用类型图。其中粮食产量、种植面积等数据主要来源于 2018 年《桂林市经济社会统计年鉴》及部分文献资料等。

### 2.2 生态服务价值系数修正与价值计算

结合漓江流域实际情况,先对目前农田单位面积产粮的实际价值进行修正,选取了漓江流域主要粮食作物种类,包括早稻、中稻、晚稻及玉米等,根据桂林市 2018 年各类粮食种植面积以及其经济产值,算出各类粮食单位面积的实际价值。此外,根据谢高地等的研究,单个当量因子价值约为平均粮食单产实际价值的 1/7<sup>[35-36]</sup>,其计算公式为:

$$VC = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{M_i} \quad (1)$$

式中,VC 表示单个当量因子的价值;*i* 表示研究区主要的各种粮食作物;*n* 表示研究区主要粮食作物的类别总量;*m<sub>i</sub>* 表示研究区第 *i* 种粮食作物的经济产值;*M<sub>i</sub>* 表示研究区第 *i* 种粮食作物的总播种面积。

进而确定研究期内漓江流域生态系统服务中单个当量因子为 852.42 元/hm<sup>2</sup>。参考谢高地等<sup>[37]</sup>提出的价值当量表,可以推算出研究区各土地利用类型的单位面积生态系统服务价值(表 1),计算公式为:

$$ESV = \sum A_k \times VC_k \quad (2)$$

式中,*A<sub>k</sub>* 表示 *k* 类土地利用类型的面积,*VC<sub>k</sub>* 表示 *k* 类土地类型的单位面积生态系统服务价值。

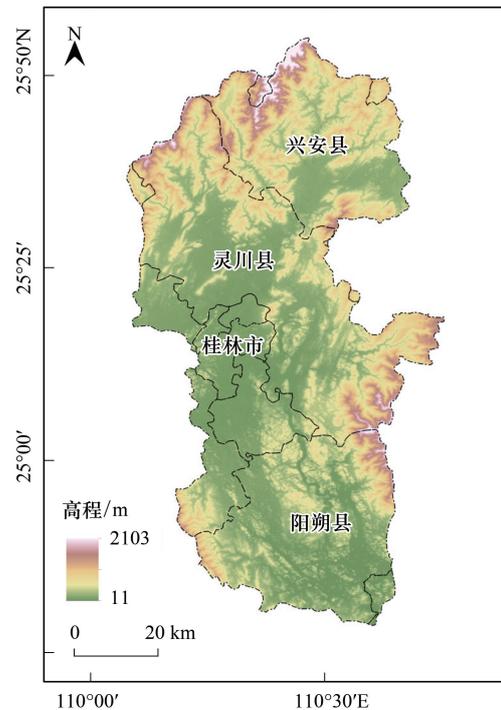


图 1 研究区域示意图

Fig.1 Schematic diagram of the study area

表 1 漓江流域生态系统单位面积生态服务价值/(元/hm<sup>2</sup>)

Table 1 Ecological service value of per unit area of the ecosystem in Lijiang River Basin

| 一级类型<br>Primary type        | 二级类型<br>Secondary type | 林地<br>Forest land | 水域<br>Waters | 耕地<br>Farm land | 建设用地<br>Construction land | 未利用地<br>Unutilized land |
|-----------------------------|------------------------|-------------------|--------------|-----------------|---------------------------|-------------------------|
| 供给服务<br>Provision services  | 食物生产                   | 215.24            | 681.94       | 941.92          | 0.00                      | 8.52                    |
|                             | 原料生产                   | 494.40            | 196.06       | 208.84          | 0.00                      | 25.57                   |
|                             | 水资源供给                  | 255.73            | 7066.56      | -1112.41        | 0.00                      | 17.05                   |
| 调节服务<br>Regulation services | 气体调节                   | 1625.99           | 656.36       | 758.65          | 17.05                     | 93.77                   |
|                             | 气候调节                   | 4865.19           | 1952.04      | 396.38          | 0.00                      | 85.24                   |
|                             | 净化环境                   | 1425.67           | 4730.93      | 115.08          | 85.24                     | 264.25                  |
|                             | 水文调节                   | 3183.79           | 87151.42     | 1274.37         | 25.57                     | 179.01                  |
| 支持服务<br>Support service     | 土壤保持                   | 1979.75           | 792.75       | 443.26          | 17.05                     | 110.81                  |
|                             | 维持养分循环                 | 151.30            | 59.67        | 132.13          | 0.00                      | 8.52                    |
|                             | 生物多样性                  | 1802.87           | 2173.67      | 144.91          | 17.05                     | 102.29                  |
| 文化服务<br>Cultural service    | 美学景观                   | 790.62            | 1611.07      | 63.93           | 8.52                      | 42.62                   |
| 合计 Total                    |                        | 16790.54          | 107072.48    | 3367.06         | 170.48                    | 937.66                  |

