

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.03.023.

余洲, 李明玉, 钱雨扬, 等. 基于 CA_Markov 模型多情景模拟的三峡库区土地利用变化及其生态环境效应[J]. 水土保持研究, 2024, 31(3): 363-372.

Yu Zhou, Li Mingyu, Qian Yuyang, et al. Land Use Change and Its Ecological Effects in Three Gorges Reservoir Area Based on CA_Markov Model with Multiple Scenarios Simulation[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(3): 363-372.

基于 CA_Markov 模型多情景模拟的三峡库区 土地利用变化及其生态环境效应

余洲^{1,2}, 李明玉¹, 钱雨扬², 朋仁锋², 杨国兴²

(1. 延边大学, 吉林 延吉 133002; 2. 长江三峡技术经济发展有限公司, 北京 101100)

摘要: [目的] 探究三峡库区土地利用与生态环境质量时空演变特征, 揭示土地利用变化引起的生态环境效应, 为研究区土地资源整合和生态环境保护提供依据。[方法] 选取 2000 年、2010 年、2020 年土地利用遥感监测数据, 采用 CA_Markov 模型分别预测自然变化情景(NCS)和生态保护情景(EPS)下 2030 年土地利用空间格局, 并通过转移矩阵、生态环境质量指数、地统计分析、生态贡献率等方法, 对三峡库区长时间序列土地利用变化及生态环境效应进行定量分析。[结果] (1) 2000—2020 年, 三峡库区土地利用类型间转化明显, 其中耕地转向建设用地, 草地转向林地和耕地, 建设用地面积增长量 1 321.56 km², 增长率达 275.02%。(2) 模拟结果显示 2030 年生态保护情景下林地、草地面积比例均高于自然变化情景, 而建设用地扩大规模相比自然变化情景显著减少。(3) 三峡库区生态环境质量呈现出自西向东逐渐升高的阶梯式分布格局, 2000—2030 年其生态环境质量略微下降, 由 2000 年的 0.547 9 降低至 2030 年的 0.533 6。(4) 2000—2030 年, 降低三峡库区生态环境质量的两大主导因素是林、草地转为耕地, 提高其生态环境质量的主要有利因素是耕地转为林地, 生态贡献率比重超过 70%。[结论] 退耕还林还草和城市快速发展使三峡库区同时存在生态改善与生态恶化, 但总的来看, 研究区生态环境质量表现为改善略小于恶化的态势, 建设用地、林地、耕地、草地之间的转化是其主要原因。

关键词: 土地利用变化; 生态环境质量; CA_Markov 模型; 情景模拟; 三峡库区

中图分类号: F301.2; X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)03-0363-10

Land Use Change and Its Ecological Effects in Three Gorges Reservoir Area Based on CA_Markov Model with Multiple Scenarios Simulation

Yu Zhou^{1,2}, Li Mingyu¹, Qian Yuyang², Peng Renfeng², Yang Guoxing²

(1. Yanbian University, Yanji, Jilin 133002, China; 2. Yangtze Three Gorges
Technology & Economy Development Co., Ltd., Beijing 101100, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to investigate the spatial and temporal evolution characteristics of land use and ecological environment quality in the Three Gorges Reservoir area, to reveal the ecological environment effects caused by land use changes, and to provide a basis for land resource integration and ecological environment protection in the study area. [Methods] Remote sensing monitoring data of land use in 2000, 2010 and 2020 were selected to predict the spatial pattern of land use in 2030 under the Natural Change Scenario (NCS) and the Ecological Protection Scenario (EPS) using the CA_Markov model, respectively, and to quantitatively analyze the long time series of land use changes and ecological and environmental effects of the Three Gorges Reservoir Area by transfer matrix, ecological environment quality index, geostatistical analysis, and ecological contribution rate. [Results] (1) From 2000 to 2020, the Three

收稿日期: 2023-05-31

修回日期: 2023-06-14

资助项目: 国家自然科学基金项目“延龙图地区城市生态用地评价与空间格局优化研究”(41461036)

第一作者: 余洲(1996—), 男, 四川广安人, 硕士, 助理工程师, 研究方向为地图学与地理信息系统。E-mail: 1070230928@qq.com

通信作者: 李明玉(1974—), 女, 黑龙江梅县人, 博士, 教授, 研究方向为城市生态用地评价。E-mail: leemy@ybu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

Gorges Reservoir Area had obvious transformation between land use types, in which cropland shifted to construction land, grassland shifted to forest land and cropland, and the growth of construction land area amounted to 1 321.56 km², with a growth rate of 275.02%. (2) The simulation results show that the proportions of forestland and grassland area under the ecological protection scenario in 2030 will be higher than those under the natural change scenario, while the expansion of construction land significantly reduces compared with the natural change scenario. (3) The ecological quality of the Three Gorges Reservoir Area shows a stepped distribution pattern of gradual increase from west to east, and its ecological quality slightly decreases from 2000 to 2030, from 0.547 9 in 2000 to 0.533 6 in 2030. (4) From 2000 to 2030, the two dominant factors reducing the ecological quality of the Three Gorges Reservoir Area are the conversion of forests and grasslands to croplands, and the main favorable factor improving its ecological quality is the conversion of croplands to forests, with a proportion of ecological contribution exceeding 70%. [Conclusion] The return of farmland to forests and grasslands and rapid urban development have led to both ecological improvement and ecological deterioration in the Three Gorges Reservoir Area, but in general, the ecological environment quality in the study area shows a trend of improvement slightly less than deterioration, and the transformation between construction land, forestland, cropland and grassland is the main reason for this.

