

# 老挝凯山丰威汉市土地资源的空间优化配置

彭玉玲<sup>1</sup>, 徐学娴<sup>1</sup>, 隗剑秋<sup>1</sup>, 刘斐旻<sup>1</sup>, 秦文杰<sup>2</sup>, 夏钰<sup>3</sup>

(1.武汉工程大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430073; 2.中国电建集团  
昆明勘测设计研究院有限公司, 云南 昆明 650000; 3.湖北省国土测绘院, 湖北 武汉 430000)

**摘要:** [目的] 通过土地资源的空间优化配置, 提高土地利用效率, 促进各类产业和基础设施的合理布局, 为区域社会经济综合发展提供理论依据。[方法] 将 GIS 空间分析技术、Logistic 回归分析方法与 CLUE-S 模型相结合, 以老挝凯山丰威汉市为研究区域, 开展土地资源空间优化配置研究。在空间适宜性和数量结构的约束下, 以用地需求、限制因素、转换规则和空间特征为基础进行模型运算, 对凯山丰威汉市土地资源进行空间优化配置。[结果] 城市建设用地和水田在原有基础上向适宜区域扩张, 分布较为稀疏的林业用地因得到开发利用而相应减少, 其他用地类型在数量上和空间上的变化均不明显。[结论] 城镇化和农业发展能够为凯山丰威汉市的经济发展提供基础和支撑, 同时需要兼顾生态保护, 促进土地资源的统筹协调可持续利用。

**关键词:** 土地利用; 空间优化配置; CLUE-S 模型; 老挝凯山丰威汉市

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2021)05-0160-06

**中图分类号:** F301.24

**文献参数:** 彭玉玲, 徐学娴, 隗剑秋, 等. 老挝凯山丰威汉市土地资源的空间优化配置[J]. 水土保持通报, 2021, 41(5): 160-165. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.05.022; Peng Yuling, Xu Xuexian, Yu Jianqiu, et al. Spatially optimum allocation of land resource in Kaysone Phomvihane City, Laos [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(5): 160-165.

## Spatially Optimum Allocation of Land Resource in Kaysone Phomvihane City, Laos

Peng Yuling<sup>1</sup>, Xu Xuexian<sup>1</sup>, Yu Jianqiu<sup>1</sup>, Liu Feiyang<sup>1</sup>, Qin Wenjie<sup>2</sup>, Xia Yu<sup>3</sup>

(1.School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Institute of Technology, Wuhan, Hubei 430073, China; 2.Kunming Engineering Corporation Limited, Power Construction Corporation of China, Kunming, Yunnan 650000, China; 3.Institute of Land Surveying and Mapping of Hubei Province, Wuhan, Hubei 430000, China)

**Abstract:** [Objective] By optimizing the spatial allocation of land resources, the efficiency of land use can be improved, and the rational distribution of various industries and infrastructure can be promoted in order to provide a theoretical basis for the comprehensive development of the regional social economy. [Methods] The study was conducted at Kaysone Phomvihane City in Laos. GIS spatial analysis technology, logistic regression analysis, and the CLUE-S model were combined to carry out the research on the spatial optimization of land resources. Under the constraints of spatial suitability and quantity structure, model calculations were performed on the basis of land demand, limiting factors, conversion rules, and spatial characteristics to optimize the spatial allocation of land resources in Kaysone Phomvihane City. [Results] The urban construction land and paddy fields expanded to suitable areas on the original basis. The relatively sparse forestry land was developed and utilized, resulting in a moderate reduction in area. Other land types had small changes in quantity and space. [Conclusion] Urbanization and agricultural development can provide the foundation and support for the economic development of Kaysone Phomvihane City. At the same time, ecological protection should be taken into account to promote coordinated and sustainable use of land resources.