### 2.3 敏感性分析

本研究引入经济学中的弹性系数进行敏感性指数 (Coefficient of Sensitivity,  $CS$ ) 分析, 由此验证  $VC$  对  $ESV$  结果的准确性, 当  $CS > 1$  时, 表示  $ESV$  对于  $VC$  是富有弹性的, 其中 1% 的  $VC$  变动会引起  $ESV$  高于 1% 的变动, 当  $CS < 1$  时, 表示  $ESV$  对于  $VC$  是缺乏弹性的, 其中 1% 的  $VC$  变动会引起  $ESV$  低于 1% 的变动, 则研究结果可信。

$$CS = \left| \frac{(ESV_q - ESV_p) / ESV_p}{(VC_{qk} - VC_{pk}) / VC_{pk}} \right| \quad (3)$$

式中,  $p$  和  $q$  分别表示价值系数调整前后。

### 2.4 灰色线性规划

$GM(1, 1)$  是一种无需大量时间序列数据, 仅需通过四组以上连续的数据就能够达到较高精度预测的一阶线性动态模型。其形式为:

$$\hat{x}^{(1)}(t+1) = \left( x_{(1)}^{(0)} - \frac{u}{a} e^{-at} \right) + \frac{u}{a}, \quad (x_{(1)}^{(0)} \supset x_{(0)}^{(1)}) \quad (4)$$

$$\hat{x}^{(0)}(t) = \hat{x}^{(1)}(t) - \hat{x}^{(1)}(t-1) \quad (5)$$

式中,  $a, u$  为常数;  $t$  为时间, 取值范围为  $(1, 2, 3, \dots, n)$ 。

本研究根据目前漓江流域土地利用结构变化, 结合社会经济及生态环境需求, 以 2018 年为规划基础年, 2028 年为规划目标年, 通过优化喀斯特关键地区土地利用结构, 寻求生态效益与社会经济效益的帕累托最优集合, 为该区域生态管理提供科学支撑。

#### 2.4.1 模拟变量及目标函数设置

根据漓江流域土地利用结构及模拟变量设置的特点, 研究模型共设置 5 个变量进行决策, 因此分类如下:  $X_1$  表示林地面积;  $X_2$  表示水域面积;  $X_3$  表示耕地面积;  $X_4$  表示建设用地面积;  $X_5$  表示未利用地面积。

本文结合流域土地利用结构特点, 对生态系统服务价值最大化目标进行漓江流域土地利用结构优化研究, 旨在探寻使漓江流域各类土地产生最大化生态效益的优化配置方案。根据流域社会、经济条件, 设定目标函数表示为:

$$F(X)_{\max} = 16790.54 X_1 + 107072.48 X_2 + 3367.06 X_3 + 170.48 X_4 + 937.66 X_5$$

式中,  $F(X)$  为流域生态系统服务总价值, 各项系数为表 1 中不同土地利用类型的单位面积价值。

## 2.4.2 约束条件设置

一直以来土地利用结构优化都受到社会、经济、政策等诸多方面限制,因此充分考虑社会、经济发展需求与桂林市土地政策后,对于其中不同土地利用类型设置了相应约束条件:

(1) 总面积约束:根据土地面积总量平衡原理,优化后流域内各土地利用类型总面积应前后保持不变,即  $S = X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 = 58.57 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。

(2) 林地需求约束:由于喀斯特地貌本身生态环境的脆弱性,地表植被受人类活动破坏后极易出现水土流失、石漠化等现象,因此,从漓江流域林地面积变化趋势上来看,应以目前保有量为底线,即  $X_1 \geq 42.02 \text{ hm}^2$ 。

(3) 水域需求约束:近 20 年间,漓江流域水域萎缩较为严重,为持续保障城市居民的正常生活及生产用水,因此现有水域面积将适当增加。但由于 1998 年桂林出现特大洪灾,水域面积异常增加,在正常情况下不应超过 1998 年水域面积,即  $0.54 \times 10^4 \text{ hm}^2 \leq X_2 \leq 0.63 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。

(4) 耕地需求约束:将 1998—2018 年 5 期漓江流域耕地面积数据通过 GM(1,1) 模型进行演算,其中发展系数  $a$  为 0.0874,绝对值小于 0.3,可开展中长期的预测,进而预测出 2028 年时研究区耕地面积将减少到  $102426.25 \text{ hm}^2$ 。由于 2020 年后的城市规划资料暂时难以获取,因此根据《桂林市土地利用总体规划 2006—2020 年》的限定条件进行推定,为充足保障流域内社会经济的稳定运行,因此优化后流域耕地面积不得低于现有面积,即  $X_3 \geq 12.18 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。

(5) 建设用地需求约束:在满足生态效益最大化的前提下,为保障漓江流域经济社会发展,到 2028 年流域建设用地面积不得低于 2018 年水平,以满足城市化需要,即  $X_4 \geq 2.78 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。

(6) 未利用地需求约束:研究期后 10 年间,由于城市建设、采石场开采以及大量农民外出务工导致部分耕作条件差的农田、果林被撂荒,导致以裸地为主的未利用地面积突增,极易形成地质灾害易发区,严重破坏了漓江流域原有生态环境基础,为保护流域生物多样性,优化生态功能区布局,将对未利用地开展人工造林、封山育林等治理工程,旨在恢复至 2008 年以前水平,因此未利用地面积将减小,即  $0.07 \times 10^4 \text{ hm}^2 \leq X_5 \leq 1.07 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。

## 3 结果分析

### 3.1 土地利用结构变化分析

通过转移矩阵分析后,对 1998—2018 年间土地利用结构数据(图 2)研究可以得到,近 20 年漓江流域主要土地利用类型一直以林地与耕地为主,比重约占整个流域的 95%。在变化方面,水域与耕地面积逐年减少,未利用地面积发生的变化最为显著,增加了近 30 倍,林地与建设用地面积也持续增加,增长速率分别为  $0.35 \times 10^4 \text{ hm}^2/\text{a}$  及  $0.51 \times 10^4 \text{ hm}^2/\text{a}$ 。研究期间,新增的未利用地主要来自于  $0.55 \times 10^4 \text{ hm}^2$  的林地与  $0.48 \times 10^4 \text{ hm}^2$  的耕地,建设用地变化幅度次之,其中有 35% 由周边耕地转换而来,耕地面积减少的绝大部分转变为了林地,水域面积虽然逐年萎缩,但是变化幅度不大,相比 1998 年间有 2.43% 的水域转变成了未利用地。

