

DOI: 10.5846/stxb202010142618

王军, 严有龙, 王金满, 应凌霄, 唐倩. 闽江流域生境质量时空演变特征与预测研究. 生态学报, 2021, 41(14): 5837-5848.

Wang J, Yan Y L, Wang J M, Ying L X, Tang Q. Temporal-spatial variation characteristics and prediction of habitat quality in Min River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(14): 5837-5848.

## 闽江流域生境质量时空演变特征与预测研究

王 军<sup>1,\*</sup>, 严有龙<sup>1,2</sup>, 王金满<sup>1,2</sup>, 应凌霄<sup>1</sup>, 唐 倩<sup>2</sup>

1 自然资源部国土整治中心, 自然资源部土地整治重点实验室, 北京 100035

2 中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 北京 100083

**摘要:**流域生境是生物生存和可持续发展的物质基础与环境保障, 土地利用变化是影响生境质量的重要因素, 分析土地利用与区域生境质量时空演变特征, 对区域生物多样性保护与土地可持续利用具有重要意义。以闽江流域为研究区, 基于 2000—2015 年的土地利用空间数据, 构建 CA-Markov 模型模拟 2025—2040 年现有发展与生态保护情景下土地利用空间数据, 利用 InVEST 模型分析 2000—2040 年生境质量空间格局。结果表明: (1) 闽江流域森林覆盖率较高, 现状条件下水田、旱地、针阔混交林、灌木林、草地与湿地面积呈下降趋势, 其中草地减幅最大, 达 44.64%, 针叶林、阔叶林、水域、建设用地、交通用地、采矿场与裸地面积呈上升趋势, 其中交通用地涨幅最大, 达到 227.27%; 模拟的土地利用 Kappa 系数达 89.09%, 模拟结果较好, 生态保护情景在未来土地利用格局优化上优势明显。(2) 研究期内闽江流域总体呈现较高的生境质量, 基本维持在 0.82 的水平, 城乡建设用地区域是生境质量低值的主要分布区, 福州与长乐分布有最大的生境质量低值聚集区; 生境质量分布与地形条件存在一定相关性, 低值区多为海拔较低的区域。(3) 2000—2015 年闽江流域生境质量总体呈现衰退趋势, 且降幅逐期升高, 最高达 0.24%; 现有发展情景下降的趋势未得到有效缓解, 生态保护情景下降趋势逐步有效缓解, 同时生境质量为优等的栅格数量占比最大, 最高达 87.42%。(4) 闽江流域上中游区域生境水平较下游高, 现有发展情景下这种差距出现扩张趋势, 生态保护情景下各区域则基本维持住 2015 年的生境质量水平。研究结果可为闽江流域土地资源可持续利用与生物多样性保护提供科学依据和决策参考, 促进区域可持续发展。

**关键词:**生态系统服务; 生境质量; CA-Markov 模型; InVEST 模型

## Temporal-spatial variation characteristics and prediction of habitat quality in Min River Basin

WANG Jun<sup>1,\*</sup>, YAN Youlong<sup>1,2</sup>, WANG Jinman<sup>1,2</sup>, YING Lingxiao<sup>1</sup>, TANG Qian<sup>2</sup>

1 Land Consolidation and Rehabilitation Center, Key Laboratory of Land Consolidation and Rehabilitation, Ministry of Natural Resources, Beijing 100035, China

2 School of Land Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

**Abstract:** Watershed habitat quality is the material basis and environmental guarantee for biological survival and sustainable development, and land use change is the most important threat factor for habitat quality. Therefore, analyzing the temporal-spatial evolution characteristics of land use and regional habitat quality is of great significance to regional biodiversity conservation and sustainable land use. In this study, took Min River Basin as the research area, based on the spatial data of land use from 2000 to 2015, a CA-Markov model was constructed to simulate the spatial data of land use under the existing development and ecological protection scenarios from 2025 to 2040, and the InVEST model was used to analyze the spatial pattern of habitat quality from 2000 to 2040. The results show that: (1) The forest coverage rate of Min River Basin is

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771207)

收稿日期: 2020-10-14; 网络出版日期: 2021-05-13

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangjun@lrc.org.cn

relatively high under the current conditions, the area of paddy field, dry farm, theropencedrymion, shrubwood, grassland and wetland showed a downward trend, of which grassland presented the largest decrease with the rate, of 44.64%. The coniferous forest, broad-leaved forest, water area, construction land, traffic land, mining land, and bare land were on the rise. Among them, transportation land presented the largest increase, 227.27%. The simulated land use Kappa coefficient was 89.09%, showed that the simulation result was good, and the designed ecological protection scenario was outstanding at the future land use pattern optimization. (2) During the study period, the Min River Basin generally showed high habitat quality and it basically maintained at the level of 0.82. The construction land area was the main distribution area with low habitat quality in the study area, and the downstream Fuzhou and Changle had the gathering area of largest low-value habitat quality. The distribution of habitat quality had a certain correlation with topographical conditions, and the low-value areas were mostly areas with lower altitudes. (3) From 2000 to 2015, the habitat quality of Min River Basin generally showed a declining trend, and the rate of decline increased gradually, up to 0.24%. The declining trend of habitat quality under natural development scenarios was not effectively alleviated. It was obtained under ecological protection scenarios, and the proportion of grids with the highest quality habitats was the largest with the highest proportion of 87.42%. (4) Habitat levels in the upper and middle reaches of Min River Basin were higher than those in the lower reaches. Under natural development scenarios, the gap of regional habitat quality would show an expanding trend. In the ecological protection scenario, each region would basically maintain the habitat quality level in 2015. The research results of this article can provide scientific basis and decision-making reference for sustainable utilization of land resources and biodiversity protection in Min River Basin, and promote regional sustainable development.

**Key Words:** ecosystem services; habitat quality; CA-Markov model; InVEST model

流域作为自然地理和经济发展的复合型区域,兼有重要的资源、生态、经济和文化功能<sup>[1]</sup>。流域生态系统服务囊括了人类从流域系统获得的供给、调节、文化与支持服务等所有惠益<sup>[2]</sup>。流域生境是生物用于生长、发育、繁殖与分布的资源与条件,是区域生物多样性最重要的体现<sup>[3-4]</sup>,生境质量是基于生存资源可获得性,生态系统提供适合于生物生长、发育、繁殖与分布条件的能力<sup>[5-7]</sup>。进入工业社会以来,人类活动导致了生境破碎、退化甚至消失<sup>[7-8]</sup>,而土地利用变化程度体现了人类活动的强度,成为生境质量最重要的威胁因子<sup>[9]</sup>。因此,基于土地利用变化研究区域生境质量格局,对区域可持续发展具有重要意义。