**Keywords:** land use; spatial optimal allocation; CLUE-S model; Kaysone Phomvihane City, Laos

收稿日期: 2021-05-05

修回日期: 2021-06-26

资助项目: 中华人民共和国住房和城乡建设部科学技术计划项目“基于 GIS 的城乡土地多尺度统筹规划方法研究”(2019-R-020); 湖北省高校省级教学改革研究项目; 武汉工程大学第十二届研究生教育创新基金项目(CX2020098)。

第一作者: 彭玉玲(1986—), 女(汉族), 河南省洛阳市人, 讲师, 博士, 硕士生导师, 主要从事土地规划与 GIS 应用研究。Email: yulingpengwit@163.com。

通信作者: 隗剑秋(1973—), 女(汉族), 湖北省枣阳市人, 副教授, 硕士, 硕士生导师, 主要从事城乡规划与设计研究。Email: 504126283@qq.com。

土地利用空间优化配置有利于合理高效利用有限的土地资源,从而促进区域经济的可持续发展。如何实现土地资源在空间上的优化配置,仍然是当前国土空间规划领域研究的热点问题。目前国内外学者围绕这一领域开展了大量研究<sup>[1-3]</sup>,主要包括基于多源数据融合的土地利用变化研究<sup>[4-5]</sup>、基于 GIS(geographic information system)的空间分析<sup>[6]</sup>、基于适宜性评价的优化配置<sup>[7]</sup>以及土地利用模拟<sup>[8-9]</sup>、优化算法研究等<sup>[10]</sup>,研究内容不断深化<sup>[11-13]</sup>,研究方法也日趋完善<sup>[14-16]</sup>。

凯山丰威汉市作为老挝的经济中心、仅次于首都万象的第二大城市,在老挝区域发展和未来规划中具有重要的战略地位。近年来,凯山丰威汉市城镇化发展迅速,粮食生产基地建设和经济特区发展急需合理的用地规划为其提供保障。然而,目前其土地规划滞后,规划体系不完善,同时,国内外围绕凯山丰威汉市开展的土地配置方面的研究和实践探索较少<sup>[6,17-18]</sup>,虽然这些研究在一定程度上为凯山丰威汉市及老挝的土地利用提供了方法和数据支持,但成果仍比较匮乏,不足以为其规划实践提供充分支撑。作为经济发展的前提和基础,合理配置土地资源仍是凯山丰威汉市国土和经济领域亟待解决的关键科学问题。

本研究在借鉴国内外相关经验的基础上,将 GIS 空间分析方法与 CLUE-S 模型相结合,开展土地资源空间优化配置研究。同时,考虑老挝的实际情况,对不同类型土地利用规模的控制指标以自然条件适宜性为基础,并以当地用地政策的限制和用地发展目标为约束,以期促进土地资源的开发和合理利用,从而为当地经济发展提供可靠保障。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

凯山丰威汉市位于老挝南部边境,湄公河左岸,

是老挝第二大城市,沙湾拿吉省省会,也是老挝的经济中心。凯山丰威汉市又名“沙湾拿吉市”,意为“天堂里的城市”,2005 年为纪念老挝第二任国家主席凯山·丰威汉而更名为凯山丰威汉市,下辖人口  $1.20 \times 10^5$  人,土地面积  $650.51 \text{ km}^2$ 。

### 1.2 数据来源

研究基础数据共包含土地利用数据、社会经济数据、问卷调查数据 3 种类型。其中,土地利用数据来源于老挝政府部门提供的土地利用现状数据(2006 年)、相关规划数据(2006—2015 年),中科院地理空间数据云提供的研究区遥感影像数据(2015—2020 年),以及研究区现场踏勘与测试数据(2015 年)等;社会经济数据来源于研究区统计年鉴(2005—2013 年);问卷调查数据来源于土地规划及社会经济领域的专家咨询打分(2019—2020 年)。

## 2 研究方法

### 2.1 模型构建

基于 GIS 空间分析技术和 CLUE-S 模型,将土地利用现状、适宜性、最优数量结构、驱动因素、限制因素等数据按照模型的格式要求,转换为相应的模型输入参数,进行模型运算,得到凯山丰威汉市土地资源空间优化配置方案。该模型由转换规则、限制因素、用地需求、空间特征 4 个输入模块,以及一个空间布局分配模块构成<sup>[16]</sup>。