### 3.2 生态服务价值时空变化

根据 ESV 计算公式(1),分别估算出漓江流域各年份的 ESV(表 2),从表中可知 1998—2018 年期间,ESV 总体上呈现先上升后下降的变化趋势,最高值为 2008 年的  $8120.63 \times 10^6$  元,最低值为 2018 年的  $8054.33 \times 10^6$  元,20 年间 ESV 约减少了  $19.55 \times 10^6$  元。在流域整体生态系统中,林地价值最高,在历年约占流域总价值的 86%,其次是水域及耕地,分别占比 8%、6%。在 1998—2008 年间,流域总 ESV 呈上升趋势,其中绝大部分增长的价值均由林地贡献,极大的弥补了水域与耕地价值下降带来的颓势,建设用地与未利用地虽然一直保持增加趋势,然而其价值较低,作用有限。而在 2008—2018 年间,虽然主体地位的林地价值仍保持上升势头,但由于幅度不大,且水域与耕地价值的持续下降,而建设用地与未利用地仅仅增长  $11.14 \times 10^6$  元,进而导致总 ESV 出现负增长,流域后 10 年间接损失了约  $66.3 \times 10^6$  元。综上所述,漓江流域总 ESV 与其中不同土地利用类型的变化紧密相关,不同土地利用类型间的相互转移导致了流域生态效益的上下波动。

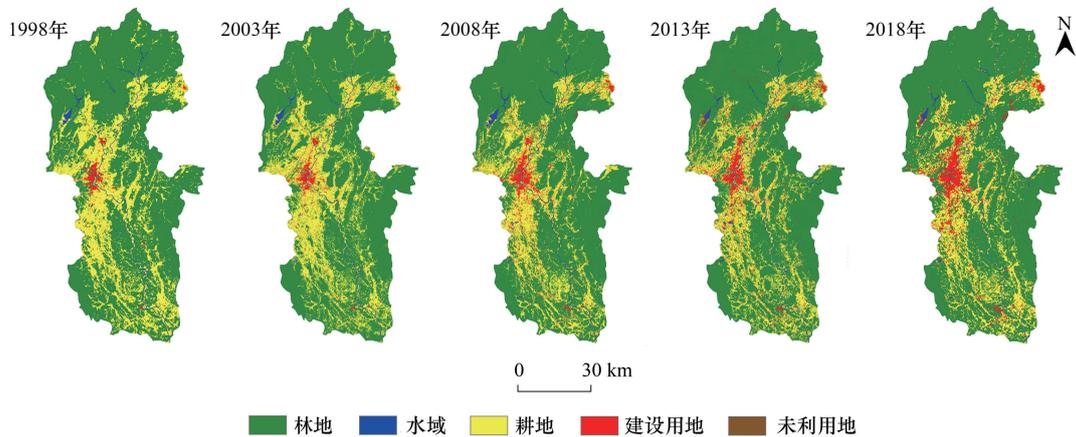


图 2 1998—2018 年漓江流域土地利用图

Fig.2 Land use map of Lijiang River from 1998 to 2018

表 2 漓江流域生态系统服务价值表/ $10^6$ 元

Table 2 Ecosystem service value of Lijiang River

| 年份<br>Time | 林地<br>Forest land | 水域<br>Waters | 耕地<br>Farm land | 建设用地<br>Construction land | 未利用地<br>Unutilized land | 合计<br>Total |
|------------|-------------------|--------------|-----------------|---------------------------|-------------------------|-------------|
| 1998       | 6837.99           | 678.82       | 555.60          | 1.15                      | 0.32                    | 8073.88     |
| 2003       | 6875.12           | 665.86       | 531.06          | 2.02                      | 0.41                    | 8074.47     |
| 2008       | 6963.38           | 658.31       | 495.35          | 2.90                      | 0.69                    | 8120.63     |
| 2013       | 7020.72           | 635.00       | 447.00          | 3.53                      | 7.66                    | 8113.91     |
| 2018       | 7055.75           | 574.16       | 409.7           | 4.74                      | 9.99                    | 8054.33     |