由于人们对土地利用变化的持续关注,土地利用模拟模型研究随之兴起。元胞自动机(Cellular Automata, CA)作为诸多模型中最主要且应用较广泛的方法之一,是诸多模型研究的基础<sup>[10]</sup>,譬如 Logistic-CA 模型<sup>[11]</sup>、ANN-CA(Artificial Neural Network-Cellular Automata)模型<sup>[12]</sup>、CLUE-S(the Conversion of Land Use and its Effects at Small regional extent)模型<sup>[13]</sup>与 FLUS(Future Land Use Simulation)模型<sup>[14]</sup>。而 CA-Markov 模型是其衍生的较为成功的模拟方法,综合了 CA 模型模拟复杂系统空间变化的能力和 Markov 模型的长期预测优势,能有效预测土地利用类型相互转化概率并模拟其空间转化模式<sup>[15-17]</sup>。土地利用模拟也逐渐从单一用地扩展为多地类模拟<sup>[16-17]</sup>。例如 Han 等采用 CA-Markov 模型较好的模拟了佛山地区不同发展情景下土地利用空间格局<sup>[16]</sup>。目前国内外有关流域生境质量研究主要集中在两方面:对单点、样地尺度生境质量评价<sup>[18-19]</sup>和区域整体生境质量评价<sup>[20-21]</sup>。研究方法较多采用水文水力法、河流地貌法、生境预测模拟法和综合评估法<sup>[18-27]</sup>。例如 Kail 等使用土壤和水文评估工具(Soil and Water Assessment Tool, SWAT),结合河流水力学与 2D 水动力学模型探索生境质量空间分布信息<sup>[26-27]</sup>;陈森等对三峡库区 36 条重要支流的多个样点进行了综合评价等<sup>[28]</sup>。诸多学者将生态系统服务评估与权衡模型(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs, InVEST)应用于区域生境质量评估,取得了明显成效<sup>[23-24,28-29]</sup>。随着土地利用模型技术的成熟,对历史时期与未来生境质量的探索逐渐成为研究热点<sup>[7,30]</sup>。但目前利用这些技术预测不同情景下生境质量变化特征的研究尚不多见。

福建省是我国东南沿海的天然屏障,闽江是省内第一大河,生态功能十分重要,为多种动植物提供繁殖、生活的栖息生境,也是我国流域生态补偿重要试点之一<sup>[31]</sup>。本文选用 InVEST 模型,并结合 CA-Markov 模型模拟未来不同情景下土地利用状况,分析 2000—2040 年闽江流域生境质量的时空演变规律,为闽江流域土地资源可持续利用与生物多样性保护提供科学依据和决策参考。

### 1 数据源与研究方法

#### 1.1 研究区概况

闽江发源于福建省建宁县均口镇,总长 2872 km,干流全长 577 km,年径流量达 621 亿 m<sup>3</sup>,流域面积 6 万多 km<sup>2</sup>,90% 以上位于福建省内,占全省陆域面积 48.87%,地理位置约为 116°—120°E,25°—29°N。考虑到研究区域完整性及特殊性,结合闽江流域自然边界最终确定上游(浦城县、武夷山市、光泽县、松溪县、建阳市、邵武市、顺昌县、建瓯市、政和县、南平市、连城县),中游(宁化县、清流县、永安市、大田县、建宁县、明溪县、三明市、泰宁县、将乐县、沙县、尤溪县)与下游(德化县、古田县、闽清县、闽侯县、永泰县、福州市、长乐市)为研究范围(图 1)。流域内地形复杂,盆地、山地丘陵与峡谷相互交错,主要土壤类型为红壤与黄壤;该区为亚热带海洋性季风气候,降雨量及产水量丰富,植被覆盖率高,主要植被类型为常绿阔叶林、常绿针叶林与竹林,区内武夷山具有我国东南现存面积最大、保留最完整的中亚热带常绿阔叶林森林生态系统。流域内动植物资源丰富;闽江口湿地和三明市沙溪流域明溪段等地还是全球性的候鸟迁徙通道<sup>[31]</sup>。

#### 1.2 数据源

研究数据源包括 InVEST 模型“Habitat Quality”模块所需数据与 IDRISI 模型数据,本文中 CA 模型的元胞大小为 1 km<sup>2</sup>,统一调整图像栅格为 1 km×1 km。土地利用与土地覆被数据为 2000 年、2005 年、2010 年与 2015 年地理空间数据云平台下载 Landsat 系列遥感图通过镶嵌、校正、裁剪、解译等处理获得,解译精度达 95% 以上,划分为 13 个地类(图 2)。在地理空间数据云下载研究区 30 m 分辨率数字高程数据,通过镶嵌、裁剪与填注处理获得高程、坡度与坡向等数据。距水域、道路与居民点距离利用 GIS 提取的研究区水域、道路与居民点进行欧氏距离分析获取。土壤质地来源于世界土壤数据库(HWSD)。人口密度与国内生产总值来源于资源环境科学与数据中心已发布的公里网格 GDP 和人口密度数据。夜间的灯光指数来源于资源环境科学与数据中心与 NOAA 网站下载获得 1 km 栅格数据。半

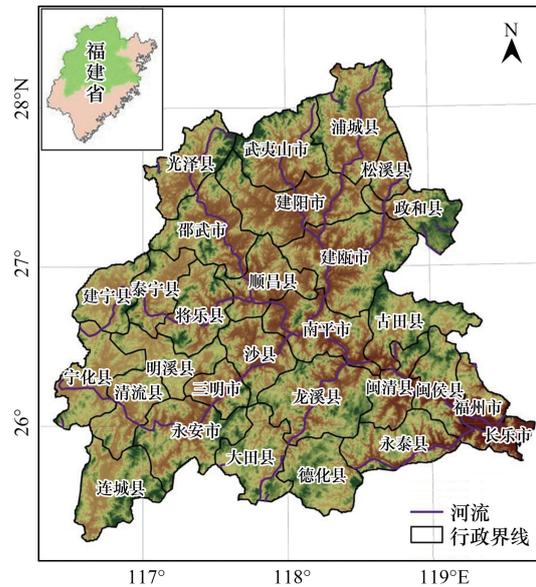


图 1 闽江流域位置图

Fig.1 Location map of Min River Basin

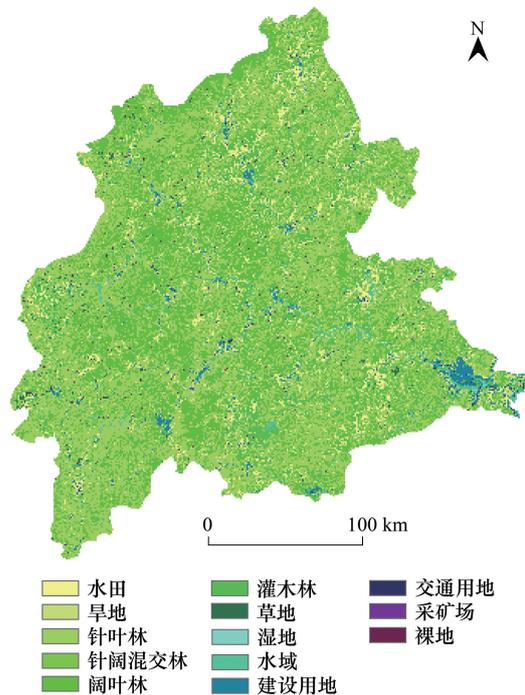


图 2 闽江流域 2015 年土地利用现状数据

Fig.2 Land use data of Min River Basin in 2015

饱和参数  $K$  参照模型参数与学者研究获取<sup>[32-33]</sup>。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 土地利用模拟预测

CA 模型被广泛应用于城市空间扩展和土地利用模拟,模拟结果为合理利用土地和区域经济发展规划提供理论依据;Markov 模型是将马尔科夫链理论模型和方法研究应用于概率论中,以分析随机事件的变化并预测未来趋势<sup>[15-17]</sup>。