(1) 转移规则。通过转移矩阵来定义和实现不同地类之间的转变规则,转移矩阵见表 1。其中值为 1 代表可以转移,值为 0 代表不可转移。具体赋值根据 2015 年研究区政策调研、实地踏勘和 2020 年专家咨询的方法,多轮征集相关专家、当地政府和居民意见后汇总统计获得(表 1)。

表 1 老挝凯山丰威汉市各二级地类之间的转换矩阵

项目	水田	园地	草地	农作物种植	其他农用地	林业用地	城市建设用地	乡村建设用地	水源地	其他用地
水田	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
园地	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0
草地	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
农作物种植	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0
其他农用地	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0
林业用地	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0
城市建设用地	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
乡村建设用地	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0
水源地	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
其他用地	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

(2) 限制因素。限制因素包括自然保护区等控制性的约束条件,在 CLUE-S 模型中,通过限制因素的设定,以影响用地格局的分配。限制类型分为区域

限制和地类限制两种情况。如:保护区范围内的用地不允许转移为其他类型的用地,属于特定区域限制;各地类之间是否允许转移属于地类限制。

(3) 用地需求。用地需求通过模糊预测计算获得,并用来限定模拟过程中各用地类型的变化量。用地需求为正值表示用地数量增加,为负值则表示用地数量减少,所有用地类型的总变化量为零,即各用地类型总面积恒定。凯山丰威汉市在老挝区域发展和未来规划中具有重要的战略地位,其对建设用地和农业用地的需求不仅要考虑研究区内的人口增长、经济发展和粮食供给等因素,同时要考虑对整个地区发展的作用和贡献。因此,在用地需求预测时,需考虑区域因素进行预测。

(4) 空间特征。以所有用地类型分配在其最可能出现的位置上为原则,通过 Logistic 回归运算来分析各用地类型变化与导致变化发生的驱动因素之间的定量关系,获得各用地类型在空间上的分布概率<sup>[19]</sup>。具体计算表达式如下:

$$\ln\left(\frac{P_i}{1-P_i}\right) = B_0 + B_1 X_{1i} + B_2 X_{2i} + \dots + B_n X_{ni} \quad (1)$$

式中: $P_i$  表示某栅格单元可能成为某用地类型  $i$  的概率; $B_0$  为回归方程常量; $B$  为各驱动因子的回归系数; $X$  为驱动因素。

(5) 空间分配。空间分配是在对土地利用转换规则、限制因素、空间特征等要素进行分析的基础上,按照用地分配的总概率从大到小的顺序,通过多次迭代运算,依次对用地需求在空间上进行分配。

## 2.2 空间特征分析

(1) 栅格数据二值化处理。为提高数据处理的效率,本研究采用抽样的方法进行回归分析<sup>[3]</sup>。首先对各用地类型的栅格数据进行二值化处理,将属性为某种用地类型的栅格单元赋值为 1,属性非此用地类型的栅格单元赋值为 0,生成值为 0,1 的栅格数据(图 1)。