### 3.3 敏感性分析

本研究通过上下浮动调整 50% 后的各土地利用类型的价值系数对漓江流域 1998—2018 年的 ESV 进行敏感性指数的计算,由表 3 分析可知,5 种土地利用类型的敏感性指数均小于 1,因此研究结果是可信的。其中,水域、耕地、建设用地及未利用地的敏感性指数均小于 0.1,说明其 VC 的准确性对流域总 ESV 影响较小。而林地的敏感性指数高达 0.8469—0.8760,说明林地的 VC 每提高 1%,流域 ESV 将增加 0.8469%—0.8760%,远超其他四种地类。结果表明,流域 ESV 对林地的价值系数十分敏感,为更好实现生态价值最大化的优化目标,需要着重关注林地面积的变化对漓江流域 ESV 的影响。

表 3 生态系统服务价值敏感性指数表

Table 3 Sensitivity index of ecosystem service value

| 土地利用类型 Land use type   | 1998   | 2003   | 2008   | 2013   | 2018   |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 林地 Forest land         | 0.8469 | 0.8515 | 0.8575 | 0.8653 | 0.876  |
| 水域 Waters              | 0.0841 | 0.0825 | 0.0811 | 0.0783 | 0.0713 |
| 耕地 Farm land           | 0.0688 | 0.0658 | 0.061  | 0.0551 | 0.0509 |
| 建设用地 Construction land | 0.0001 | 0.0003 | 0.0004 | 0.0004 | 0.0006 |
| 未利用地 Unutilized land   | 0.0001 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0009 | 0.0012 |

### 3.4 生态系统服务价值变化趋势预测

根据 1998—2018 年漓江流域各类土地利用类型面积为 GM(1,1) 动态预测模型的原始样本集,设置步长为 5 年,得到流域不同类型土地的预测模型,见表 4。

表 4 1998—2028 年漓江流域不同类型土地的预测模型

Table 4 Prediction models of different types of land in the Lijiang River from 1998 to 2028

| 土地利用类型<br>Land use type | GM(1,1) 预测模型<br>GM (1,1) prediction model                  | 发展系数<br>Development<br>coefficient | 模拟精度<br>Simulation<br>precision/% |
|-------------------------|--|------------------------------------|-----------------------------------|
| 林地 Forest land          | $\hat{x}(1)(t+1) = 47651287.70\exp(0.0086t) - 47244035.45$ | -0.0086                            | 98                                |
| 水域 Waters               | $\hat{x}(1)(t+1) = -139889.41\exp(-0.0463t) + 146229.19$   | 0.0463                             | 98                                |
| 耕地 Farm land            | $\hat{x}(1)(t+1) = -1894554.64\exp(-0.0874t) + 2059564.42$ | 0.0874                             | 98                                |
| 建设用地 Construction land  | $\hat{x}(1)(t+1) = 39858.78\exp(0.2683t) - 33096.09$       | -0.2683                            | 95                                |
| 未利用地 Unutilized land    | $\hat{x}(1)(t+1) = 1789.43\exp(0.7112t) - 1442.93$         | -0.7112                            | 85                                |

由模型进一步推算出 2023、2028 年流域生态系统服务价值预测值,模拟效果见表 5,其中水域、耕地面积依旧呈减少趋势,变化率分别为-6.34%、-15.82%。林地面积继续保持微弱上升,建设用地与未利用地面积变化率表现较为异常,分别为 68.72%、509.93%,主要在于这两类土地利用类型在 1998—2018 年间由于城市化进程加快、水土流失加剧等外部因素及绝对面积较小,导致面积变化率较高,使模型出现一定误差,但在 1998—2018 年间未利用地面积激增这一现象也足以引起人们对喀斯特地区生态环境保护的重视。从生态系统服务价值方面上看,2018—2028 年间生态价值出现下降的为水域与耕地,分别减少了  $36.39 \times 10^6$ 、 $64.82 \times 10^6$  元。林地的生态价值增加了  $135.2 \times 10^6$  元,建设用地与未利用地增加幅度虽然高达 29.02%、199.49%,但对于流域总 ESV 的准确度影响不大。