##### (1) Logistic 模型

Logistic 模型属于非线性模型,主要应用于对多因素综合影响下的事件概率进行预测,近年来广泛运用于土地利用变化的因子分析中<sup>[15-17]</sup>。每个栅格可能出现某种土地利用类型的概率可以通过将因变量与自变量的数据采取 Logistic 回归分析得出。ROC (Relative Operating Characteristic) 是验证 Logistic 回归方程拟合度的一个精度指标,一个完整的随意模型确定的 ROC 值为 0.5,而满意适合结果的 ROC 值为 1。

##### (2) CA-Markov 模型

CA 是一种基于不连续的时空动态模拟模型。其特点是时间、空间和状态都是离散状态,复杂系统可以由一些很简单的局部规则来产生<sup>[15-17]</sup>。通常包括单元、状态、邻近范围和转换规则 4 个要素,可用如下表达式表示:

$$S_{(t+1)} = f(S_t, N) \quad (1)$$

式中,  $S$  为元胞离散、有限的状态集合,  $N$  为元胞的邻域,  $t, t+1$  分别表示 2 个不同的时刻,  $f$  为元胞状态转化规则。

Markov 模型可实现系统由一种状态转移至另一种状态,预测结果由初始状态向量和转移概率矩阵决定,其特点为无后效性和稳定性,土地利用变化满足该模型使用条件<sup>[5,26,30]</sup>。运用 Markov 模型进行土地利用预测的关键在于确定在  $n$  时刻的转移概率  $P_{ij}$ 。其表达式为:

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \cdots & P_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

利用此概率建立土地利用 Markov 预测模型为:

$$S^{(k+1)} = S^{(k)} P_{ij} = S^{(0)} P_{ij}^{(k+1)} \quad (3)$$

式中,  $S^{(k+1)}$  为预测地类在  $t=k+1$  时的状态向量,即预测结果;  $S^{(0)}$  为初始状态量,即预测初期各土地利用类型的面积;  $S^{(k)}$  为预测地类在  $t=k$  时刻的状态向量;  $P_{ij}$  为研究时段内土地利用类型  $i$  转换为  $j$  的概率。

##### (3) 模拟精度检验

模拟精度检验包括数量与空间精度检验<sup>[15-17]</sup>。数量精度检验公式定义如下:

$$E_i = \left| \left( \frac{m_{iy} - m_{ix}}{m_{ix}} \right) \times 100\% \right| \quad (4)$$

式中,  $E_i$  为第  $i$  类土地利用类型的数量精度;  $m_{iy}$  为第  $i$  类土地利用类型的模拟面积;  $m_{ix}$  为第  $i$  类土地利用类型的实际面积。  $E_i$  的值越小说明模拟精度越高。

IDRISI 模型中 Kappa 系数是一个空间精度检验系数,在评价空间模拟精度时,计算得出的 Kappa 系数 > 0.80 时,精度通过检验;当  $0.4 < \text{Kappa} \leq 0.80$  时,精度有待进一步提高;当  $0 < \text{Kappa} \leq 0.4$  时,模拟结果较差。

#### 1.3.2 生境质量测算

InVEST 模型由美国斯坦福大学联合世界自然基金会等开发,初衷是为了权衡区域发展与保护间的关系,寻求最优自然资源管理和经济发展模式。模型中“Habitat Quality”可作为生境质量的反映,结合土地利用和土地覆被与生境质量威胁因素的信息生成生境质量地图,将不同的土地利用和土地覆被类型视为相应的生态

系统类型或人类活动的干扰因子,依据各生态系统类型对动植物的生境适宜度和人类干扰因子的威胁强度来模拟生境质量的空间分布<sup>[3,29,32,34]</sup>。生境质量计算公式如下:

$$Q_{ij} = H_j \left[ 1 - \left( \frac{D_{ij}^Z}{D_{ij}^Z + k^Z} \right) \right] \tag{5}$$

$$D_{ij} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{Y_i} \left( \frac{w_i}{\sum_{r=1}^R w_r} \right) r_y i_{riy} \beta_x S_{ji} \tag{6}$$

式中, $Q_{ij}$ 指土地利用类型  $j$  中栅格  $i$  的生境质量,处于 0—1 区间内,值越高生境质量越好; $D_{ij}$ 是栅格  $i$  的生境胁迫水平; $H_j$ 为土地利用类型  $j$  的生境适合度; $k$  是半饱和常数; $Z$  为模型默认参数的归一化常量; $R$  表示胁迫因子; $y$  表示胁迫因子  $r$  栅格图层的栅格数; $r$  表示图层的栅格数; $Y_i$ 表示胁迫因子所占栅格数; $w_i$ 表示胁迫因子的权重,介于 0—1 之间; $r_y$ 表示栅格  $y$  的胁迫因子值(0 或 1); $i_{riy}$ 表示栅格  $y$  的胁迫因子值  $r_y$  对生境栅格  $i$  的胁迫水平; $S_{ji}$ 表示生境类型  $j$  对胁迫因子  $r$  的敏感度。

闽江流域作为福建省工农业的重要生产基地,人类活动与工农业生产等为区内生境的主要胁迫因子。研究选取受到人类干扰较大的建设用地、交通用地、采矿场、裸地、水田与旱地作为生态环境的威胁源头。模型通过空间距离这一变量计算生态威胁因子对各个土地利用类型的影响程度,鉴于空间关系的复杂性,提供了线性衰退与指数衰退两种威胁因子对土地利用类型影响距离的方法。参照模型参数与相关学者研究进行赋值(表 1 与表 2)<sup>[3,7,20,29,32-34]</sup>。

表 1 闽江流域胁迫因子的最大影响距离及其权重

Table 1 Maximum influence distance and weight of threat factor in Min River Basin

胁迫因子 Threat factor	最大影响距离/km Maximum influence distance	权重 Weight	衰退类型 Type of decline
建设用地 Construction land	4	0.3	指数衰退
交通用地 Traffic land	2	0.1	指数衰退
采矿场 Mining land	4	0.15	指数衰退
裸地 Bare land	1	0.1	线性衰退
水田 Paddy field	1	0.1	线性衰退
旱地 Dry farm	1	0.15	线性衰退

表 2 闽江流域不同生境类型对不同胁迫因子的敏感度

Table 2 Sensitivity of different habitat types to different threat factors in Min River Basin

土地利用类型 Land use type	生境适宜性 Habitat suitability	建设用地 Construction land	交通用地 Traffic land	采矿场 Mining land	裸地 Bare land	水田 Paddy field	旱地 Dry farm
水田 Paddy field	0.5	0.3	0.2	0.3	0.4	0	0.9
旱地 Dry farm	0.3	0.5	0.2	0.5	0.4	0.9	0
针叶林 Coniferous forest	0.9	0.8	0.7	0.7	0.2	0.8	0.6
针阔混交林 Theropencedrymion	1	0.8	0.7	0.7	0.2	0.8	0.6
阔叶林 Broad-leaved forest	0.9	0.8	0.7	0.7	0.2	0.8	0.6
灌木林 Shrubwood	0.8	0.6	0.5	0.6	0.2	0.6	0.6
草地 Grassland	0.7	0.6	0.6	0.5	0.2	0.5	0.5
湿地 Wetland	0.8	0.8	0.6	0.8	0.2	0.5	0.5
水域 Water area	0.7	0.7	0.6	0.8	0.2	0.5	0.5
建设用地 Construction land	0	0	0.5	0	0.1	0	0
交通用地 Traffic land	0	0.6	0	0.6	0.1	0	0
采矿场 Mining land	0	0	0.5	0	0.1	0	0
裸地 Bare land	0.01	0.1	0.1	0.2	0	0.1	0.2