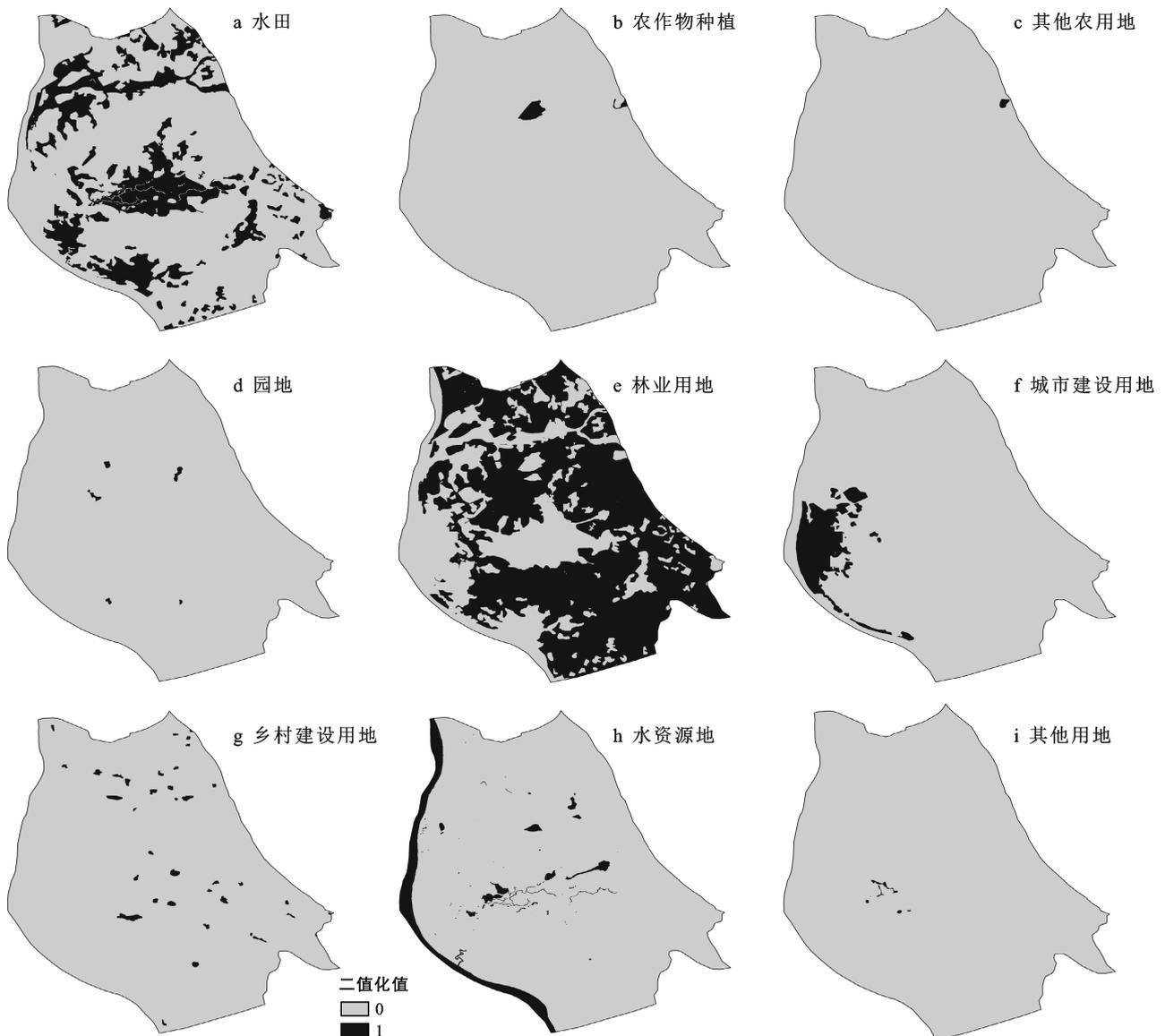


图 1 老挝凯山丰威汉市各类用地二值化栅格图

(2) 随机采样与重分类。将各用地类型进行二值化处理,使用 ArcGIS 的 Create Random Raster 功能,生成覆盖区域的随机栅格,用于对各用地类型与各驱动因子的随机采样。采样过程中,元胞值为 0 的案例与值为 1 的案例百分比校正越接近 50%,则采样结果越理想。因此,需要按照一定比例对随机栅格进行重分类,使每种用地类型采样比例保持 1,0 的样本数量基本相当。如:凯山丰武汉市水田栅格数为 169 022,非水田栅格数为 553 735,二者比例约为 1 比 3,则将覆盖凯山丰武汉市范围的随机栅格按照 30% 的比例进行重分类,运用栅格计算器将重分类后的随机栅格与非水田栅格图层进行相乘运算,得到以 30% 的比例进行随机抽样的非水田样本数为 166 615,与水田样本数量接近。根据采样结果,各用地类型随机采样的百分比校正结果均保持在 50.0%~62.0% 之间,采样数据较可靠。