Keywords: land use change; ecological environment quality; CA_Markov model; scenario simulation; Three Gorges Reservoir Area

近年来,随着众多学者对全球变化的深入研究,发现人类活动所引起的土地利用转化、土地强度开发及经济快速增长等现象,正不断对区域生态环境造成巨大影响,如何进行有效的生态保护已然成为人们的普遍关注^[1-3]。自改革开放以来,伴随我国工业化、城镇化进程全面推进,城市问题愈加突出,建设用地的扩张侵占大量农耕地致使城市周边地区生态环境不断下降^[4-6]。土地利用转型即土地利用类型的时序变化过程^[7],导致生态问题频频发生,如植被减少、水资源及土壤污染、城市热岛效应等^[8-11]。目前,我国人地矛盾日益突出,需平衡好土地资源开发与生态环境二者间关系,因此亟待探讨有效方法分析区域生态环境优劣及长时间序列的演变规律。

土地利用/覆被变化是 21 世纪国内外研究的热点之一,也是生态环境变化研究的主要课题。伴随 3S 技术迅猛发展,从时空不同维度探讨土地利用变化变得更为简易,评估区域生态环境效应的框架和标准也有所改善^[12],进而衍生出许多关于土地利用生态效应的评价方法。最早由李晓文等^[13]提出基于 LUCC 评估生态环境质量时空演变特征,利用生态赋值法建立土地利用与生态环境的关系,从而获取定量评估结果,此后被广泛应用于中国^[12]、省域^[14]、城市群等^[15-17]不同空间尺度的效应研究。然而,在研究时段范围内,众多学者针对未来情景下的土地利用生态环境效应研究少之又少,大多是聚焦于当前时段下区域生态环境。现今应用最为广泛的土地利用预

测模型包括 CLUE 模型、FLUS 模型及 CA-Markov 模型等,模型互有差异。CLUE 模型是一种动态、小尺度的土地利用变化空间模拟模型,可模拟出土地利用的空间变化情况,对于非空间的土地利用变化需借助其他方法完成估算,再作为参数输入模型;FLUS 模型是依据一期土地利用数据及驱动因子,通过随机采样方式计算各用地类型的适宜性概率,再结合邻域效应、转换成本和惯性系数,得到各像元上每种用地类型转换的总概率,以此实现土地利用变化模拟;CA-Markov 模型既弥补了 CLUE 模型非空间土地利用变化参数估算的不足,也相较于 FLUS 模型对比了两期(基期和上一期)土地数据以获得更高精度的各类用地发展概率,且同时拥有马尔科夫模型长时间序列预测和元胞自动机模型模拟复杂空间变化的两种功能^[18-20],因此许多国家及地区开展未来土地利用变化评估选用该模型^[21-23]。

三峡库区地处长江中上游,其巨大型水库特征为长江中下游的水生态安全提供重要的生态屏障。由于受三峡工程影响,库区分阶段蓄水、大量土地淹没、原居民移居搬迁、城镇化建设等因素,使库区土地结构发生转变,水土流失、生物多样性减少等生态问题相继增加,周边生态环境可持续发展受到制约。因此,本文在明确 2000—2020 年三峡库区土地利用变化基础上,采用 CA-Markov 模型分别预测三峡库区 2030 年自然变化和生态保护 2 种不同情景下的土地利用空间格局,再结合生态环境质量指数法分析 2 种

情景下其生态环境质量的时空演变规律, 以期为三峡库区土地资源合理开发、生态安全修复及生态环境保护等方面提供科学依据。

1 研究区概况

三峡库区(28°28′—31°44′ N, 106°49′—111°39′ E)是一个特定的现代区域概念, 地跨鄂中及川东岭谷过渡地带, 南连川鄂高原, 北面与大巴山交界(图 1), 总面积约 5.8 万 km²。行政区划上将其大致分为库首、库腹和库尾 3 个部分, 库首部分主要包括湖北省夷陵区、兴山、巴东和秭归 4 个县(市), 库腹部分包括重庆市长寿、涪陵、万县、开州、云阳、巫溪等 12 个区县, 库尾部分包括重庆市江津区以及主城九区。库区冬暖春早、夏热秋迟, 具有典型的湿润亚热带季风气候, 多年平均气温约 16℃; 区域内山地、丘陵分布最为广泛, 地势东高西低, 东南部山地高耸, 地表起伏较大且地形破碎。

据 2020 年重庆市、湖北省统计年鉴报告, 三峡库区常住人口总数约 1 944.06 万人, 其中, 重庆段库区常住人口 1 794.76 万人, 湖北段库区常住人口 149.30 万人。在经济总量上, 2020 年三峡库区实现地区生产总值高达 16 728.42 亿元, 人均地区生产总值 7.66 万元; 与上一年相比, 第一产业增加值 95.23 亿元, 增长 11.62%; 第二产业增加值 248.68 亿元, 增长 4.24%; 第三产业增加值 1 475.95 亿元, 增长 17.95%。受三峡水利枢纽工程及水库蓄水影响, 原集中在三峡工程 175 m 水位线以下的优良土地明显减少, 且在针对安置补偿失地农民的政策上, 以种植业安置为主, 由此产生一系列土地过度开垦现象, 导致严重的人为水土流失。

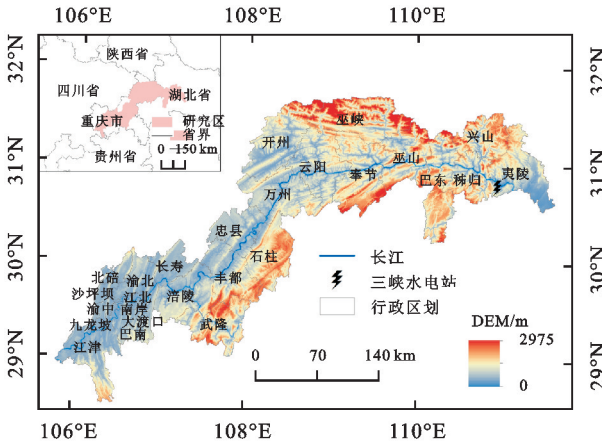


图 1 三峡库区地理位置

Fig. 1 Geographical location of the Three Gorges reservoir area

2 数据来源及研究方法

2.1 数据来源

三峡库区 2000 年、2010 年、2020 年 3 期土地利用数据均从中国科学院资源环境科学与数据中心获取, 原始数据包括 6 个一级地类和 26 个二级地类, 按照土地利用分类标准, 划分林地、耕地、草地、水域、建设用地及未利用地(图 2)。海拔高度(DEM)空间分布数据下载于地理空间数据云, 坡度、坡向数据可通过 DEM 获取; 路网数据来源于 OpenStreetMap 官网; 行政区划等矢量数据下载于国家基本地理数据库; 统计数据源于重庆市及湖北省统计年鉴; 最终将以上数据统一至 Krasovsky_1 940_Albers 坐标系, 空间分辨率为 30 m。本研究参考杨清可^[15]、杨述河等^[24]相关生态环境质量指数成果表, 并结合库区实际情况, 利用面积加权法获得三峡库区各土地利用类型的生态环境质量指数(表 1)。