### 1.3.3 土地利用预测情景设置

基于 2000—2015 年的土地利用变化数据,设立 2025—2040 年现有发展与生态保护两种情景。现有发展

情景下根据研究区土地利用特点选择高程、坡度、坡向、到水域距离、土壤质地、人口密度、夜间灯光指数、国内生产总值、到公路距离、到居民点距离 10 个驱动因子为自变量,因变量为各地类分布图,通过 Logistic 回归分析制作土地适宜性图集。

生态保护情景下遵从全国国土规划纲要设立的目标:坚持集聚开发与均衡发展相协调、提高土地利用效率、加强重点生态功能区保护、强化耕地资源保护等,严格限制未利用地增长,控制建设用地增长,保护耕地、林地、水域等,基本限制其他地类转为未利用地,水田、水域和湿地限制其转为建设用地,利用 MCE 模型加入限制因子更新土地利用适宜性图集,模拟土地利用变化。

## 2 结果与分析

### 2.1 闽江流域土地利用变化

#### 2.1.1 现状土地利用变化分析

由图 2 与图 3 可知,2000—2015 年间研究区土地利用有如下规律:耕地面积呈下降趋势,降速有所扩大,其中耕地利用以水田为主,沿山脚平原与河漫滩地势平坦区域零散分布;林地是主要用地类型,占流域总面积的 87%左右,面积保持在相对稳定的状态,以针叶林与阔叶林为主,面积有所增长,生态用地保护的较好;针

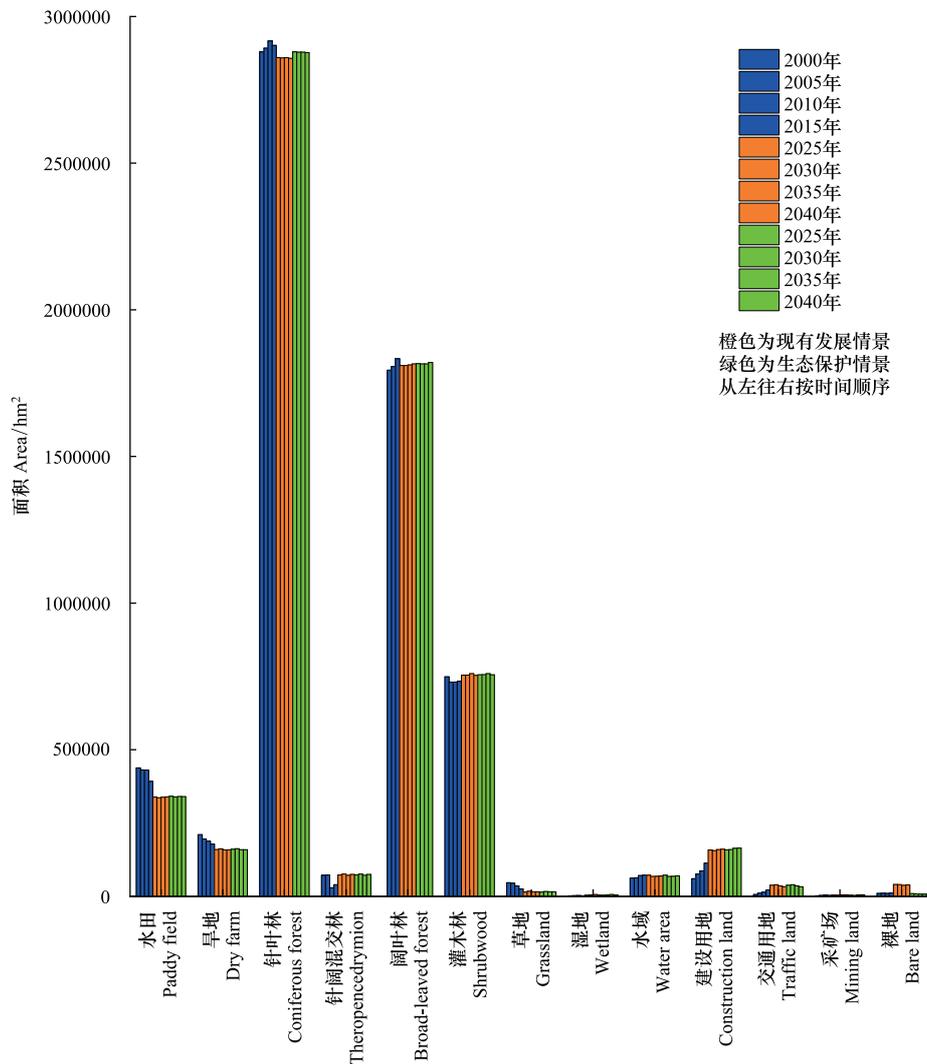


图 3 闽江流域 2000—2040 年土地利用面积统计图

Fig.3 Land use area statistics in Min River Basin from 2000 to 2040

阔混交林面积占比相对较小且不断缩减,零散分布在上游和下游区域,表明研究区森林类型相对单一;灌木林的占比较大且面积较稳定,林质林相有很大提升空间;草地占比较小且面积呈不断缩减趋势,主要集中在上游地势相对平坦的区域与现有城市绿化区域,现状条件下减幅最大,达 44.64%;流域用地主要为水域,同时有相对规模的湿地分布于水域附近,面积有所扩展,其中以水域增长为主,生态建设至关重要,构成了闽江流域的生命线;工矿、交通与建设用地占比相对较小,但面积在不断扩展,建设用地位于流域下游福州、长乐等区域分布集中,交通用地是连接各大城市的枢纽,采矿场零散分布于流域上中游区域,现状条件下建设用地增长面积最大,但交通用地涨幅最大,达到 227.27%;裸地规模相对较大,现状条件下有缓慢增长趋势。

### 2.1.2 闽江流域土地利用变化模拟分析

#### (一) 模拟精度检验

研究利用 Logistic 模型制作土地利用适宜性图集,模拟单项土地利用变化,ROC 检验结果均大于等于 0.83,表明所选驱动因子具有较好的模拟精度。为验证 CA-Markov 模型模拟精度,首先基于 2005、2010 年两期土地利用数据和 2010 年土地利用驱动因子预测 2015 年土地利用图,再与实测数据进行对比分析。面积检验结果见表 3,除草地与采矿场外其余各地类模拟的数量精度均小于 15%,具有较好的模拟精度。

表 3 2015 年土地利用模拟面积精度检验表

Table 3 land use simulation area accuracy test table in 2015

地类 Land use type	实际面积/hm <sup>2</sup> Actual area	模拟面积/hm <sup>2</sup> Simulated area	精度 Precision
水田 Paddy field	391900.00	426000.00	8.70%
旱地 Dry farm	178600.00	195600.00	9.52%
针叶林 Coniferous forest	2901300.00	2832900.00	2.36%
针阔混交林 Theropencedrymion	40000.00	34700.00	13.25%
阔叶林 Broad-leaved forest	1833100.00	1833200.00	0.01%
灌木林 Shrubwood	733400.00	737300.00	0.53%
草地 Grassland	25800.00	43400.00	68.22%
湿地 Wetland	2200.00	2500.00	13.64%
水域 Water area	72300.00	79000.00	9.27%
建设用地 Construction land	113000.00	102800.00	9.03%
交通用地 Traffic land	21600.00	22900.00	6.02%
采矿场 Mining land	3300.00	4400.00	33.33%
裸地 Bare land	12100.00	13900.00	14.88%