对各用地类型元胞值为 0,1 的随机栅格进行重分类后,根据重分类结果,使用 ArcGIS 的 Sample 工具依次对各驱动因子进行采样,获得的抽样数据即为回归分析的自变量(各用地类型)和因变量(驱动因

子)。其中,驱动因子从 12 个适宜性评价指标中选取。由于 12 个指标中,土地利用类型因子和保护区因子在模型中的其他模块重复约束,故从中去除这两个指标,共设定 10 个驱动因子,分别为:高程( $X_1$ )、坡度( $X_2$ )、坡向( $X_3$ )、土壤类型( $X_4$ )、土壤有机质含量( $X_5$ )、土壤 pH 值( $X_6$ )、距水源距离( $X_7$ )、距道路距离( $X_8$ )、距居民点距离( $X_9$ )、植被覆盖率( $X_{10}$ )。将用地类型与驱动因子进行回归分析,则可得到模型中各用地类型的回归系数。

(3) 二元 Logistic 回归分析。通过对各自变量与因变量进行二元 Logistic 回归分析,获得用地类型变化与驱动因子之间的相关性、回归系数、回归方程常量以及地类转换概率等参数。凯山丰武汉市各类用地回归方程系数及常量见表 2。

(4) 回归方程拟合度检验。回归方程的拟合程度一般采用 ROC 曲线来对其进行检验。ROC 值为曲线下的面积,该值一般为 0.5~1 之间,值越大,则拟合度越好,模型运行时的土地利用分配越精确。经过检验,各用地类型 ROC 值均大于 0.85,回归方程拟合度较好,空间模拟结果较准确。

表 2 老挝凯山丰武汉市各用地类型回归方程系数及常量

评价指标	回归系数及常量								
	水田	园地	农作物种植	其他农用地	林业用地	城市建设用地	乡村建设用地	水源地	其他用地
高程 $X_1$	-0.094 6	-0.072 9	0.103 0	0.041 1	0.070 6	0.093 8	-0.039 3	-0.012 8	-0.521 2
坡度 $X_2$	-0.047 3	-0.030 8	0.040 1	0.248 5	0.032 4	0.022 0	0.082 0	-0.083 5	0.153 0
坡向 $X_3$	-0.001 2	-0.001 3	-0.001 5	-0.002 7	0.001 0	0.000 4	-0.002 2	-0.007 8	-0.002 9
土壤类型 $X_4$	0.314 8	1.199 9	-2.487 4	-25.125 0	0.864 9	1.364 8	-3.626 4	-13.259 1	3.739 9
土壤有机质含量 $X_5$	-0.236 6	-6.493 3	-3.270 5	4.110 4	1.174 8	1.201 9	-5.043 5	-15.827 2	16.740 7
土壤 pH 值 $X_6$	1.990 7	2.543 3	-1.628 0	-11.904 1	-0.121 5	-0.047 4	-0.061 1	-15.383 1	0.595 7
距水源距离 $X_7$	0.000 1	0.000 2	-0.000 2	0.013 0	-0.000 1	-0.001 3	0.000 5	-0.001 8	0.000 4
距道路距离 $X_8$	0.000 3	-0.006 5	0.000 3	-0.014 4	0.000 1	-0.001 4	-0.000 4	0.001 4	0.004 3
距居民点距离 $X_9$	0.000 3	0.001 1	-0.003 3	-0.022 3	0.000 5	-0.157 1	-0.139 2	-0.004 7	-0.001 0
植被覆盖率 $X_{10}$	-2.988 8	-0.634 8	25.628 7	114.054 2	5.155 8	-1.018 5	6.054 1	1.509 0	-24.256 3
常量	4.931 3	1.192 8	-16.932 4	-205.408 3	-16.948 3	-8.665 2	14.492 6	100.825 6	24.888 9