表 5 1998—2028 年漓江流域不同类型土地面积及生态系统服务价值预测表

Table 5 Prediction table of different types of land area and ecosystem service value in Lijiang River from 1998 to 2028

| 土地利用类型<br>Land use type | 面积预测值<br>Predicted of area/ $10^4 \text{hm}^2$ |       | 2018—2028 年变化率<br>Change rate from<br>2018 to 2028/% | 生态价值预测值<br>Predicted of ecological<br>value/ $10^6$ 元 |        | 2018—2028 年变化率<br>Change rate from<br>2018 to 2028/% |
|-------------------------|--|-------|--|---|--------|--|
|                         | 2023   | 2028  |  | 2023  | 2018   |  |
|                         | 林地 Forest land                                 | 42.46 |  | 42.83   | 1.92   |  |
| 水域 Waters               | 0.53   | 0.50  | -6.34  | 563.26  | 537.77 | -1.90  |
| 耕地 Farm land            | 11.18  | 10.24 | -15.82   | 376.38  | 344.88 | -8.13  |
| 建设用地 Construction land  | 3.59   | 4.69  | 68.72  | 6.11  | 8.00   | 29.02  |
| 未利用地 Unutilized land    | 3.19   | 6.50  | 509.93   | 29.92   | 60.93  | 199.49   |

### 3.5 优化前后生态系统服务价值变化

通过 Lingo 软件反复对将前文构建的目标函数与约束条件进行迭代测试,得到最大化提高流域生态效益的土地利用结构帕累托最优方案,见表 6。对研究区进行土地利用结构优化配置后,漓江流域总 ESV 将提高至  $8245.91 \times 10^6$  元,较优化前增长了 2%,其中主要来源于林地与水域面积的增加,提高了生态系统调节服务的供给能力。在土地利用类型方面,变化幅度较大的未利用地通过人工造林及开垦旱地等举措转变为林地与耕地,价值减少了  $6.43 \times 10^6$  元;林地与水域面积分别增加了 1%、17%,其价值增加了  $97.02 \times 10^6$  元、 $100.4 \times 10^6$  元,耕地与建设用地面积均略有增加,但优化幅度较小。

本研究通过对目前漓江流域生态系统服务价值进行测算,以及对未来 10 年流域价值变化趋势的预测,在此基础上进行土地利用结构的优化配置,并将优化前后土地利用结构与 ESV 进行对比分析,得到最优优化方案,最终实现提高流域生态效益,使其生态系统服务价值达到最大化目标。该优化方案有助于提高对漓江流域生态的保护以及效益的提高,促进桂林社会经济的健康发展。

表 6 土地利用优化配置前后生态系统服务价值变化

Table 6 Changes of ecosystem service value before and after optimal allocation of land use

| 土地利用类型<br>Land use type | 变量<br>Variable | 优化前面积<br>Before optimized/<br>10 <sup>4</sup> hm <sup>2</sup> | 优化后面积<br>Optimized area/<br>10 <sup>4</sup> hm <sup>2</sup> | 优化前 ESV<br>Current ecological<br>value /10 <sup>6</sup> 元 | 优化后 ESV<br>Optimized ecological<br>value /10 <sup>6</sup> 元 |
|-------------------------|----------------|---|---|---|---|
| 林地 Forest land          | $X_1$          | 42.02   | 42.6  | 7055.75   | 7152.77   |
| 水域 Waters               | $X_2$          | 0.54  | 0.63  | 574.16  | 674.56  |
| 耕地 Farm land            | $X_3$          | 12.17   | 12.18   | 409.7   | 410.11  |
| 建设用地 Construction land  | $X_4$          | 2.78  | 2.79  | 4.74  | 4.74  |
| 未利用地 Unutilized land    | $X_5$          | 1.07  | 0.38  | 9.99  | 3.56  |
| 总计 Total                |                | 58.58   | 58.58   | 8054.33   | 8245.91   |

#### 4 结论

(1) 近 20 年漓江流域主要土地利用类型一直以林地与耕地为主, 比重约占整个流域的 95%。在变化方面, 水域与耕地面积逐年减少, 林地与建设用地面积持续增加, 未利用地面积发生的变化最为显著, 增加了近 30 倍, 主要由林地与耕地转变而来。

