

自然—社会经济因素驱动下江西省生境质量的 时空演变与主控因子

张紫薇¹, 张紫怡^{1,2}, 张立亭^{1,2}

(1.东华理工大学 测绘与空间信息工程学院, 江西 南昌 330013;

2.东华理工大学 自然资源部 环鄱阳湖区域矿山环境监测与治理重点实验室, 江西 南昌 330013)

摘要: [目的] 基于江西省 2000—2020 年 5 期土地利用数据, 分析生境质量时空演变特征和研究区域生境质量变化的主要因素, 以为江西省土地利用规划及区域生态系统服务优化提供参考。[方法] 使用 InVEST 栖息地质量评估模型对江西省生境质量水平进行空间测度, 利用全局 Moran's I 指数分析生境质量时空关联性, 并运用地理探测器模型捕捉影响生境质量的主导因子。[结果] ① 2000—2020 年, 江西省生境质量整体处于较高水平, 但呈现缓慢下降趋势。② 江西省生境质量具有较高空间正相关性, 空间分布差异性逐渐增强。③ 自然—社会经济驱动体系中, 土地利用类型因子中林地所占比例是影响生境质量的主控因子, 各驱动因子间交互作用均为非线性增强, 其中距建设用地距离和耕地比例两者交互作用最大。[结论] 江西省生境质量整体水平较高, 空间分布差异明显, 生境质量水平主要受土地利用类型的影响。

关键词: 生境质量; InVEST 模型; 空间自相关; 地理探测器; 江西省

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)01-0303-11

中图分类号: X826

文献参数: 张紫薇, 张紫怡, 张立亭. 自然—社会经济因素驱动下江西省生境质量的时空演变与主控因子[J]. 水土保持通报, 2024, 44(1): 303-313. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.01.030; Zhang Ziwei, Zhang Ziyi, Zhang Liting. Spatio-temporal evolution and main natural socio-economic factors affecting habitat quality in Jiangxi Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(1): 303-313.

Spatio-temporal Evolution and Main Natural Socio-economic Factors Affecting Habitat Quality in Jiangxi Province

Zhang Ziwei¹, Zhang Ziyi^{1,2}, Zhang Liting^{1,2}

(1. School of Surveying and Geoinformation Engineering, East China University of Technology,

Nanchang, Jiangxi 330013, China; 2. Key Laboratory of Mine Environmental Monitoring and Improving Around Poyang Lake of Ministry of Natural Resources, East China University of Technology, Nanchang, Jiangxi 330013, China)

Abstract: [Objective] Based on the land use data of five periods in Jiangxi Province from 2000 to 2020, the spatial and temporal evolution characteristics of habitat quality and the main factors of regional habitat quality change were studied, in order to provide references for land use planning and regional ecosystem service optimization in Jiangxi Province. [Methods] The InVEST habitat quality assessment model was used to measure the spatial habitat quality level in Jiangxi Province. The global Moran's I index was used to analyze the spatiotemporal correlation of habitat quality. The Geodetector model was used to capture the dominant factors affecting habitat quality. [Results] ① From 2000 to 2020, the overall habitat quality in Jiangxi Province was at a relatively high level, but showed a slow downward trend. ② The habitat quality in Jiangxi Province had a high spatial positive correlation, and the spatial distribution differences gradually increased. ③ In the natural socio-economic driving system, the proportion of forest land in land use type factors was the main controlling factor affecting habitat quality. The interactions between each driving factor were nonlinear enhancements, with the greatest interaction observed between the distance from construction

收稿日期: 2023-05-11

修回日期: 2023-07-18

资助项目: 江西省自然科学基金青年基金项目“生态系统服务的‘空间非平稳性—非线性’驱动机制和优化调控研究”(20224BAB213037); 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ2200745); 江西省哲学社会科学基地、江西省软科学培育基地联合项目(22SJDJC02); 东华理工大学博士启动资助项目(DHBK2022001)

第一作者: 张紫薇(1999—), 女(汉族), 河南省洛阳市人, 硕士研究生, 研究方向为土地利用与生态效应。Email: 280356871@qq.com。

通信作者: 张紫怡(1996—), 女(汉族), 湖北省黄冈市人, 博士, 讲师, 主要从事土地资源可持续利用与管理研究。Email: zhangziyi_violet@163.com。

land and the proportion of cultivated land. [Conclusion] The overall habitat quality level in Jiangxi Province was relatively high, with significant spatial distribution differences. Habitat quality level was mainly influenced by land use types.