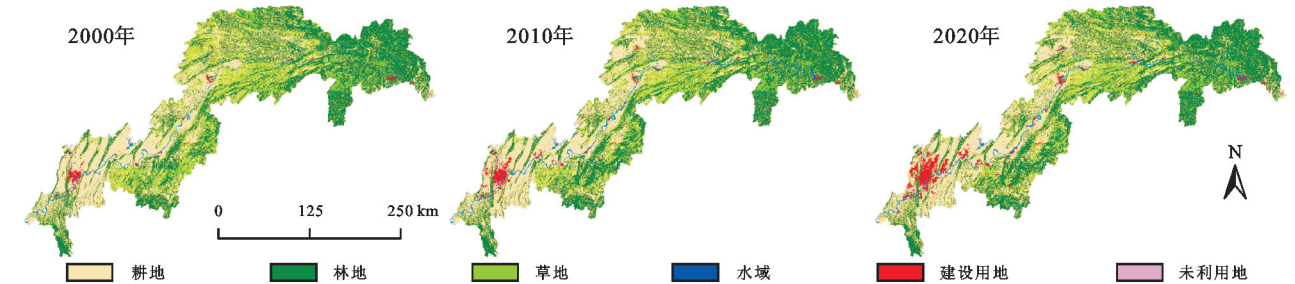


图 2 2000 年、2010 年、2020 年三峡库区土地利用现状

Fig. 2 Status of land use in the Three Gorges reservoir area in 2000, 2010 and 2020

2.2 研究方法

2.2.1 CA_Markov 模型及情景设定 马尔科夫(Markov)模型是已知某一事件当前时期的状态, 通过确定该事件发生转移的概率来预测其下一时期的变化趋势, 是一种长期有效的预测方法^[25]。元胞自动机(CA)模型在多领域的基本研究思路是自上而下研究系统元素间的相互作用^[26], 可模拟出复杂系统的时空演变过程。CA_Markov 模型通过耦合 Markov 模

型的长期预测能力及 CA 模型的空间模拟能力, 进行优势互补, 可较好地模拟与预测出 LUCC 在时空上的变化格局。计算公式见式(1—2):

$$S_{t+1} = S_t \times P \tag{1}$$

式中: S_{t+1} 为某事件在 $t+1$ 时期的状态, 即 Markov 模型预测结果; S_t 为某事件在 t 时期状态; P 为转移概率矩阵。

$$X_{t,t+1} = f(X_t, N) \tag{2}$$

式中: X 为元胞离散、有限时状态集合; f 为元胞改变规则; N 为元胞邻域; $t, t+1$ 分别代表上一时期、下一时期。

表 1 三峡库区土地利用分类及生态环境质量指数

Table 1 Land use classification and eco-environmental quality index in the Three Gorges reservoir area

一级地类	生态环境 质量指数	二级地类	生态环境 质量指数
耕地	0.26	水田	0.30
		旱地	0.25
林地	0.76	有林地	0.95
		灌林地	0.65
		疏林地	0.45
		其他林地	0.40
		高覆盖草地	0.75
草地	0.67	中覆盖草地	0.45
		低覆盖草地	0.20
		河曲	0.55
水域	0.54	水库坑塘	0.55
		滩涂	0.45
		滩地	0.55
		城镇建设用地	0.20
建设用地	0.18	农村居民点	0.20
		其他建设用地	0.15
未利用地	0.14	裸土地	0.01
		沼泽地	0.65

本文借助 IDRISI 17.2 软件运行 CA_Markov 模型,通过设定不同情景来模拟三峡库区 2030 年土地利用分布格局,具体步骤如下:

(1) 利用 Markov 模块分别将 2000 年、2020 年土地利用设定成初期、末期数据,获得转移概率矩阵及转移面积,揭示不同用地类型间相互转化的速率。

(2) 利用 MCE 模块构建适宜性图集。选取高程、坡度、到高速距离、到公路距离、到居民点距离、到水域距离等作为限制性因素,设置自然变化情景(NCS)和生态保护情景(EPS)作为约束性因素。情景 1:自然变化情景(NCS);结合 2000—2020 年库区土地利用变化特征,假设 2020—2030 年其土地利用变化趋势依照上一阶段演变规律和扩张模式,不再额外增加各用地类型间的转换条件,不考虑当地政府的干扰,则依据 2000—2020 年转移概率矩阵模拟自然发展状况下的 2030 年土地利用空间分布。情景 2:生态保护情景(EPS);按照国家生态保护政策,对库区内自然保护区、湿地公园、消落带生态修复试验区等核心区域,实施严格的生态保护制度,即核心区域内参数设置时不允许向其他用地类型转化,同时设定限制林地、草地等生态用地随意转换,防止自然生态用地被建设用地占据。

(3) 以 2000 年作为初始时刻,利用 CA_Markov 模块模拟研究区 2020 年土地利用现状并采用 Kappa 指数进行精度验证。若拟合结果较好,可进行 2030 年土地利用预测。

(4) 最后,选择 5×5 扩展 Moore 型邻域,使用验证后的 CA_Markov 模型规则,以 2020 年作为初始时刻,选择相应的适宜性图集,预测出 2030 年土地利用格局。

2.2.2 模拟精度评价 Kappa 系数是用于一致性检验的指标,所谓一致性是指模型预测结果与实际是否一致,该系数可通过数量及空间变化来验证模型预测结果^[23]。其计算公式如下:

$$Kappa = \frac{P - P_t}{1 - P_t} \quad (3)$$

式中: Kappa 为精度验证结果; P 为总体模拟精度; P_t 为理论模拟精度。Kappa 系数在 $0 \sim 0.2$ 时,模拟结果不可靠;在 $0.2 \sim 0.4$ 时,模拟一致性较差;在 $0.4 \sim 0.6$ 时,模拟结果一般;在 $0.6 \sim 0.8$ 时,模拟一致性较好;在 $0.8 \sim 1.0$ 时,模拟结果可靠。