对比分析 2015 年闽江流域土地利用实际图像与预测图的相似度,最后得出 Kappa 系数为 89.09%,表示一致性程度显著,模拟精度高。

#### (二) 土地利用变化模拟分析

据图 3 可知,在现有发展情景下,耕地面积总体表现出波动下降的趋势;林地总面积基本能保持稳定,针叶林面积减至相对稳定的数值,针阔混交林与灌木林面积在波动状态下缓慢上升;草地面积则下降到相对稳定的水平;水域总面积基本能保持稳定,存在部分水域向湿地及建设用地转换的现象;受经济建设影响,工矿、交通与建设用地面积都表现出一定程度增加,其中建设用地增速最高;裸地面积表现为先增加后减少的趋势,主要分布于流域上中游区域。

据图 3 与图 4 可知,在生态保护情景下,实现集聚开发与均衡发展相协调,耕地面积总体表现出波动下降的趋势,较现有发展情景降幅小;林地总面积基本能保持稳定,其中针叶林面积减少至相对稳定的数值,阔叶林、针阔混交林与灌木林面积在波动状况下缓慢上升,较现有发展情景下林地受到较好保护;草地面积则下降到相对稳定的水平,在未来保护实施中草地应作为重点关注对象;水域总面积基本能保持稳定,存在部分水域向湿地及建设用地转换的现象,向建设用地转换的幅度较现有发展情景要小;工矿、交通与建设用地面积都表

现出一定程度的增加,其中建设用地增速最高,生态保护情景并没有限制建设用地增长;裸地面积逐渐减小,分布也较为规律,生态保护情景能有效控制裸地增加。

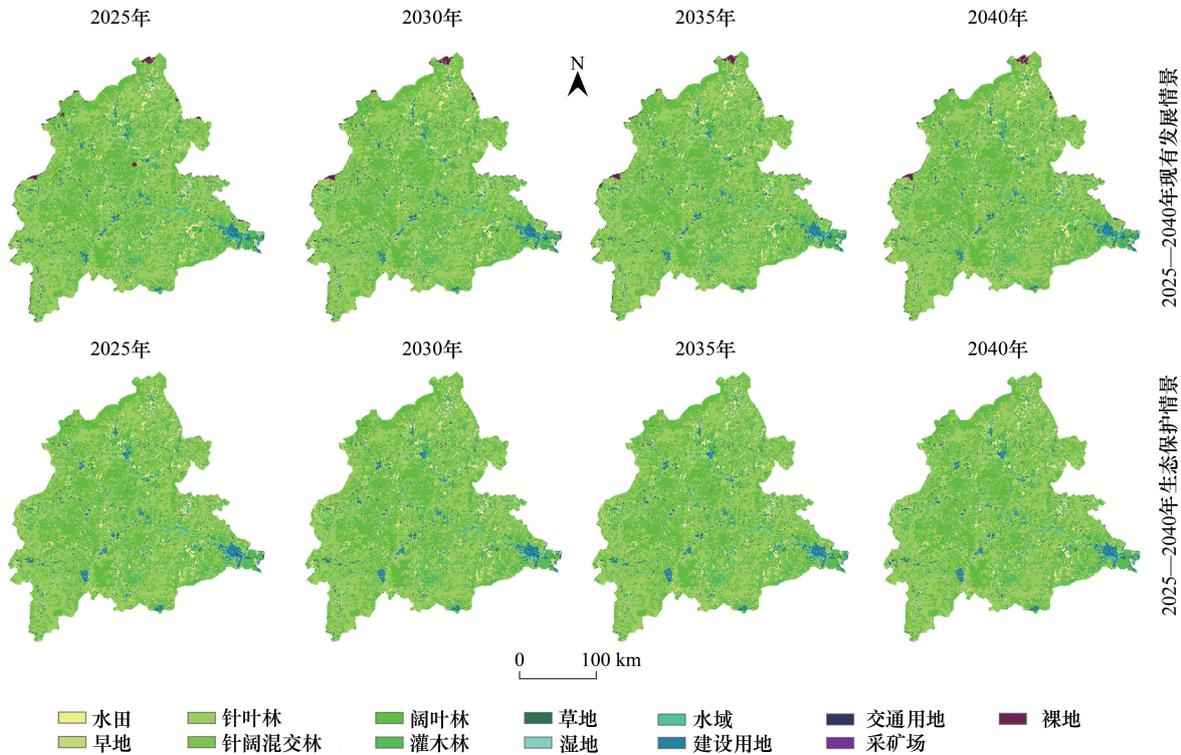


图4 闽江流域土地利用预测图

Fig.4 Land use forecast map of Min River Basin

## 2.2 闽江流域生境质量时空动态分析

根据图5可知,工矿建设用地区域为研究区生境质量低值的主要分布区,下游的福州与长乐市分布有最大的生境质量低值聚集区,同时生境质量分布与地形条件存在极大相关性,低值区多为海拔较低的区域,沿流域附近的河谷盆地零散分布,高海拔地区多为生境质量良好的区域;土地利用规划及有效的建设开发与保护行为导致未来生境破碎度减小,生境质量的聚集效应更为明显,而且生态保护情景下的生境质量分布最为规律,也体现出其较好保护了生境质量。

据统计结果图6可知,2000、2005、2010和2015年闽江流域生境质量的均值分别为0.83、0.83、0.82、0.82,生境状况良好,2005—2015年3期的生境质量降幅分别为0.13%、0.23%和0.24%,其中2010—2015阶段下降最快,与生境质量现实结果变化规律刚好相反,生境质量总体呈现衰退趋势,且衰退变化率逐期升高。2015—2025年在现有发展情景下降幅达0.81%,生态保护情景下降幅仅为0.38%;同时,现有发展情景下,2025—2040年闽江流域生境质量的变化率为0.01%,生境质量下降的趋势未得到有效缓解;生态保护情景下,2025—2040年闽江流域生境质量的变化率为0.03%,生境质量下降的趋势得到有效缓解,呈V字型波动增长。参照已有研究的划分标准<sup>[5]</sup>,按照生境质量每0.2分划分一个级别,划分为差、较差、一般、良好、优等五个级别,2000、2005、2010与2015年闽江流域生境质量为优等等级的栅格个数占比分别为86.87%、86.89%、86.69%、87.06%,呈现出波动上升的态势;现有发展情景下,2025、2030、2035与2040年闽江流域生境质量为优等等级的栅格个数占比分别为86.93%、86.98%、87.06%、87.00%,呈现倒V型波动态势,较2015年略有降低;生态保护情景下,2025、2030、2035与2040年闽江流域生境质量为优等等级的栅格个数占比分别为87.36%、87.39%、87.41%、87.42%,呈现缓慢上升的态势。