Keywords: habitat quality; InVEST model; spatial autocorrelation; Geodetector; Jiangxi Province

随着社会经济的发展,城镇化进程快速推进,土地利用格局发生显著变化,人造景观的增加破坏了生物多样性,生态环境受到影响,出现不同程度的退化^[1]。生境质量是生态系统为个体或种群持续提供适应性条件及生存条件的能力,能够在一定程度上反映该地的生物多样性水平^[2-3],它已经成为区域生物多样性和生态系统功能和服务的重要指标^[4],生境质量的高低是衡量地区生态健康水平的关键因子^[5-6]。探究生境质量的时空演变特征及驱动机制,有助于政府制定科学的发展对策,对实现生物多样性的有效保护和生态系统的稳定发展具有重要意义^[7-8]。

目前,评估生境质量主要是通过生态评估模型^[9-10]进行研究,主要有 InVEST 模型^[11]、maxENT 模型^[12]及 SolVES 模型^[13]等。与其他模型对比,InVEST模型将各地类与威胁源相联系,依据各用地类型对威胁源的敏感程度对区域生境质量及生境退化的分布情况进行评估,因操作简单、评估精度高、空间分析能力强等特点^[14-16],在国内外得到广泛的应用。明确生境质量变化受什么因素影响以及影响程度如何,是当前研究的热点问题。通过文献梳理可知,人类活动对区域生态系统有较大影响,如快速的城镇化导致生境退化,给区域可持续带来极大挑战^[17-19],同时如退耕还林还草、造林种草等工程的实施,提高了生态系统的恢复能力^[20],自然环境地形对地表的物质的迁移与能量的转换也具有显著影响^[21]。针对生境质量时空演变驱动机制的研究一般采用传统的回归方法和空间分析方法,如最小二乘法和地理加权回归法,但在探究多个驱动因素交互作用方面较薄弱,而地理探测器模型在识别生境质量时空演变的驱动因素间的交互作用有独特的优势^[22]。郑贱成等^[23]基于 InVEST 模型分析粤港澳大湾区的生境质量变化特征,借助地理探测器分析不同地形梯度下影响生境质量变化的主导因子。周德志等^[24]运用 InVEST 模型评估近 30 a 陕北地区生境质量时空变化特征,通过地理探测器分析知土地利用因素是影响陕北地区生境质量变化的主要因子。现有研究多集中对流域及城市等小尺度区域的生境质量影响因子的探讨,缺乏对省域层面以及长江中下游地区生境质量的研究,特别是对其影响机制的研究有待深入。

鉴于此,在结合前人研究的基础上,本文以江西省 1 000 m×1 000 m 格网为研究单元,共计 169 153 个,

基于 2000,2005,2010,2015,2020 年 5 期土地利用数据,运用 InVEST 模型生境质量模块分析生境质量时空演变特征,通过全局莫兰指数分析生境质量的空间自相关特征,并结合地理探测器模型在“自然—社会经济”(人类活动、土地利用类型、气候及生境特征 4 个维度)条件下分析影响研究区域生境质量变化的主要因素,以期为江西省土地利用规划及区域生态系统服务优化提供参考。

1 研究区概况

江西省(24°29′—30°04′N,113°34′—118°25′E)位于中国东南部,长江中下游南岸(图 1),全省共辖 100 个县(市、区),土地总面积约 $16.69\times10^4\text{ km}^2$,总人口 4.52×10^7 。地貌以山地和丘陵为主,该地属亚热带温暖湿润季风气候,四季分明,气候宜人。年平均温度 16.3~25℃,自北向南递增。年降水量 1 341~1 943 mm,雨量充沛,适宜农作物生长。江西省自然资源十分丰富,森林覆盖率位居全国第二,达到 63.1%,是中国“最绿”的省份之一,境内约 6 337 种高等植物,植被类型以常绿阔叶林为主,拥有 11 个国家级森林生态系统自然保护区,27 个省级保护区,生物多样性较好。