## 3 结果与分析

### 3.1 土地资源优化配置前后的土地利用变化

通过用地需求预测、限制因素分析、转换规则研究和空间适宜性特征分析,基于 CLUE-S 模型进行求解,得到研究区土地利用空间优化配置结果。研究表明,凯山丰武汉市主要用地类型为农业用地、林业用地、建设用地和水源地,各类用地以现状分布区域为中心向外发展,集中连片布局。土地资源空间优化配置的结果见附图 4a(封 3)。

用地类型变化主要为林业用地和其他用地向水

田和建设用地的转化(表 3),土地利用方式为对水土资源条件较好的稀疏荒芜林地、具备耕地和建设用地的其他用地进行开发利用,在生态用地满足区域生态保护要求的前提下,提高土地利用效率,保障粮食产量,促进城镇化发展。

### 3.2 土地资源空间配置方案三维可视化

利用研究区的数字高程模型数据,通过 ArcGIS 平台,将其与土地资源空间优化配置数据叠加,生成土地利用三维效果图。通过对三维景观格局的构建和分析,可以为微观层面的规划设计以及工程布局等提供便捷、直观、多视角、全方位的决策依据。

表 3 老挝凯山丰威汉市土地资源优化配置前后的土地利用变化

地类名称	2020 年现状		2035 年规划		规划与现状差异	
	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%
水田	152.06	23.38	299.78	46.08	147.72	22.71
园地	1.70	0.26	1.57	0.24	-0.13	-0.02
农作物种植	3.53	0.54	3.53	0.54	0.00	0.00
其他农用地	0.61	0.09	0.61	0.09	0.00	0.00
林业用地	407.48	62.64	221.40	34.03	-186.08	-28.61
城市建设用地	33.25	5.11	69.12	10.63	35.87	5.51
乡村建设用地	13.12	2.02	16.60	2.55	3.48	0.53
水资源地	37.90	5.83	37.90	5.83	0.00	0.00
其他用地	0.86	0.13	0.00	0.00	-0.86	-0.13
合计	650.51	100.00	650.51	100.00	0.00	0.00

优化配置方案的三维可视化流程如下：①将各县用地转化为由 100×100 的大小相等的规则格网组成的矢量数据；②提取该规则格网数据中心点，并与各县土地资源空间优化配置的结果进行相交分析，生成由带有土地利用属性数据的规则点状标识组成的点图层；③将该图层与各县数字高程模型叠加，并设置三维可视化参数，形成凯山丰威汉市土地资源空间优化布局三维效果图(附图 4b, 见封 3)。

### 3.3 空间优化结果与分析

研究表明,建设用水田规模的增加以及林业用地规模的减少较为明显,其他用地变化幅度较小。凯山丰威汉市拥有沙湾拿吉平原以及湄公河沿岸的水土资源和地形等自然地理方面的天然优势,具有发展农业生产的巨大潜力。同时,作为沙湾拿吉省的省会城市、老挝第二大城市、老挝的经济中心,凯山丰威汉市拥有城镇化发展和经济建设的政策优势,粮食生产基地建设和经济特区发展需要对其土地资源进行合理布局,为国家和地区发展提供基础和保障。

空间布局上,研究区林业用地减少的区域为稀疏的林木,建设用水田和农业用地在原有用地的基础上,沿交通和水系,向未开发且分布稀疏的林业用地扩张,扩张空间次序受适宜性控制,扩张规模受结构优化结果控制,建设用地扩张区域可发展为新区和经济特区,农业用地扩张区域可发展为粮食生产基地。