2.2.3 生态环境效应

(1) 生态环境质量指数。为获取 LUCC 与生态环境质量间的定量关系,本文依据经验公式^[27]选择格网尺度,将研究区各类用地斑块总数作为采样点,格网数大约为采样点数量的 $1/2$,三峡库区 2000 年、2010 年、2020 年解译的斑块数约 3.1 万个,通过经验公式多次调试,最终将研究区进行 $3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$ 格网化处理。其生态环境质量表达式为:

$$EQI_i = \sum_{j=1}^n A_{ij} \times R_j / T_i \quad (4)$$

式中: EQI_i 为 i 单元生态环境质量指数; A_{ij} 为 i 单元 j 类用地面积(km^2); R_j 为 j 类用地生态环境质量指数(表 1); T_i 为第 i 个样本单元的总面积(km^2)。

(2) 地统计分析法。将计算的生态环境质量指数赋值给各样本中心点,采用半方差分析插值处理,获得生态环境空间分布。其表达式为^[15]:

$$S(d) = \frac{1}{2n(d)} \sum_{i=1}^{n(d)} [R(x_i) - R(x_i + d)]^2 \quad (5)$$

式中: $S(d)$ 为半方差; d 为样本距离; $n(d)$ 为样本对总数; $R(x_i)$ 和 $R(x_i + d)$ 分别为 x_i 与 $x_i + d$ 处的生态环境质量指数值。

(3) 土地利用转移生态贡献率。该方法可定量分析出影响生态环境质量发生改变的主导因素,计算公式为^[28]:

$$CLEI = \frac{(EQI_{t+1} - EQI_t) \times LA}{TA} \quad (6)$$

式中: CLEI 为生态贡献率; EQI_t, EQI_{t+1} 代表某用

地类型变化初期、变化末期的生态环境质量; LA 为该变化类型的面积(km²); TA 为总面积(km²)。

3 结果与分析

3.1 土地利用动态变化

3.1.1 2000—2020 年三峡库区土地利用变化特征
由表 2 可知,三峡库区土地利用类型以林地为主,占区域总面积 45% 以上;其次是耕地,占区域总面积 35% 以上;水域、建设用地及未利用地占比较少,均低于 5%。在 2000—2020 年,三峡库区建设用地面积增长量最多,增加了 1 321.56 km²,增长率为 275.02%;其次是林地,增加了 752.21 km²,增长率为 2.81%;而未利用

地面积增长量最少,总体变化不大。草地、耕地面积都有所变化,分别减少了 1 504.48 km²、902.17 km²,减少率分别为 20.34%、4.09%。

根据土地利用转移结果显示,在转出方面,耕地转为建设用地、林地的面积多,分别为 1 152.15 km² 和 1 112.65 km²;草地转为林地和耕地的面积次之,分别为 981.74 km² 和 898.30 km²;其他用地类型转出面积较少。在转入方面,林地转入面积最大,为 2 108.59 km²;其次是耕地和建设用地,转入面积分别为 1 871.15 km² 和 1 359.66 km²(表 3)。由此分析,2000—2020 年,土地利用转移呈现耕地转为建设用地和林地,草地转为林地和耕地的主要特征。

表 2 2000—2020 年三峡库区各期土地利用类型面积及比例

Table 2 Area and proportion of land use types in the Three Gorges reservoir area for each period from 2000 to 2020								
土地利用 类型	2000 年		2010 年		2020 年		面积	面积
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	变化量/km ²	变化率/%
耕地	22074.75	38.35	21639.81	37.60	21172.57	36.79	—902.17	—4.09
林地	26814.78	46.59	27619.25	47.99	27566.99	47.90	752.21	2.81
草地	7396.55	12.85	6225.56	10.82	5892.06	10.24	—1504.48	—20.34
水域	777.60	1.35	1089.46	1.89	1106.10	1.92	328.50	42.24
建设用地	480.54	0.83	974.61	1.69	1802.11	3.13	1321.56	275.02
未利用地	9.79	0.02	5.32	0.01	14.17	0.02	4.38	44.76

表 3 2000—2020 年三峡库区土地利用类型面积转移特征

Table 3 Characteristics of land use type area transfer in the Three Gorges reservoir area from 2000 to 2020							km ²
2000 年	2020 年						
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	
耕地	19297.75	1112.65	348.43	163.44	1152.15	4.32	
林地	940.79	25447.81	134.30	124.74	148.21	2.31	
草地	898.30	981.74	5403.43	58.14	49.38	1.73	
水域	19.11	8.03	3.15	736.08	9.86	1.02	
建设用地	12.00	5.00	0.53	20.63	442.27	0.08	
未利用地	0.95	1.17	0.33	2.56	0.06	4.72	

3.1.2 不同情景土地利用模拟预测 首先,通过 CA_Markov 模块模拟研究区 2020 年土地利用结果,再结合库区 2020 年土地利用现状进行对比分析得到混淆矩阵,计算 Kappa 系数结果为 0.93,表明该 CA_Markov 模型规则的模拟精度较高。然后,继续使用该模型模拟出 2030 年两种不同情景下的三峡库区土地利用空间分布情况,如图 3 所示。

从不同情景模拟结果与分析(表 4),自然变化情景下,2020—2030 年土地利用发展规律及各用地类型变化幅度相似于上一时段,库区建设用地、林地、水域和未利用地预计比 2020 年分别增加 1 798.37 km²、498.98 km²、123.40 km² 和 28.22 km²,其中建设用地增量最大,增长率高达 99.79%;而耕地、草地将持续减少,减少量分别为 1 944.01 km²、504.96 km²。生态保护情景下,由于自然生态用地不可随意

转换的约束条件,各用地类型变化幅度与上一阶段略有差异,与 2020 年相比,耕地面积减少了 2 622.32 km²;其他用地类型均表现为增加趋势,其中林地增量最大、建设用地次之、未利用地增量最小,分别增加 1 262.09 km²、993.96 km² 和 16.14 km²。

对比自然变化与生态保护情景,生态保护情景下的林、草生态用地面积增加显著,且面积比例均高于自然变化情景,分别从 48.76%和 9.36%上升至 50.09%和 10.50%;而建设用地面积占比的增长同样受到生态保护的严格约束,建设用地占库区总面积比例从自然变化情景的 6.26%下降至生态保护情景的 4.86%,扩大规模明显减少。