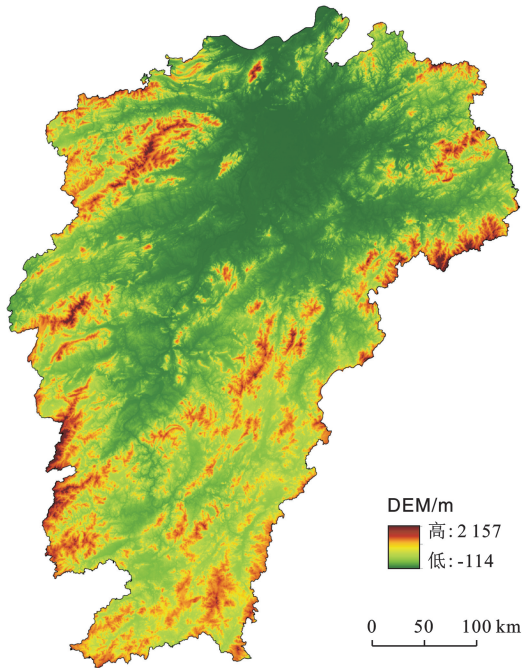


图 1 江西省地形图

Fig.1 Topographic map of Jiangxi Province

2 数据及来源与方法

2.1 数据来源

本研究所使用数据类型有栅格数据和矢量数据。其中栅格数据包括：2000, 2005, 2010, 2015, 2020 年 5 期 30 m×30 m 分辨率的土地利用/土地覆盖图, 1 000 m×1 000 m 分辨率的中国植被类型图, 1 000 m×1 000 m 分辨率的中国人口空间分布格网数据集,

均来源于中国科学院资源环境科学与数据中心; 1 000 m×1 000 m 分辨率气温、降水及日照时数来源于国家地球系统科学数据中心。矢量数据包括江西省行政区划, 来源于中国科学院资源环境科学与数据中心; 全国铁路数据集来源于资源学科创新平台。所有非空间数据都进行空间化处理, 分辨率统一为 1000 m×1000 m 格网, 使用 Krasovsky_1940_Albers 坐标系统。具体数据如表 1 所示。

表 1 生境质量潜在影响因子
Table 1 Potential impact factors on habitat quality

选择维度	潜在影响因子		单位	数据来源
人类活动	x_1	人口密度	人/km ²	中国科学院资源环境科学与数据中心 (https://www.resdc.cn)
	x_2	距建设用地距离	km	
	x_3	距道路距离	km	
	x_4	距铁路距离	km	
土地利用类型	x_5	耕地所占比例	%	中国科学院资源环境科学与数据中心 (https://www.resdc.cn)
	x_6	林地所占比例	%	
	x_7	草地所占比例	%	
	x_8	水域所占比例	%	
	x_9	建设用地所占比例	%	
气候	x_{10}	年均气温	℃	国家地球系统科学数据中心 (https://www.geodata.cn)
	x_{11}	年总降水量	mm	
	x_{12}	年日照辐射量	MJ/m ²	
生境特征	x_{13}	植被指数		中国科学院资源环境科学与数据中心 (https://www.resdc.cn)
	x_{14}	距水域距离	km	

2.2 生境质量空间量化

采用 InVEST 模型的 Habitat Quality 模块对生境质量进行空间量化, 该模块是通过结合景观类型敏感度和相关威胁因素来计算研究区的生境质量指数及其空间分布情况, 有助于对生境保护需求提供初步评估^[11]。生境质量的高低可映射出生物多样性的丰富程度, 生境质量值高的区域生物多样性更丰富, 生态服务能力更高。根据研究区的实际情况结合当前的研究成果^[25], 定义人类活动较强的耕地(包括旱地和水田)、城镇用地、农村居民点及其他建设用地(包括道路、工矿等)为威胁因子。详细数据见表 2 与表 3。其公式为:

$$Q_{xj} = H_j \left[1 - \frac{D_{xj}^Z}{D_{xj}^Z + K^Z} \right] \tag{1}$$

式中: Q_{xj} 为栅格 x 的生境质量; D_{xj} 是栅格 x 的生境退化度; H_j 是栅格 x 的生境适宜度; K 为半饱和系数; z 是系统固有的换算系数, 值为 2.5。