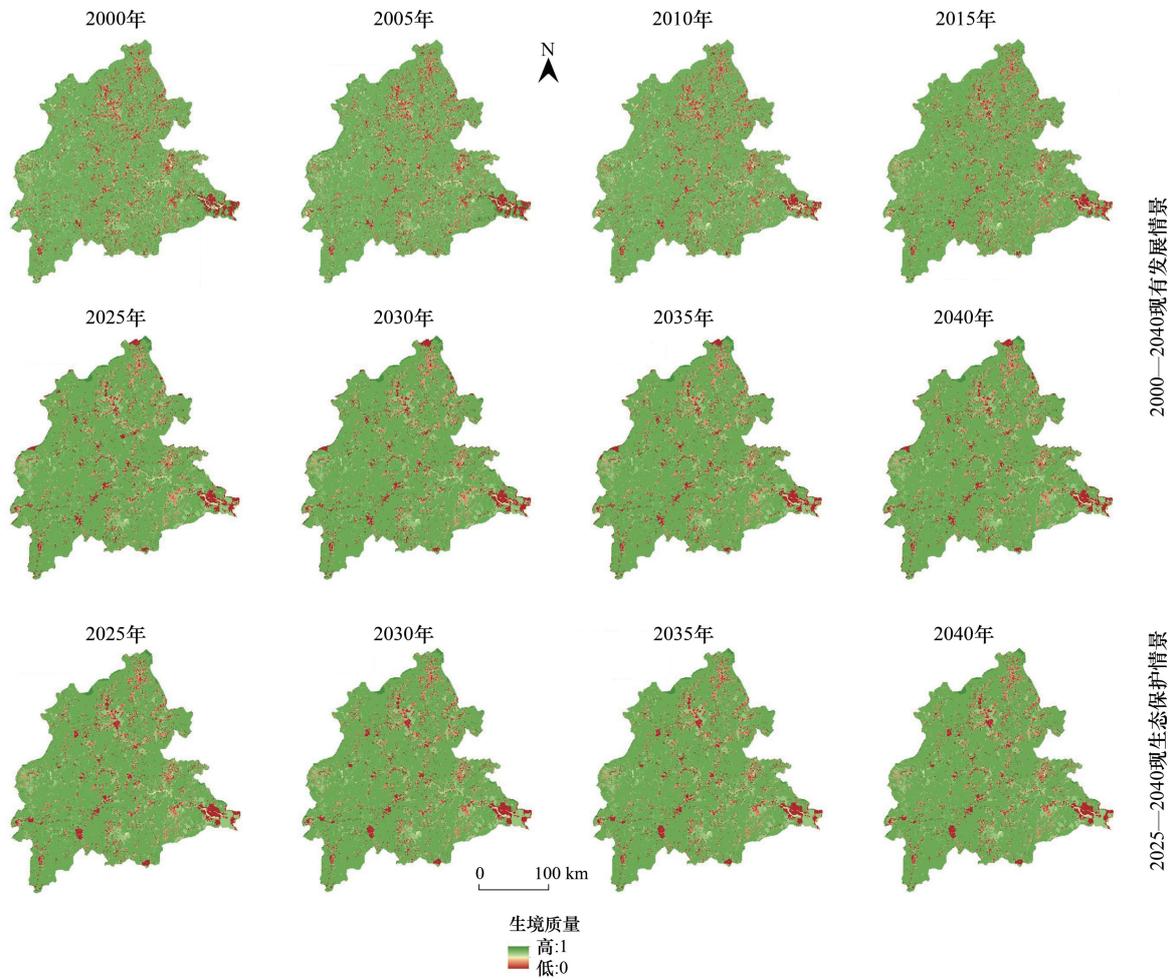


图 5 2000—2040 年闽江流域生境质量时空分布与变化

Fig.5 Temporal-spatial distribution and change of habitat quality in Min River Basin from 2000 to 2040

通过与研究区行政区划图叠加(图 7)分析可知, 2000—2015 年上中游区域生境水平整体较高, 均高于 0.8 的水平; 下游区域整体水平较低, 尤其是靠近闽江口的福州与长乐市, 但生境质量水平与区位分布并不是简单的线性关系, 比如下游也存在永泰县生境质量达 0.84 的水平, 该区域分布有藤山自然保护区。现有发展情景下, 发现蒲城、光泽、松溪、建宁、福州与长乐等生境质量下降最为明显, 区域生境质量差距呈现扩张趋势; 生态保护情景下基本维持 2015 年的生境质量水平, 值得注意的是三明市生境质量明显降低, 其原因可能是三明市建设用地在未来的扩张潜力较大; 研究区整体水平较现有发展情景略有提高。

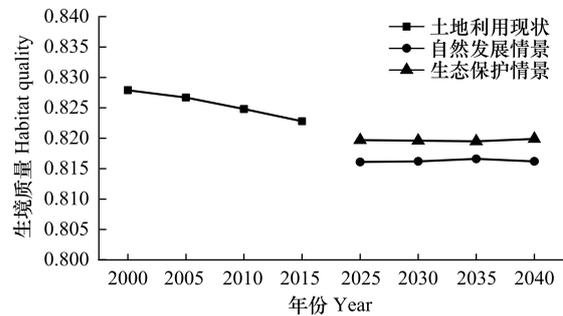


图 6 2000—2040 年闽江流域生境质量变化

Fig.6 Habitat quality changes in the Min River Basin from 2000 to 2040

### 3 讨论

研究区土地利用格局受到地形、区位、气候、社会经济、人口与政策等多重因素影响。根据土地利用现状

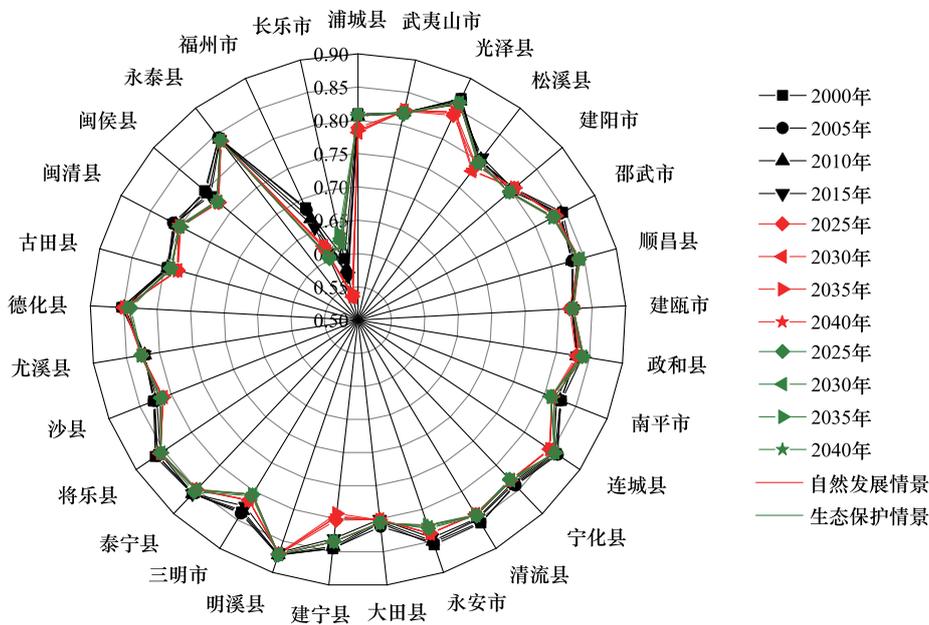


图7 闽江流域2000—2040年各县域生境质量时空变化

Fig.7 Temporal-spatial change in habitat quality of counties in Min River Basin from 2000 to 2040