3.2 生态环境效应分析

3.2.1 生态环境时空变化特征 三峡库区 2000 年、2010 年和 2020 年的生态环境质量指数分别为 0.547 9,

0.544 3,0.539 3(图 4),呈现持续减少的状态,总体指数减少 0.008 6,该结果表明三峡库区生态环境质量逐期下降。自然变化情景下,到 2030 年生态环境质量预测值为 0.533 6,较 2020 年减少 0.005 6;而生态保护情景下,2030 年生态环境质量预测值为 0.538 6,较 2020 年仅减少 0.000 7,其减少速度明显低于自然变化情景模式,主要原因是由于不同情景模拟对土地利用转移的限制条件有所差异。生态保护情景时,林草等生态用地转换受到严格的约束,限制其转化为生态环境质量更低的用地类型,且建设用地扩大规模明显减少,因此其生态环境质量略高;自然变化情景时,土地利用演变特征及各用地类型变化幅度相似于上

表 4 2030 年自然变化(NCS)与生态保护(EPS)情景下各用地类型面积及其变化

土地利用 类型	2020 年		2030 年				2020—2030 年变化	
			NCS		EPS		NCS	EPS
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
耕地	21172.57	36.79	19228.56	33.41	18550.25	32.23	−1944.01	−2622.32
林地	27566.99	47.90	28065.97	48.76	28829.08	50.09	498.98	1262.09
草地	5892.06	10.24	5387.10	9.36	6042.03	10.50	−504.96	149.97
水域	1106.10	1.92	1229.50	2.14	1306.27	2.27	123.40	200.17
建设用地	1802.11	3.13	3600.48	6.26	2796.07	4.86	1798.37	993.96
未利用地	14.17	0.02	42.39	0.07	30.31	0.05	28.22	16.14

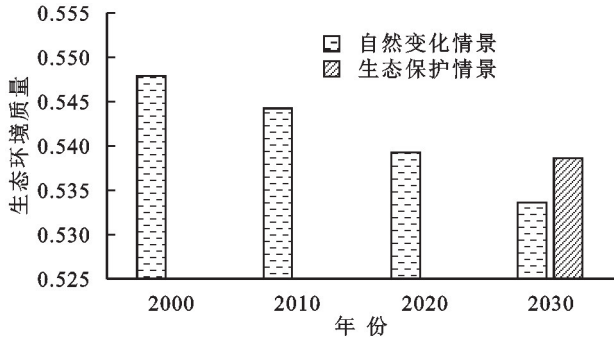


图 4 2000—2030 年三峡库区生态环境质量指数均值统计

Fig. 4 Average value of ecological environment quality index in Three Gorges reservoir area from 2000—2030

依据半方差分析进行插值处理,并通过自然间断点法,确立库区生态环境质量 5 个等级,Ⅰ级($EQI \leq 0.20$)、Ⅱ级($0.20 < EQI \leq 0.35$)、Ⅲ级($0.35 < EQI \leq 0.55$)、Ⅳ级($0.55 < EQI < 0.75$)、Ⅴ级($EQI \geq 0.75$)。

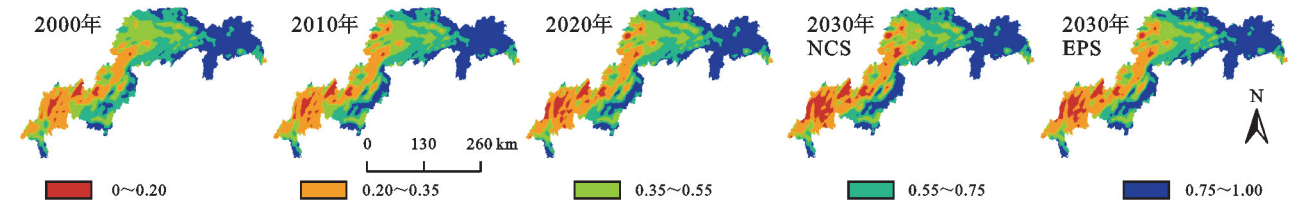


图 5 2000—2030 年三峡库区生态环境质量空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of ecological and environmental quality in the Three Gorges reservoir area from 2000—2030

从生态环境质量的面积比例及其变化看(表 5), 不同情景模拟下,三峡库区生态环境质量Ⅴ级的面积

一时段,草地的减少以及建设用地的不断增加,致使其生态环境质量较低。

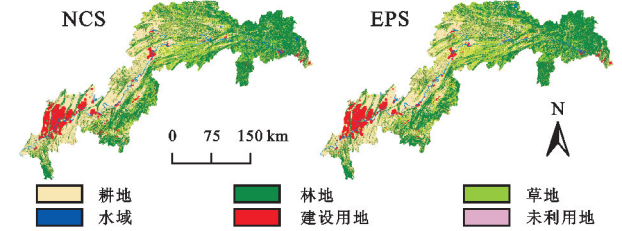


图 3 2030 年三峡库区自然变化(NCS)与生态保护(EPS)情景下土地利用分布

Fig. 3 Land use distribution under natural change (NCS) and ecological protection (EPS) scenarios in the Three Gorges reservoir area in 2030

根据生态环境质量空间分布及其变化分析(图 5), 2000—2030 年三峡库区生态环境质量的空间分布格局基本保持一致,具体表现为自西向东其生态环境质量逐渐升高的阶梯式分布格局,其中Ⅴ级高生态环境质量区最多,Ⅱ级低生态环境质量区次之,区域差异显著,但总体上变化幅度较小。在三峡库区东部,主要分布着Ⅳ级、Ⅴ级中高等级的生态环境质量区,原因是受库区地形地貌特征影响,东部山地高耸,道路崎岖人口分布少,人为干扰强度弱,且集中分布着大量林地,因此其生态环境质量较好。在三峡库区西部,主要分布着Ⅰ级、Ⅱ级较低等级的生态环境质量区,原因是库区西部较东部地势更为平坦,重庆主城区城镇化建设不断加快,人口密集,集中分布着大量耕地和城镇、农村居民点,人为干扰强度大,生态环境质量较差。