(2) 研究期内, 流域 ESV 总体上呈现先上升后下降趋势, 20 年间约减少了  $19.55 \times 10^6$  元。在流域整体生态系统中, 林地价值最高, 在历年约占流域总价值的 86%, 其次是水域及耕地, 分别占比 8%、6%。根据预测, 至 2028 年时流域 ESV 将减少至  $8067.43 \times 10^6$  元。

(3) 对研究区进行土地利用结构优化配置后, 漓江流域总 ESV 将提高至  $8245.91 \times 10^6$  元, 较优化前增长了 2%, 其中主要来源于林地与水域面积的增加, 提高了生态系统调节服务的供给能力, 耕地、建设用地面积略微增加, 未利用地面积显著减少, 基本与 2008 年水平持平。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Tilman D, Fargione J, Wolff B, D'Antonio B, Dobson A, Howarth R, Schindler D, Schlesinger W H, Simberloff D, Swackhamer D. Forecasting agriculturally driven global environmental change. *Science*, 2001, 292(5515): 281-284.
- [ 2 ] 魏慧, 赵文武, 张骁, 王新志. 基于土地利用变化的区域生态系统服务价值评价——以山东省德州市为例. *生态学报*, 2017, 37(11): 3830-3839.
- [ 3 ] 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.
- [ 4 ] 巩杰, 徐彩仙, 燕玲玲, 郭青海. 1997-2018 年生态系统服务研究热点变化与动向. *应用生态学报*, 2019, 30(10): 3265-3276.
- [ 5 ] Matthews R. The People and Landscape Model (PALM): towards full integration of human decision-making and biophysical simulation models. *Ecological Modelling*, 2006, 194(4): 329-343.
- [ 6 ] Manson S M. Agent-based modeling and genetic programming for modeling land change in the southern Yucatán Peninsular Region of Mexico. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2005, 111(1/4): 47-62.
- [ 7 ] Måren I E, Bhattarai K R, Chaudhary R P. Forest ecosystem services and biodiversity in contrasting Himalayan forest management systems. *Environmental Conservation*, 2014, 41(1): 73-83.
- [ 8 ] 毕晓丽, 葛剑平. 基于 IGBP 土地覆盖类型的中国陆地生态系统服务功能价值评估. *山地学报*, 2004, 22(1): 48-53.
- [ 9 ] 何浩, 潘耀忠, 朱文泉, 刘旭拢, 张晴, 朱秀芳. 中国陆地生态系统服务价值测量. *应用生态学报*, 2005, 16(6): 1122-1127.
- [ 10 ] 陈美球, 赵宝苹, 罗志军, 黄宏胜, 魏晓华, 吕添贵, 许莉. 基于 RS 与 GIS 的赣江上游流域生态系统服务价值变化. *生态学报*, 2013, 33(9): 2761-2767.
- [ 11 ] 石龙宇, 崔胜辉, 尹锴, 刘江. 厦门市土地利用/覆被变化对生态系统服务的影响. *地理学报*, 2010, 65(6): 708-714.
- [ 12 ] Turner K G, Odgaard M V, Bocher P K, Dalgaard T, Svenning T C. Bundling ecosystem services in Denmark: trade-offs and synergies in a cultural landscape. *Landscape & Urban Planning*, 2014, 125: 89-104.
- [ 13 ] 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. *地理科学进展*, 2014, 33(4): 441-446.
- [ 14 ] 彭文甫, 周介铭, 罗怀良, 杨存建, 赵景峰. 城市土地利用变化对生态系统服务价值损益估算——以成都市为例. *水土保持研究*, 2011,