数量结构上,规划后的水田面积所占比重最大,占研究区总面积的 46.08%;其次为林业用地,占研究区总面积的 34.03%;第三为建设用地,占研究区总面积的 13.18%。规划后的用地结构相对较合理,符合老挝以农业为主的产业发展特色,有利于发挥水稻种植等产业优势;同时,生态用地比例较高,通过规划提升现有林业用地的质量和生态服务价值,能够营造该区域良好的生活环境;此外,适当扩充建设用地规模,为经济特区建设和城镇化发展提供空间,有利于促进地区社会经济的发展和居民生活水平的提高。

另外,通过土地利用空间优化配置结果的三维可视化表达,能够更直观地指导微观的用地决策和设施布局,从而为各类规划衔接,以及进一步为凯山丰威汉市的城市建设和城市服务职能的发挥提供数据支撑。

## 4 结论与建议

### 4.1 结论

本研究将适宜性分析、数量优化和空间优化三者结合,基于 GIS 空间分析技术、Logistic 回归分析方法以及 CLUE-S 模型,实现了研究区土地资源的优化配置,为精准地控制用地布局、防止土地资源浪费和生态环境破坏提供决策支持。

通过土地资源优化配置,研究区建设用地和农业用地以现状为基础向自然和区位条件较好的区域扩张,规模增加明显。质量较差的林业用地规模减少,得到更合理的利用,从而使各类用地质量得到提升,土地利用效率显著提高,同时有利于土地资源的有效管理。

优化配置方案的三维可视化表达,有利于辅助进行建设用地的建筑选址、产业布局、交通规划、工程管线设施布局,以及农业用地的灌溉排水设施布局等,为土地利用规划向三维空间发展提供借鉴。

### 4.2 建议

(1) 在对凯山丰威汉市林业用地、农业用地、建设用地进行空间优化布局的同时,需要兼顾生态环境的保护。①将低矮稀疏的林业用地重新规划为行道树、防护林;②从区域统筹的角度出发,在区域内发展经济特区、粮食生产基地和生态保护的同时,在区域外其他适宜的地区实行退耕还林、植树造林,地区间协同规划;③划定严格的保护红线,实施专项保护。通过以上措施,将现状无序的林地转换整合为以高大乔木为主的生态林,提高土地利用效益,同时实现区域协调发展的目的,促进土地资源的有序管理和分区保护。

(2) 借鉴其他国家和地区的先进经验,建立健全

规划管理保障机制。随着中国与“一带一路”沿线国家的持续深入合作,中国经济特区和粮食生产基地的发展经验可以为老挝提供借鉴,同时结合凯山丰武汉市的发展现状、特色、需求和未来发展目标,在土地资源优化配置研究的基础上,合理布局经济特区、粮食生产基地和生态保护区,并建立健全规划管理保障机制,促进地区经济建设、农业生产和生态保护协调发展,真正发挥研究区作为老挝经济中心的优势。

(3) 利用区位优势发展经济特区,利用地形和水土资源优势发展水稻、咖啡、茶叶等绿色农业和特色产业,布局灌溉排水设施和交通设施。通过农业、旅游业等产业的反哺作用,促进农业现代化和机械化建设,改变部分地区原始的农业生产模式,提高农业生产效率、解放生产力,形成土地、产业、生产力之间相互促进的良性发展模式,促进区域经济发展。