比例最大,Ⅰ级面积比例最小。在 2000—2030 年,生态环境质量Ⅱ级、Ⅲ级和Ⅳ级的面积比例都表现为不断下降,Ⅰ级、Ⅴ级面积比例表现为不断上升,其中,Ⅰ级由 2000 年的 2.37% 上升至 2030 年的 7.90%,面积增加量为 3 178.72 km²;Ⅴ级由 2000 年的 30.69% 上升至 2030 年的 35.54%,面积占比增加了 4.85%。

表 5 不同时期三峡库区土地利用变化生态环境质量等级面积比例

Table 5 Proportion of the area of ecological and environmental quality classes of land use change in the Three Gorges reservoir area in different periods %						
等级	取值范围	2000 年	2010 年	2020 年	2030 年	
					NCS	EPS
Ⅰ	0.00~0.20	2.37	3.33	5.03	7.90	5.84
Ⅱ	0.20~0.35	27.79	27.39	27.15	25.30	24.14
Ⅲ	0.35~0.55	19.02	17.82	16.68	14.67	15.50
Ⅳ	0.55~0.75	20.12	17.98	18.00	16.58	17.81
Ⅴ	0.75~1.00	30.69	33.47	33.13	35.54	36.71

3.2.2 土地利用转型生态贡献率 如表 6 所示,2000—2010 年,耕地转变为林地是提高三峡库区生态环境质量的主要用地转换类型及主导因素,贡献率比重约为 60.76%;草地转变为耕地、林地转变为耕地、林地及耕地转变为建设用地,则是生态环境质量降低的主要类型。2010—2020 年,耕地转变为林地、草地和水域,草地转变为林地,是致使三峡库区生态

环境质量提高的主要用地转换类型;林地转变为耕地则是生态环境质量降低的最主要原因,贡献率比重约为 57.22%。2020—2030 年,两种不同情景下,提高三峡库区生态环境质量的有利因素均是耕地转变为林地、耕地转变为草地,其生态贡献率比重分别超过 70%,10%。而不同预测情景中导致生态环境质量降低的影响因子略有差异,在自然变化情景下,林地转变为耕地是使其降低的主要原因,生态贡献率比重约为 61.93%,草地转变为耕地是第二大因素,生态贡献率比重约为 22.43%;在生态保护情景下,由于设定对自然生态空间的限制性条件,林地转化为其他用地类型面积比例不同于自然变化情景,主要是耕地转变成建设用地降低库区生态环境质量,贡献率比重约为 80.60%,其次是林地转变为草地,贡献率比重仅为 7.42%。

综上所述,区域生态环境的变化特征主要依赖于通过土地利用类型所展现出的生态环境结构。三峡库区生态环境变化同时存在生态改善与生态恶化 2 种模式,但最终其生态环境恶化略大于改善,总体生态环境质量持续降低。导致库区生态环境恶化的驱动因素为建设占地、土地退化、开垦耕地等,其土地利用类型变化主要为耕地向建设用地、林地向建设用地的转换;致使库区生态环境改善的驱动因素包括退耕还林还草、植树造林、未利用地开垦等,其土地利用变化类型主要为耕地转变为林地、耕地转变为草地以及未利用地转变为林地。

表 6 影响生态环境质量的土地利用转换类型及其生态贡献率

Table 6 Types of land use conversion affecting ecological quality and their ecological contribution						
变化期	致生态环境质量改善			致生态环境质量恶化		
	用地类型 转化	生态贡献率	占贡献率的 百分比/%	用地类型 转化	生态贡献率	占贡献率的 百分比/%
2000—2010 年	耕地—林地	0.005905	60.76	草地—耕地	0.004022	39.29
	耕地—草地	0.001677	17.26	林地—耕地	0.003933	38.41
	草地—林地	0.001332	13.71	林地—建设用地	0.000662	6.46
	耕地—水域	0.000579	5.96	耕地—建设用地	0.000608	5.94
2010—2020 年	耕地—林地	0.007047	72.73	林地—耕地	0.007745	57.22
	耕地—草地	0.001413	14.58	草地—耕地	0.002930	21.64
	草地—林地	0.000335	3.46	耕地—建设用地	0.001067	7.88
	耕地—水域	0.000329	3.39	林地—建设用地	0.000968	7.15
2020—2030 年 NCS	耕地—林地	0.029363	73.03	林地—耕地	0.025196	61.93
	耕地—草地	0.007936	19.74	草地—耕地	0.009125	22.43
	建设用地—林地	0.000663	1.65	耕地—建设用地	0.002029	4.99
	耕地—水域	0.000575	1.43	林地—草地	0.000852	2.09
2020—2030 年 EPS	耕地—林地	0.003153	72.47	耕地—建设用地	0.001986	80.60
	耕地—草地	0.000571	13.13	林地—草地	0.000183	7.42
	耕地—水域	0.000351	8.07	水域—建设用地	0.000156	6.31
	建设用地—水域	0.000158	3.64	耕地—未利用地	0.000041	1.68

4 讨论

三峡库区一直以来是国家及政府调整土地利用结构的重点关注区域,伴随着三峡工程的建设,大量居民移居搬迁、城镇化及基础设施服务建设等活动,致使库区土地利用结构和功能发生巨大转变,从生态环境安全角度来看,人地矛盾加剧带来了一系列的环境影响。本研究指出,2000—2030年三峡库区生态环境质量持续下降,林、草地转变为耕地是其生态环境恶化的主要原因,同时确证了吕霜霜等^[29]对三峡库区1990—2015年土地利用及生态系统服务价值时空演变分析成果,由于三峡工程建设过程中,移民安置、产业结构变动、人口聚集、城市化进程加快导致其生态环境质量降低,部分生态功能衰退。综合考虑三峡水利枢纽工程的防洪、发电及航运重大意义,协调好新时代中国生态文明建设对环境保护的要求与库区规划对建设用地的需求,即平衡好开发与保护二者间的关系,建议政府部门基于点轴空间组织形式,规划由“点”至“轴”再至“面”的国土空间布局蓝图^[30]。整体来说,需先识别国土空间单元的“中心点”“连通点”“阻隔点”等节点信息,以及“核心轴”“辅助轴”“一般轴”等发展轴线,然后在此基础上结合国土空间规划布局执行主体界线(如行政区划边界)刻画出“面”,划分出重要开发区、一般开发区、重要保护区和一般保护区。开发区包含未利用荒裸地、建设用地边界区域、主副城区、核心区等;保护区包含林地资源保护红线、基本耕地保护红线、草地自然保护区、一般居民点、古文化遗址等。最后,结合区域发展“点”“轴”“面”架构,划定落实生态红线、基本农田及城镇开发界线。