- 18(4): 43-51.
- [15] 宋敏敏, 张青峰, 吴发启, 吴秉校, 吴驳. 黄土沟壑区小流域景观格局演变及生态服务价值响应. 生态学报, 2018, 38(8): 2649-2659.
- [16] 徐雨晴, 周波涛, 於琨, 石英, 徐影. 气候变化背景下中国未来森林生态系统服务价值的时空特征. 生态学报, 2018, 38(6): 1952-1963.
- [17] 王燕, 高吉喜, 王金生, 郑好. 生态系统服务价值评估方法述评. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(S2): 337-339.
- [18] 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.
- [19] 徐杰, 龚萍, 金良. 基于生态绿当量的呼和浩特市土地利用结构优化评价与分析. 生态经济, 2019, 35(1): 196-201.
- [20] 魏中龙, 廖和平. 基于生态绿当量的土地利用结构优化——以重庆市渝北区为例//中国土地资源开发整治与新型城镇化建设研究. 安阳: 中国自然资源学会土地资源研究专业委员会, 中国地理学会农业地理与乡村发展专业委员会, 2015.
- [21] 唐丽静, 王冬艳, 杨园园. 基于“多规合一”和生态足迹法的土地利用结构优化. 农业工程学报, 2019, 35(1): 243-251.
- [22] 史云扬, 郝晋珉, 陈红. 基于解释结构模型和模糊分析的黄淮海平原区土地利用结构优化——以河北省曲周县为例. 中国农业大学学报, 2019, 24(2): 1-11.
- [23] 郑江坤, 余新晓, 夏兵, 贾国栋, 庞卓, 宋思铭. 基于生态服务价值的潮白河上游土地利用优化. 农业工程学报, 2010, 26(12): 337-344.
- [24] Arowolo A O, Deng X Z, Olatunji O A, Obayelu A E. Assessing changes in the value of ecosystem services in response to land-use/land-cover dynamics in Nigeria. *Science of the Total Environment*, 2018, 636: 597-609.
- [25] 姜忆湄, 李加林, 龚虹波, 叶梦姚, 冯佰香, 何改丽, 黄日鹏. 围填海影响下海岸带生态服务价值损益评估——以宁波杭州湾新区为例. 经济地理, 2017, 37(11): 181-190.
- [26] 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.
- [27] 赵江, 沈刚, 严力蛟, 黄璐, 金爱民, 霍思高. 海岛生态系统服务价值评估及其时空变化——以浙江舟山金塘岛为例. 生态学报, 2016, 36(23): 7768-7777.
- [28] 严恩萍, 林辉, 王广兴, 夏朝宗. 1990—2011年三峡库区生态系统服务价值演变及驱动力. 生态学报, 2014, 34(20): 5962-5973.
- [29] 李涛, 甘德欣, 杨知建, 王宽, 齐增湘, 李晖, 陈希. 土地利用变化影响下洞庭湖地区生态系统服务价值的时空演变. 应用生态学报, 2016, 27(12): 3787-3796.
- [30] 赵志刚, 余德, 韩成云, 王凯荣. 鄱阳湖生态经济区生态系统服务价值预测与驱动力. 生态学报, 2017, 37(24): 8411-8421.
- [31] 王权, 李阳兵, 黄娟, 胡先培, 钟盛楠. 喀斯特槽谷区土地利用转型过程对生态系统服务价值的影响. 水土保持研究, 2019, 26(3): 192-198.
- [32] 王静, 王冬梅, 任远, 王斌. 漓江河岸带不同水文环境土壤微生物与土壤养分的耦合关系. 生态学报, 2019, 39(8): 2687-2695.
- [33] 梁士楚, 苑晓霞, 卢晓明, 许桂芬, 覃艳, 姜勇. 漓江水陆交错带土壤理化性质及其分布特征. 生态学报, 2019, 39(8): 2752-2761.
- [34] 章程, 肖琼, 苗迎, 郭永丽, 汤庆佳, 郝玉培. 广西桂林漓江典型河段水化学昼夜动态变化及其对岩溶碳循环的影响. 地球学报, 2018, 39(5): 613-621.
- [35] 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.
- [36] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 肖玉, 陈操. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法. 自然资源学报, 2008, 23(5): 911-919.
- [37] 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.