2.3 空间自相关

空间自相关分析目的是探究变量在空间上是否相关, 确定其相关程度。可采用全局或局部自相关指

数来解释变量在空间上聚合或离散的程度。本文运用 GeoDa 软件中全局 Moran's I 指数对江西省生境质量分布格局进行空间自相关分析, 探究其时空分异性。全局 Moran's I 指数值域为 $[-1, 1]$, 其中零值表示生境质量在空间呈随机分布。其公式为:

$$I = \frac{n}{S_0} \times \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (y_i - \bar{y})(y_j - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \tag{2}$$

$$S_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \tag{3}$$

式中: n 为空间单元总个数; y_i 和 y_j 为单元 i 和单元 j 的属性值; \bar{y} 为该属性在全域的平均值; w_{ij} 为空间权重矩阵中单元 i 和单元 j 的空间权重值, 空间权重矩阵可采用标准化邻接矩阵或二元临近矩阵。

表 2 威胁因子的最大影响距离及权重
Table 2 Maximum impact distance and weights of threat factors

威胁因子	最大影响距离	权重	衰退类型
耕 地	4	0.59	线性衰退
城镇用地	9	0.94	指数衰退
农村居民点	6	0.85	指数衰退
其他建设用地	10	1.00	指数衰退

表 3 各土地利用类型生境适宜度及对威胁因子的敏感度

Table 3 Habitat suitability and sensitivity to threat factors for various land use types					
土地利用类型	生境适宜性	耕地	城镇用地	农村居民点	其他建设用地
水田	0.53	0.00	0.62	0.78	0.69
旱地	0.51	0.00	0.62	0.78	0.69
有林地	1.00	0.56	0.73	0.65	0.80
灌木林	0.82	0.56	0.73	0.65	0.80
疏林地	0.73	0.56	0.73	0.65	0.80
其他林地	0.72	0.56	0.73	0.65	0.80
高覆盖草地	0.79	0.54	0.71	0.63	0.76
中覆盖草地	0.57	0.54	0.71	0.63	0.76
低覆盖草地	0.47	0.54	0.71	0.63	0.76
河渠	1.00	0.67	0.80	0.58	0.83
湖泊	1.00	0.67	0.80	0.58	0.83
水库坑塘	1.00	0.67	0.80	0.58	0.83
滩地	0.60	0.70	0.85	0.70	0.35
城镇用地	0.15	0.00	0.00	0.00	0.03
农村居民点	0.28	0.00	0.13	0.00	0.16
其他建设用地	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00
沼泽	1.00	0.65	0.78	0.65	0.80
裸土地	0.23	0.00	0.08	0.00	0.11
裸岩石地	0.21	0.00	0.06	0.00	0.09

2.4 生境质量影响因子分析

地理探测器^[26]是探测空间分异性、揭示其背后驱动因子的一种统计学方法,可揭示各驱动因子的影响力大小和显著程度,能够探测各驱动因子间交互作用强度,广泛应用于经济、环境等各领域^[27]。本研究将采用“因子探测”和“交互作用探测”模型,在自然—社会经济条件下从人类活动、土地利用类型、气候及生境特征 4 个维度来分析各因素对生境质量空间分异的影响程度以及各因子间的交互作用大小。

(1) 因子探测器。因子探测指某因子多大程度上解释了因变量的空间分异性,用 q 值表示,值域为 $[0,1]$,表达式为:

$$q=1-\frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2}=1-\frac{SSW}{SST}$$

(4)

其中, $SSW=\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2$, $SST=N \sigma^2$
式中: N_h 和 N 分别为层 h 和全区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别是层 h 和全区的 Y 值的方差; SSW (within sum of squares) 为层内方差之和; SST (total sum of squares) 为全区总方差。

(2) 交互探测器。交互探测指每两个因子之间的交互作用对因变量的解释力,分为 5 种类型:

① $q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$, 非线性减弱;

② $\min[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \max[q(X_1), q(X_2)]$, 单因子非线性减弱;

③ $q(X_1 \cap X_2) > \max[q(X_1), q(X_2)]$, 双因子增强;

④ $q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$, 相互独立;