#### [参 考 文 献]

- [1] 王甜,闫金凤,乔海燕.马来西亚吉隆坡市土地利用变化特征分析与预测[J].水土保持通报,2020,40(5):268-275,341.
- [2] 韩会然,杨成凤,宋金平.北京市土地利用空间格局演化模拟及预测[J].地理科学进展,2015,34(8):976-986.
- [3] 许小亮,李鑫,肖长江,等.基于 CLUE-S 模型的不同情景下区域土地利用布局优化[J].生态学报,2016,36(17):5401-5410.
- [4] 包塔娜,布仁,齐晓明,等.基于多模型测度的内蒙古中部地区土地利用空间布局优化研究[J].干旱区资源与环境,2020,34(11):110-117.
- [5] Jiang Weiguo, Chen Zheng, Lei Xuan, et al. Simulating urban land use change by incorporating an autologistic regression model into a CLUE-S model [J]. Journal of Geographical Sciences, 2015,25(7):836-850.
- [6] 彭玉玲,林爱文,王珂,等.老挝中部地区林业用地空间适宜性多尺度评价[J].地域研究与开发,2019,38(2):139-146.
- [7] 李鑫,肖长江,欧名豪,等.基于生态位适宜度理念的城镇用地空间优化配置研究[J].长江流域资源与环境,2017,26(3):376-383.
- [8] 刘学.面向热岛强度削减的城乡建设用地动态模拟与空间治理路径研究[D].浙江 杭州:浙江大学,2020.
- [9] 陆文涛,代超,郭怀成.基于 Dyna-CLUE 模型的滇池流域土地利用情景设计与模拟[J].地理研究,2015,34(9):1619-1629.
- [10] 杨露,颜耀文,宗乐丽,等.基于多目标遗传算法和 FLUS 模型的西北农牧交错带土地利用优化配置[J].地球信息科学学报,2020,22(3):568-579.
- [11] 张骏杰.基于“多规合一”的地级市国土空间优化方法研究[D].北京:中国地质大学(北京),2018.
- [12] 樊天相,杨庆媛,何建,等.重庆丘陵地区农村居民点空间布局优化:以长寿区海棠镇为例[J].地理研究,2015,34(5):883-894.
- [13] 单薇,金晓斌,冉娜,等.江苏省土地利用“生产—生活—生态”功能变化与耦合特征分析[J].长江流域资源与环境,2019,28(7):1541-1551.
- [14] 焦利民,刘耀林.可持续城市化与国土空间优化[J].武汉大学学报(信息科学版),2021,46(1):1-11.
- [15] 危小建,谢亚娟,孙昱星.基于空间贝叶斯识别城市扩张与生态保护潜在的兼容区和冲突区:以鄱阳湖生态经济区为例[J].长江流域资源与环境,2020,29(2):310-321.
- [16] 王海军,曾浩然,张文婷,等.基于改进的 GPU 并行 NSGA-III 的土地利用优化配置[J].农业工程学报,2020,36(21):283-291.
- [17] 毛鹏.老挝沙湾拿吉地区土地利用变化及其综合生态效应[D].湖北 武汉:武汉大学,2017.
- [18] 袁沫汐,彭玉玲,林爱文,等.老挝沙湾水经济区生态用地利用评价[J].水土保持通报,2017,37(1):234-240.
- [19] 杜瑶.八仙山森林生态系统固碳释氧服务价值的遥感估算[J].内蒙古煤炭经济,2017(8):71-72,86.
- [20] 王耀,张昌顺,刘春兰,等.三北防护林体系建设工程区森林水源涵养格局变化研究[J].生态学报,2019,39(16):5847-5856.
- [21] 刘翊涵,苏正安,潘洪义,等.张家口市土地利用和土壤保持功能的变化特征[J].草业科学,2020,37(7):1281-1292.
- [22] 杨殊桐,时鹏,李占斌,等.大理河流域退耕还林工程对生态系统服务功能的影响[J].水土保持研究,2018,25(6):251-258.
- [23] 祝萍,刘鑫,郑瑜晗,等.北方重点生态功能区生态系统服务权衡与协同[J].生态学报,2020,40(23):8694-8706.
- [24] 王秀明,刘谓承,龙颖贤,等.基于改进的 InVEST 模型的韶关市生态系统服务功能时空变化特征及影响因素[J].水土保持研究,2020,27(5):381-388.
- [25] 曹叶琳,宋进喜,李明月,等.陕西省生态系统水源涵养功能评估分析[J].水土保持学报,2020,34(4):217-223.
- [26] 康惠惠,潘韬,盖艾鸿,等.生态退化与恢复对三江源区土壤保持功能的影响[J].水土保持通报,2017,37(3):7-14.

(上接第 159 页)