分析结果可知,林地在闽江流域占据了绝对的优势,以针叶林及阔叶林为主,南方丘陵山地土壤肥沃,降雨充沛,适宜林木生长,生态用地保存较为完整,但林地结构有待提升,对残次林的改造是下一步保护的要点;自建国以来福建省在扩大耕地面积方面做了很多努力,但耕地为补充建设用地潜力的主要来源,新增耕地面积依然不及被占用的耕地面积,耕地面积减小的态势明显,此外区内低海拔的耕地以水田为主;湿地与水域为研究区提供了良好的生境,维持在较高的水平,是流域生态补偿重点关注对象,构成了闽江流域的生命线;草地也是高生境质量分布的区域,但规模不断减小,原因在于其转变的弹性较大;建设用地与裸地是低生境质量分布的主要区域,均存在一定程度扩展,其中以建设用地为主,这与闽江流域依托东南沿海经济带优势大力发展经济及人口扩展密切相关,这些结论与白健、钟莉娜等研究相似<sup>[10,20,35-37]</sup>。现有发展情景下耕地与林地等由于未受到严格保护,缩减的态势明显,同时,随着经济社会发展与人口增长,建设用地与裸地等增长明显,基于规划设立的生态保护情景,通过设置限制条件有效的缓解了该类问题,保护了耕地、林地与水域等,建设用地向着更加有序的方向扩展,裸地得到有效遏制,土地利用效率提高,满足社会发展与生态保护的需求,但设计的保护策略也存在对草地关注度不足的问题,草地占比依然保持在较低水平。

研究区生境质量与土地利用格局密切相关。生境质量总体良好得益于研究区高植被覆盖度、水域、湿地及相应的生态保护措施,维持生境是流域生态补偿政策设计的重要目的<sup>[38-39]</sup>。流域上中游是经济欠发达的南平、三明等地区,山地面积占比大,是重要的生态功能区,而流域下游河流入海口地区地势相对平坦,作为海峡西岸的重要口岸,是经济较为发达的福州、长乐市,生态环境相对较差,同时低海拔区域人为扰动更为剧烈,导致空间上表现出上中游区域生境质量较下游区域高,呈现出高海拔地区总体生境质量比低海拔地区高的变化规律<sup>[1]</sup>。经济发展与城市扩展导致区域土地利用类型转变,区域自然生境被进一步分割,低生境区域扩展上升,整体来看闽江流域生境质量有降低的趋势,这种趋势在经济发达区域尤为明显,原因是这些区域社会经济与人为活动更为激烈,需要采取必要措施,防止生境的进一步恶化。现有发展情景下由于保护力度较弱致使生境质量进一步降低,生态保护情景下强化了相应保护措施,生态用地得到有效保护,建设用地有序扩张,生境质量得到良好维持。

本研究综合了 CA-Markov 模型与 InVEST 模型分析闽江流域过去与未来长时间序列的生境质量格局,为闽江流域生境质量的维护与优化提供科学依据和决策参考,探索了回溯历史时期和预测未来长时间序列的生

境质量研究思路。研究佐证了生态保护的重要性,区域上中下游存在明显的生态质量差异,在未来发展中应继续保持生态补偿策略,提升林质林相,严格保护流域范围内的耕地、草地与水域等,特别是关注有限的草地,在下游区域加强对建设用地与未利用地的管控,促进流域上中下游共建共治共享流域生态环境。基于 CA-Markov 模型模拟的土地利用精度经检验其 Kappa 系数为 89.09%,精度较高,满足了较大尺度的研究需要,小尺度上则需要更高的精度,同时对栅格尺度的探索也值得深化研究。

#### 4 结论

作为海峡西岸的重要生态屏障,闽江流域森林覆盖率较高,生态用地保存较为完整,但伴随着经济发展与人口增长,建设用地占用耕地、草地与湿地等现象依然存在,现状条件下水田、旱地、针阔混交林、灌木林、草地与湿地面积呈下降的趋势,其中草地减幅最大,达 44.64%,针叶林、阔叶林、水域、建设用地、交通用地、采矿场与裸地面积呈上升的趋势,其中交通用地涨幅最大,达到 227.27%。本文构建的 CA-Markov 模型模拟土地利用变化精度较高,设立现有发展与生态保护两种情景对照分析,基于生态保护情景在未来土地利用格局优化上表现良好,可为研究区未来发展提供决策参考。

本研究利用 InVEST 模型中的“Habitat Quality”模块模拟闽江流域生境质量空间格局,探究研究区从 2000—2040 年由栅格到整体再到县域的生境质量空间格局。闽江流域总体呈现较高的生境质量,基本维持在 0.82 的水平,工矿、交通与建设用地区域为研究区生境质量低值的主要分布区,下游的福州与长乐分布有最大的生境质量低值聚集区。2000—2015 年闽江流域生境质量总体呈现衰退趋势,且降幅逐期升高,最高达 0.24%;现有发展情景下生境质量下降的趋势未得到有效缓解,生态保护情景下生境质量下降的趋势得到有效缓解,同时生境质量为优等级的栅格个数占比最大,最高达 87.42%。总体看上中游区域生境水平较下游高,2000、2005、2010 与 2015 年上中游区域平均生境质量均高于 0.8 的水平,下游区域整体水平较低,尤其是靠近闽江口的福州与长乐市,但下游也存在永泰县生境质量达 0.84 的水平。现有发展情景下区域生境质量差距出现扩张趋势,生态保护情景下各区域则基本维持了 2015 年的生境质量水平,但也存在例如三明市生境质量明显降低的情况出现,整体水平较现有发展情景有明显提高。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Bai Y, Jiang B, Alatalo J M, Zhuang C W, Wang X Y, Cui L J, Xu W H. Impacts of land management on ecosystem service delivery in the Baiyangdian River Basin. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(3): 258.
- [ 2 ] 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.
- [ 3 ] Gong J, Xie Y C, Cao E J, Huang Q Y, Li H Y. Integration of InVEST-habitat quality model with landscape pattern indexes to assess mountain plant biodiversity change: a case study of Bailongjiang Water area in Gansu Province. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29(7): 1193-1210.
- [ 4 ] 王军, 应凌霄, 钟莉娜. 新时代国土整治与生态修复转型思考. *自然资源学报*, 2020, 35(1): 26-36.
- [ 5 ] Hillard E M, Nielsen C K, Groninger J W. Swamp rabbits as indicators of wildlife habitat quality in bottomland hardwood forest ecosystems. *Ecological Indicators*, 2017, 79(1): 47-53.
- [ 6 ] 于丹丹, 吕楠, 傅伯杰. 生物多样性与生态系统服务评估指标与方法. *生态学报*, 2017, 37(2): 349-357.
- [ 7 ] 张学儒, 周杰, 李梦梅. 基于土地利用格局重建的区域生境质量时空变化分析. *地理学报*, 2020, 75(1): 160-178.
- [ 8 ] Newbold T, Hudson L N, Hill S L L, Contu S, Lysenko I, Senior R A, Börger L, Bennett D J, Choimes A, Collen B, Day J, De Palma A, Díaz S, Echeverria-Londoño S, Edgar M J, Feldman A, Garon M, Harrison M L K, Alhussaini T, Ingram D J, Itescu Y, Kattge J, Kemp V, Kirkpatrick L, Kleyer M, Correia D L P, Martin C D, Meiri S, Novosolov M, Pan Y, Phillips H R P, Purves D W, Robinson A, Simpson J, Tuck S L, Weiher E, White H J, Ewers R M, Mace G M, Scharlemann J P W, Purvis A. Global effects of land use on local terrestrial biodiversity. *Nature*, 2015, 520(7545): 45-50.
- [ 9 ] Otto C R V, Roth C L, Carlson B L, Smart M D. Land-use change reduces habitat suitability for supporting managed honey bee colonies in the Northern Great Plains. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(37): 10430-10435.
- [ 10 ] Li Z T, Li M, Xia B C. Spatio-temporal dynamics of ecological security pattern of the Pearl River Delta urban agglomeration based on LUC simulation. *Ecological Indicators*, 2020, 114(c): 106319.