本文针对三峡库区当前土地利用结构的变化趋势、未来不同发展模式下的土地利用空间格局及生态环境效应进行分析,一方面,采用CA-Markov模型模拟库区未来LUCC变化过程中,考虑较多的是自然因素,缺乏社会、经济等要素所产生的影响,且遥感影像解译精度和分辨率也制约着模型模拟结果,因此未来对LUCC模拟预测要充分研究区的实际情况和其他约束条件,提高模型预测精度。另一方面,本文通过设定不同情景,模拟预测了三峡库区土地利用结构和功能的时空演变趋势,但缺乏对其土地利用转换驱动因子的深层次探讨,今后需结合随社会经济发展下的不同阶段土地利用转换驱动因素,对土地利用变化所引起的生态系统结构转变、生态环境效应等问题尚有待进一步分析。

5 结论

(1) 2000—2020年,三峡库区林地面积占比最大,占区域总面积47.90%,其次是耕地,占区域总面积36.79%。地类间转换特征明显,耕地转向建设用地和林地,草地转向林地和耕地,其中建设用地面积增长量最多,增加1321.56 km²,增长率高达275.02%。

(2) 通过CA-Markov模块模拟出2020年结果,将模拟结果与现状进行对比分析,计算Kappa系数为0.93,表明该CA-Markov模型规则的模拟精度较高。模拟结果显示,生态保护情景下林地、草地面积比例均高于自然变化情景,而建设用地的类型转换受到生态保护严格约束,其扩大规模相比自然变化情景明显减少。

(3) 从生态环境质量指数来看,三峡库区自然变化情景下由2000年的0.5479降低至2030年的0.5336,结果显示三峡库区生态环境质量略微下降。从生态环境质量空间分布及面积变化看,两种不同情景下其空间分布基本一致,表现为自西向东逐渐升高的阶梯式分布格局;且到2030年,自然变化情景下的V级生态环境质量面积占比低于生态保护情景,而I级生态环境质量面积占比高于生态保护情景。

(4) 2000—2010年和2010—2020年,林、草地转变为耕地是降低库区生态环境质量的两大主导因素,共计贡献率比重约为78%。2020—2030年,耕地转变为林地是提高库区生态环境质量的有利因素,贡献率比重超过70%;而导致生态环境质量降低的影响因素在两种情景模拟下有所差异,自然变化情景下是林地转为耕地,生态保护情景下是耕地转为建设用地。总的来看,2000—2030年三峡库区同时存在生态恶化与生态改善两种态势,但最终其生态环境恶化大于改善,总体生态环境质量略微降低。

参考文献(References):

- [1] Du X, Huang Z. Ecological and environmental effects of land use change in rapid urbanization: The case of Hangzhou, China[J]. Ecological Indicators, 2017, 81(10): 243-251.
- [2] 魏伟,周陶,郭泽呈,等.基于遥感指数的干旱内陆河流域土地生态敏感性时空演变特征:以石羊河流域武威市为例[J].生态学报,2020,39(9):3068-3079.
Wei W, Zhou T, Guo Z C, et al. Spatiotemporal evolution of land ecological sensitivity in arid inland river basin based on remote sensing index: a case of Wuwei City in Shiyang River basin[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(9): 3068-3079.

- [3] 郭泽呈,魏伟,石培基,等.中国西北干旱区土地沙漠化敏感性时空格局[J].地理学报,2020,75(9):1948-1965.
Guo Z C, Wei W, Shi P J, et al. Spatiotemporal changes of land desertification sensitivity in the arid region of Northwest China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020,75(9):1948-1965.
- [4] De Groot R S, Wilson M A, Boumans R M J. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services[J]. *Ecological Economics*, 2002,41(3):393-408.
- [5] Metzger M J, Rounsevell M D A, Acosta M L, et al. The vulnerability of ecosystem services to land use change[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2006,114(1):69-85.
- [6] Li R Q, Dong M, Cui J Y, et al. Quantification of the impact of land-use changes on ecosystem services: a case study in Pingbian County, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2007,128:503-510.
- [7] 龙花楼.论土地利用转型与土地资源管理[J].地理研究, 2015,34(9):1607-1618.
Long H L. Land use transition and land management [J]. *Geographical Research*, 2015,34(9):1607-1618.
- [8] Liu Y, Huang X, Yang H, et al. Environmental effects of land-use/cover change caused by urbanization and policies in Southwest China Karst area: A case study of Guiyang[J]. *Habitat International*, 2014,44:339-348.
- [9] 赵国松,刘纪远,匡文慧,等.1990—2010 年中国土地利用变化对生物多样性保护重点区域的扰动[J].地理学报,2014,69(11):1640-1650.
Zhao G S, Liu J Y, Kuang W H, et al. Disturbance impacts of land use change on biodiversity conservation priority areas across China during 1990-2010[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014,69(11):1640-1650.
- [10] 白娥,薛冰.土地利用与土地覆盖变化对生态系统的影响[J].植物生态学报,2020,44(5):543-552.
Bai E, Xue B. A review of influences of land use and land cover change on ecosystems[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2020,44(5):543-552.
- [11] 雷金睿,陈宗铸,吴庭天,等.1989—2015 年海口城市热环境与景观格局的时空演变及其相互关系[J].中国环境科学,2019,39(4):1734-1743.
Lei J R, Chen Z C, Wu T T, et al. Spatio-temporal evolution and interrelationship between thermal environment and landscape patterns of Haikou City, 1989—2015[J]. *China Environmental Science*, 2019,39(4):1734-1743.
- [12] 陈万旭,李江风,曾杰,等.中国土地利用变化生态环境效应的空间分异性与形成机理[J].地理研究,2019,38(9):2173-2187.
Chen W X, Li J F, Zeng J, et al. Spatial heterogeneity and formation mechanism of eco-environmental effect of land use change in China [J]. *Geographical Research*, 2019,38(9):2173-2187.
- [13] 李晓文,方创琳,黄金川,等.西北干旱区城市土地利用变化及其区域生态环境效应:以甘肃河西地区为例[J].第四纪研究,2003,23(3):280-290.
Li X W, Fang C L, Huang J C, et al. The urban land use transformations and associated effects on eco-environment in northwest China arid region: A case study in Hexi region, Gansu province [J]. *Quaternary Sciences*, 2003,23(3):280-290.
- [14] 焦露,薛哲进,尹剑,等.“三生空间”视角下喀斯特地区土地利用转型的生态环境效应:以贵州省为例[J].生态经济,2020,36(4):206-212.
Jiao L, Xue Z J, Yin J, et al. Eco-Environmental effects of land use transition in Karst area based on the view of “ecological-production-living spaces”: Taking Guizhou province as an example[J]. *Ecol. Econ*, 2020, 36(4):206-212.
- [15] 杨清可,段学军,王磊,等.基于“三生空间”的土地利用转型与生态环境效应:以长江三角洲核心区为例[J].地理科学,2018,38(1):97-106.
Yang Q K, Duan X J, Wang L, et al. Land use transformation based on ecological-production-living spaces and associated eco-environment effects: A case study in the Yangtze River Delta[J]. *Sci. Geogr. Sin.*, 2018,38(1):97-106.
- [16] 苑韶峰,唐奕钰,申屠楚宁.土地利用转型时空演变及其生态环境效应:基于长江经济带 127 个地级市的实证研究[J].经济地理,2019,39(9):174-181.
Yuan S F, Tang Y Y, Shentu C N. Spatiotemporal change of land-use transformation and its eco-environmental response: A case of 127 counties in Yangtze River Economic Belt[J]. *Econ. Geogr.*, 2019, 39(9): 174-181.
- [17] 高星,刘泽伟,李晨曦,等.基于“三生空间”的雄安新区土地利用功能转型与生态环境效应研究[J].生态学报,2020,40(20):7113-7122.
Gao X, Liu Z W, Li C X, et al. Land use function transformation in the Xiong'an New Area based on ecological-production-living spaces and associated eco-environment effects[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(20):7113-7122.
- [18] Etemadi H, Smoak J M, Karami J. Land use change assessment in coastal mangrove forests of Iran utilizing satellite imagery and CA-Markov algorithms to monitor and predict future change[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018,77:1-13.
- [19] Firozjahi M K, Sedighi A, Argany M, et al. A geo-