⑤ $q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$, 非线性增强。

3 结果与分析

3.1 土地利用时空演变特征

根据江西省土地利用类型(图 2)可知各时期地类面积变化情况(表 4), 主要以林地为主, 集中分布在江西省边界的山脉及赣南丘陵地区, 草地多分布在林地周边; 其次为耕地, 主要分布在鄱阳湖平原、吉泰平原等平原地区, 未利用地集中分布在鄱阳湖西南部。其中耕地、林地与未利用地面积减少较明显, 分别减少 1 131, 1 275, 385 km², 未利用地面积变化率最大, 研究期间减少率达 42.35%, 说明 20 a 间耕地、林地与未利用地转出为其他地类较多。建设用地与水域面积则逐年增加, 水域主要分布在鄱阳湖流域, 呈现缓慢增加趋势; 而建设用地呈现爆发式增长, 研究期间增加 2 606 km², 增幅达 92.74%, 2020 年面积达到最高值。

3.2 生境质量时空演变特征

参考文献^[17]并结合研究区实际情况, 利用 ArcGIS 中自然间断点分级法将生境质量分为 4 个等级, 分别对应低质量、较低质量、较高质量和高质量(图 3), 统计了各年份生境质量指数等级所占比例(表 5)。可知, 2000, 2005, 2010, 2015 和 2020 年的平均生境质量指数分别为 0.780 4, 0.778 2, 0.771 2, 0.766 6 和 0.758 0, 高质量等级所占比例最大, 均在 45% 左右, 这是由于该区域生态资源丰富, 水域、森林等生态地类分布广泛, 整体生境质量水平较高。

从时间变化来看, 2000—2020 年, 江西省生境质量指数总体呈现小幅度下降, 各等级生境质量等级所占比例变化较小。2000—2005 年, 较高等级生境质量所占比例增加了 0.25%, 低质量等级增加了 0.29%, 总体生境质量水平变化较小。2005—2010 年, 高等级与较高等级生境质量所占比例均有所下降, 低等级与较低等级生境质量所占比例则呈现上升趋势, 该时期全域生境质量整体出现高等级水平向低等级水平转化的趋势。2010—2015 年, 高等级生境质量所占比例呈现下降趋势, 减少了 0.2%, 低等级生境质量增加了 0.44%, 低等级生境质量所占比例增加幅度较大。