- [11] Wu F L. Calibration of stochastic cellular automata: the application to rural-urban land conversions. *International Journal of Geographical Information Science*, 2002, 16(8): 795-818.
- [12] Li X, Yeh A G O. Neural-network-based cellular automata for simulating multiple land use changes using GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 2002, 16(4): 323-343.
- [13] Verburg P H, Soepboer W, Veldkamp A, Limpiada R, Espaldon V, Mastura S S A. Modeling the spatial dynamics of regional land use: the CLUE-S model. *Environmental Management*, 2002, 30(3): 391-405.
- [14] Liu X P, Liang X, Li X, Xu X C, Ou J P, Chen Y M, Li S Y, Wang S J, Pei F S. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 168: 94-116.
- [15] Han Y, Jia H F. Simulating the spatial dynamics of urban growth with an integrated modeling approach: a case study of Foshan, China. *Ecological Modelling*, 2017, 353: 107-116.
- [16] 张晓娟, 周启刚, 王兆林, 王福海. 基于 MCE-CA-Markov 的三峡库区土地利用演变模拟及预测. *农业工程学报*, 2017, 33(19): 268-277.
- [17] Zou L L, Liu Y S, Wang J Y, Yang Y Y, Wang Y S. Land use conflict identification and sustainable development scenario simulation on China's Southeast Coast. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 238(20): 117899.
- [18] Zhang J D, Hull V, Huang J Y, Yang W, Zhou S Q, Xu W H, Huang Y, Ouyang Z Y, Zhang H M, Liu J G. Natural recovery and restoration in giant panda habitat after the Wenchuan earthquake. *Forest Ecology and Management*, 2014, 319: 1-9.
- [19] Tang X G, Li H P, Xu X B, Yang G S, Liu G H, Li X Y, Chen D Q. Changing land use and its impact on the habitat suitability for wintering Anseriformes in China's Poyang Lake region. *Science of the Total Environment*, 2016, 557-558: 296-306.
- [20] 钟莉娜, 王军. 基于 InVEST 模型评估土地整治对生境质量的影响. *农业工程学报*, 2017, 33(1): 250-255.
- [21] 刘春艳, 朱康文, 刘吉平. 三峡库区重庆段土地覆盖和生物多样性功能演化及预测. *农业工程学报*, 2017, 33(19): 258-267.
- [22] Weber D, Schaepman-Strub G, Ecker K. Predicting habitat quality of protected dry grasslands using Landsat NDVI phenology. *Ecological Indicators*, 2018, 91(1): 447-460.
- [23] Riedler B, Lang S. A spatially explicit patch model of habitat quality, integrating spatio- structural indicators. *Ecological Indicators*, 2018, 94(2): 128-141.
- [24] 杨建强, 朱永贵, 宋文鹏, 张娟, 张龙军, 罗先香. 基于生境质量和生态响应的莱州湾生态环境质量评价. *生态学报*, 2014, 34(1): 105-114.
- [25] 曾鹏, 汪昱昆, 刘垚焱, 王话翔, 陈氏权, 车越. 基于河段尺度的太湖流域城市河流生境评价. *应用生态学报*, 2020, 31(2): 581-589.
- [26] Kail J, Guse B, Radinger J, Schröder M, Kiesel J, Kleinhans M, Schuurman F, Fohrer N, Hering D, Wolter C. A modelling framework to assess the effect of pressures on river abiotic habitat conditions and biota. *PLoS One*, 2015, 10(6): e0130228.
- [27] Benjankar R, Tonina D, McKean J A, Sohrabi M M, Chen Q W, Videgar D. An ecohydraulics virtual Water areahed: integrating physical and biological variables to quantify aquatic habitat quality. *Ecohydrology*, 2019, 12(2): e2062.
- [28] 陈森, 苏晓磊, 黄慧敏, 高婷, 党成强, 董蓉, 曾波, 陶建平. 三峡库区河流生境质量评价. *生态学报*, 2019, 39(1): 192-201.
- [29] Terrad M, Sabater S, Chaplin-Kramer B, Mandle L, Ziv G, Acuña V. Model development for the assessment of terrestrial and aquatic habitat quality in conservation planning. *Science of the Total Environment*, 2016, 540: 63-70.
- [30] 褚琳, 张欣然, 王天巍, 李朝霞, 蔡崇法. 基于 CA-Markov 和 InVEST 模型的城市景观格局与生境质量时空演变及预测. *应用生态学报*, 2018, 29(12): 4106-4118.
- [31] Zhang J X, Li H, Zhang X F, Yu H, Liang F N, Qin Z J, Jiang M H, Balas V E, Jain L C. Sensitivity evaluation of soil erosion based on land use types: a case study of Minjiang River Basin. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2020, 38(5): 5697-5705.
- [32] Tallis H T, Ricketts T, Guerry A D, Nelson E E D, Wolny S O N, Vigerstol K, Pennington D, Mendoza G, Aukema J, Foster J, Forrest J, Cameron D L E, Kennedy C, Verutes G, Kim C K, Guannel G, Papenfus M, Toft J, Marsik M, Bernhardt J, Wood S, Sharp R. InVEST 2.1 Beta User's Guide. Stanford: The Natural Capital Project, 2011.
- [33] 刘智方, 唐立娜, 邱全毅, 肖黎姗, 许通, 杨丽. 基于土地利用变化的福建省生境质量时空变化研究. *生态学报*, 2017, 37(13): 4538-4548.
- [34] Zhang H, Zhang C, Hu T, Zhang M, Run X W, Hou L. Exploration of roadway factors and habitat quality using InVEST. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2020, 87, 102551.
- [35] Zhang X R, Song W, Lang Y Q, Feng X M, Yuan Q Z, Wang J T. Land use changes in the coastal zone of China's Hebei Province and the corresponding impacts on habitat quality. *Land Use Policy*, 2020, 99: 104957.
- [36] 白健, 刘健, 余坤勇, 张林波, 李新通, 王德旺. 基于 InVEST-Biodiversity 模型的闽江流域生境质量变化评价. *中国科技论文*, 2015, 10(15): 1782-1788.
- [37] 钟莉娜, 王军, 白中科, 陈艳华, 董占杰. 农用地整理对区域景观动态与生态风险影响研究——以福建省建溪流域为例. *中国土地科学*, 2019, 33(1): 73-82.
- [38] Ouyang Z Y, Zheng H, Xiao Y, Polasky S, Liu J G, Xu W H, Wang Q, Zhang L, Xiao Y, Rao E M, Jiang L, Lu F, Wang X K, Yang G B, Gong S H, Wu B F, Zeng Y, Yang W, Daily G C. Improvements in ecosystem services from investments in natural capital. *Science*, 2016, 352(6292): 1455-1459.
- [39] 王军, 钟莉娜. 生态系统服务理论与山水林田湖草生态保护修复的应用. *生态学报*, 2019, 39(23): 8702-8708.