- graphical direction-based approach for capturing the local variation of urban expansion in the application of CA-Markov model[J]. *Cities*, 2019,93(10):120-135.
- [20] Rimal B, Keshkar H, Sharma R, et al. Simulating urban expansion in a rapidly changing landscape in eastern Tarai, Nepal[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2019,191:1-14.
- [21] Ramli, Firuz M, Aburas, et al. Improving the capability of an integrated CA-Markov model to simulate spatio-temporal urban growth trends using an Analytical Hierarchy Process and Frequency Ratio[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2017,59:65-78.
- [22] Tang F, Fu M, Wang L, et al. Land-use change in Changli County, China: Predicting its spatio-temporal evolution in habitat quality[J]. *Ecological Indicators*, 2020,117:106719.
- [23] 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[J].*地理学报*,2020,75(1):160-178.
- Zhang X R, Zhou J, Li M M. Analysis on spatial and temporal changes of regional habitat quality based on the spatial pattern reconstruction of land use[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020,75(1):160-178.
- [24] 杨述河,闫海利,郭丽英.北方农牧交错带土地利用变化及其生态环境效应:以陕北榆林市为例[J].*地理科学进展*,2004,23(6):49-55.
- Yang S H, Yan H L, Guo L Y. The land use change and its eco-environmental effects in transitional agro-pastoral region: A case study of Yulin City in Northern Shanxi province[J]. *Progress in Geography*, 2004,23(6):49-55.
- [25] Sang L, Zhang C, Yang J, et al. Simulation of land use spatial pattern of towns and villages based on CA-Markov model[J]. *Elsevier Science Publishers B V*, 2011,54(3):938-943.
- [26] Wang Q H, Kalantar-Zadeh K, Kis A, et al. Electronics and optoelectronics of two-dimensional transition metal dichalcogenides [J]. *Nature nanotechnology*, 2012,7(11):699-712.
- [27] Sudhira H S, Ramachandra T V, Jagadish K S. Urban sprawl: metrics, dynamics and modelling using GIS[J]. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 2004,5(1):29-39.
- [28] Oliver M A, Webster R. A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging [J]. *Catena*, 2014,113(2):56-69.
- [29] 吕霜霜.三峡库区土地利用变化及生态服务价值研究[D].重庆:西南大学,2019.
- Lv S S. Study on land use change and ecological service value in the Three gorges reservoir area [D]. Chongqing:Southwest University, 2019.
- [30] 金贵,郭柏枢,成金华,等.基于资源效率的国土空间布局及支撑体系框架[J].*地理学报*,2022,77(3):534-546.
- Jin G, Guo B S, Cheng J H, et al. Layout optimization and support system of territorial space: An analysis framework based on resource efficiency[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022,77(3):534-546.

(上接第 362 页)

- [26] 徐建华.计量地理学[M].2 版.北京:高等教育出版社,2014.
- Xu J H. Quantitative geography[M]. Second Edition. Beijing: Higher Education Press, 2014.
- [27] Kengdall M G. Rank correlation methods[M]. England: Hafner. Oxford, 1955:1-8.
- [28] 成方妍,刘世梁,张月秋,等.基于 MODIS 序列的北京市土地利用变化对净初级生产力的影响[J].*生态学报*,2017,37(18):5924-5934.
- Chen F Y, Liu S L, Zhang Y Q, et al. Effects of land-use change on net primary productivity in Beijing based on the MODIS series[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017,37(18):5924-5934.
- [29] 董欣,刘鹏程.基于 GEE 的土地利用变化对生态系统服务价值的影响研究:以京津冀地区为例[J].*华中师范大学学报:自然科学版*,2020,54(4):670-678.
- Dong X, Liu P C. Impacts study of GEE-based land use changes on Ecosystem Service Value (ESV): take the Beijing-Tianjin-Hebei Region as an example [J]. *Journal of Central China Normal University: Natural Sciences*, 2020,54(4):670-678.