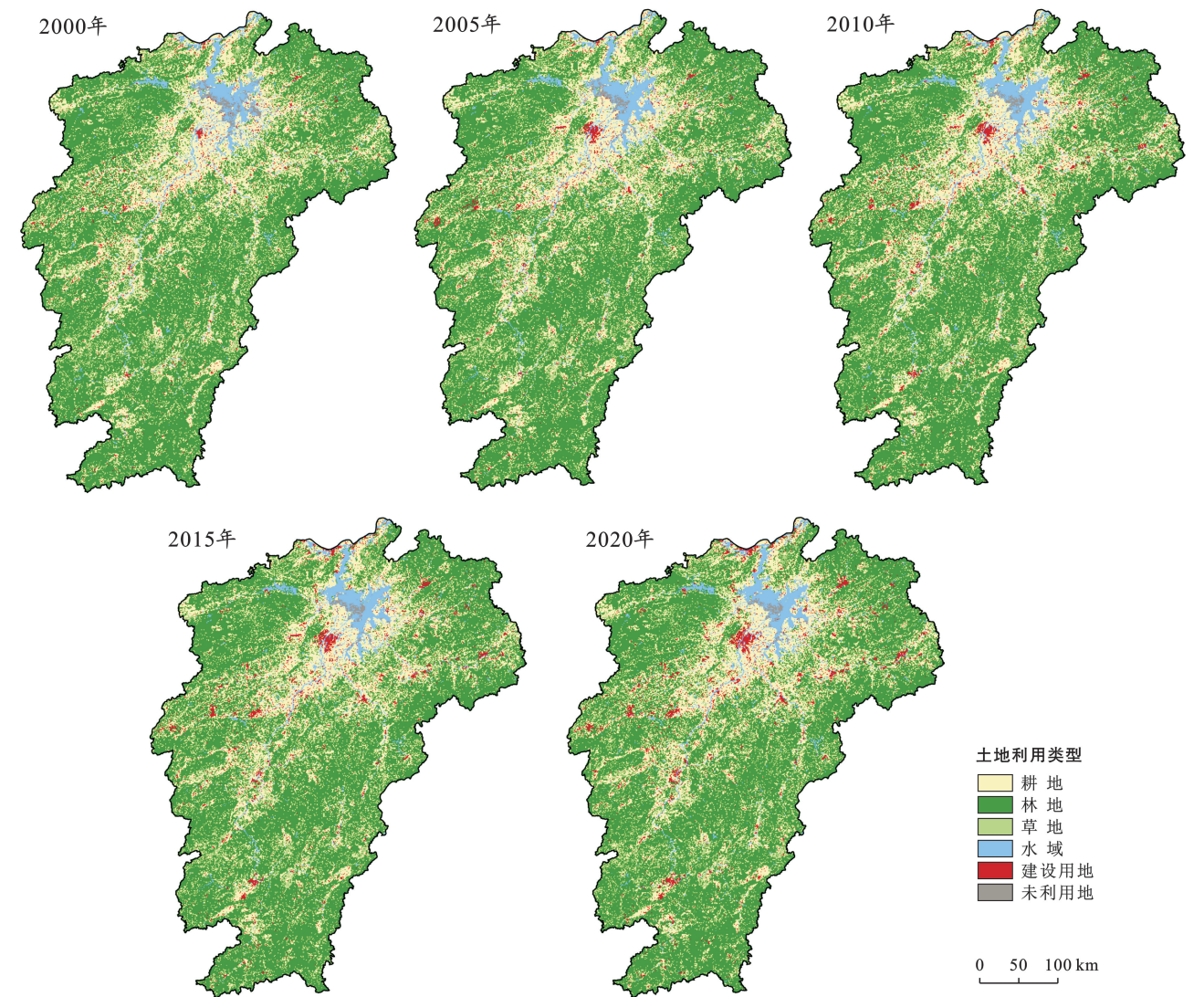


图 2 江西省 2000—2020 年土地利用类型空间分布

Fig.2 Spatial Distribution of land use types in Jiangxi Province from 2000 to 2020

表 4 2000—2020 年江西省各土地利用类型面积及变化

Table 4 Areas and change of land use types in Jiangxi Province from 2000 to 2020

土地利用类型	年 份	耕 地	林 地	草 地	水 域	建设用地	未利用地
面积/km ²	2000	45 677	105 211	7 623	6 923	2 810	909
	2005	45 363	105 343	7 389	7 133	3 300	625
	2010	45 346	104 994	7 151	7 184	3 936	542
	2015	44 929	104 867	7 042	7 205	4 575	535
	2020	44 546	103 936	7 433	7 298	5 416	524
面积占比/%	2000	27.00	62.20	4.51	4.09	1.66	0.54
	2005	26.82	62.28	4.37	4.22	1.95	0.37
	2010	26.81	62.07	4.23	4.25	2.33	0.32
	2015	26.56	62.00	4.16	4.26	2.70	0.32
	2020	26.33	61.44	4.39	4.31	3.20	0.31
变化率/%	2000—2005	−0.69	0.13	−3.07	3.03	17.44	−31.24
	2005—2010	−0.04	−0.33	−3.22	0.71	19.27	−13.28
	2010—2015	−0.92	−0.12	−1.52	0.29	16.23	−1.29
	2015—2020	−0.85	−0.89	5.55	1.29	18.38	−2.06
	2000—2020	−2.48	−1.21	−2.49	5.42	92.74	−42.35

2015—2020 年,高等级生境质量所占比例减少 1.23%,较高等级、较低等级和低等级生境质量占比均呈现增加趋势。研究区总体生境质量水平明显下降,该时期城镇化速度加快,人类活动强度增加,由于建设用地面积的增加主要来源于耕地和林地的减少,生境适宜性地类面积减少,造成生境质量水平下降。

从空间分布来看,江西省生境质量总体水平呈现

赣南高,赣中及赣北相对较低的分布特征,区域差异较显著。赣南东居武夷山脉,南邻各大山脉,全域森林、水域等资源极为丰富,交通不便,受人类活动影响较小,因此生境质量水平较高。赣中、赣北平原区域以及各市主要城区周边城市化程度较高,地势平坦,多为丘陵地貌,利于作物耕种,人类活动程度剧烈,对生境质量水平有较大影响。

表 5 江西省 2000—2020 年各等级生境质量所占比例										
Table 5 Proportion of habitat quality at different levels in Jiangxi Province from 2000 to 2020										
生境质量等级	2000 年		2005 年		2010 年		2015 年		2020 年	
	比例/%	指数平均值	比例/%	指数平均值	比例/%	指数平均值	比例/%	指数平均值	比例/%	指数平均值
低质量	1.71		2.00		2.39		2.83		3.37	
较低质量	29.92	0.780 4	29.57	0.778 2	30.75	0.771 2	30.39	0.766 6	30.97	0.758 0
较高质量	22.50		22.75		21.66		21.78		21.88	
高质量	45.87		45.68		45.20		45.00		43.77	

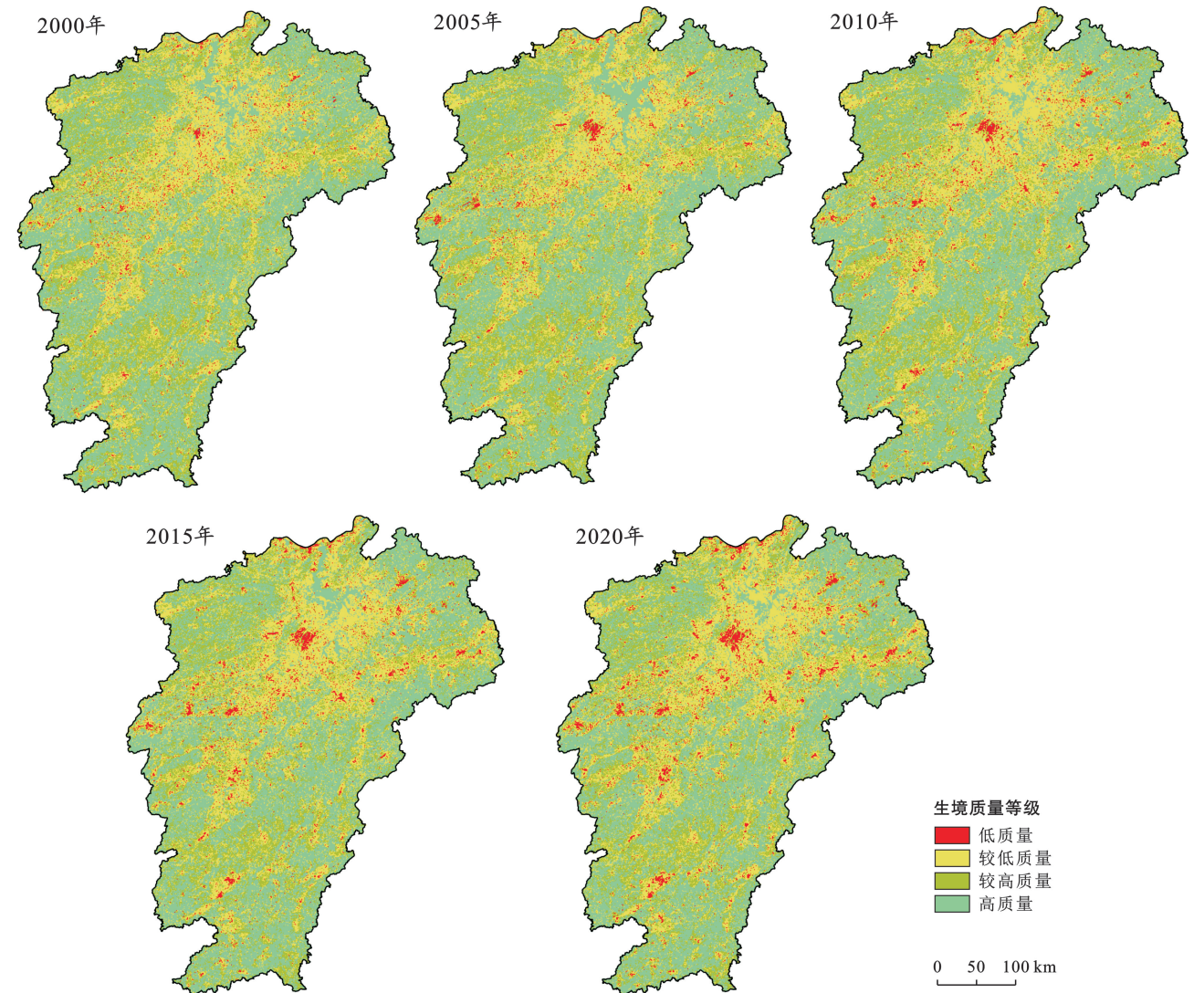


图 3 江西省 2000—2020 年生境质量空间分布

Fig.3 Spatial distribution of habitat quality in Jiangxi Province from 2000 to 2020

3.3 生境质量空间相关性

利用 ArcGIS 在研究区建立 1000 m×1000 m 的网格单元,共计 169 153 个,计算统计每个网格单元的生境质量指数值。运用 GeoDa 软件分别对 2000, 2005,2010,2015,2020 年的生境质量分布格局进行空间自相关分析,可知江西省生境质量指数全局 Moran’s *I* 指数均大于 0,分别为 0.398,0.401,0.430, 0.416,0.431,均通过了显著性检验,表明江西省生境质量具有较强的空间正相关性,空间分布上有一定的集聚性。研究期间,Moran’s *I* 指数总体呈上升趋势,表明研究区生境质量的空间集聚性逐渐上升,空间分布差异性逐渐增强。

3.4 生境质量主控因子

根据地理探测器模型计算得到各时期影响因子对生境质量的解释程度。表 6 显示了 14 个解释变量对生境质量指数的影响程度及相对重要性比例,值越大、所占比例越大,说明该解释变量对因变量的影响程度越大。整体来看,土地利用类型因子对生境质量的影响程度最大,相对重要性占比最大,约为 49.22%。综合 5 a 平均值,林地所占比例、耕地所占比例和距建设用地距离,解释力大小分别为 0.43,

0.41,0.30,单个因子相对重要性达到 18.96%,17.57%, 13.45%,影响程度明显高于其他因子,是生境质量空间分异的重要因子。其次,人类活动因子对生境质量水平也有较大影响,相对重要性占比达到 30.00%以上,其中人口密度和距建设用地距离的相对重要性普遍高于距道路、铁路距离,说明人类活动因子中一般建设用地对生态过程的影响高于人类交通活动对生态过程的影响。生境特征因子对生境质量的影响程度约为 0.20,相对重要性占比在 15.00%左右,说明植被及距水域距离对生境质量水平也有较大影响。气候因子对生境质量的影响程度最小,解释力低于 0.10,相对重要性最低,表明生境质量指数受气温、降水及年日照辐射量的影响很小。

总体来看,2000—2020 年,各驱动因子对生境质量的影响程度较稳定,自然—社会经济条件下,土地利用类型因子中耕地所占比例、林地所占比例以及人类活动因子中距建设用地距离对生境质量水平的影响最显著,气候等因子的影响程度较小,可知自然与人类活动均对江西省生境质量水平有一定程度影响,该结果可对江西省生境质量水平维护角度提供参考。

表 6 各因子对生境质量水平的影响程度
Table 6 Degree of impact of various factors on level of habitat quality

影响因子	2000 年		2005 年		2010 年		2015 年		2020 年	
	影响程度	相对重要性/%	影响程度	相对重要性/%	影响程度	相对重要性/%	影响程度	相对重要性/%	影响程度	相对重要性/%
人类活动因子		30.47		34.45		30.84		36.39		31.01
人口密度	0.24	10.61	0.23	11.79	0.27	10.87	0.25	11.67	0.28	10.71
距建设用地距离	0.28	12.55	0.28	14.28	0.31	12.61	0.34	15.71	0.31	12.11
距道路距离	0.10	4.60	0.10	5.18	0.11	4.47	0.11	5.36	0.12	4.86
距铁路距离	0.06	2.71	0.06	3.20	0.07	2.89	0.08	3.65	0.09	3.33
土地利用类型因子		49.22		50.33		49.14		49.72		46.78
耕地比例	0.43	19.20	0.38	19.18	0.43	17.56	0.36	16.98	0.38	14.94
林地比例	0.43	18.98	0.37	18.77	0.48	19.56	0.41	18.94	0.48	18.55
草地比例	0.01	0.24	0.00	0.21	0.01	0.27	0.01	0.25	0.00	0.18
水域比例	0.03	1.46	0.03	1.54	0.04	1.45	0.03	1.47	0.03	1.36
建设用地比例	0.21	9.33	0.21	10.63	0.25	10.30	0.26	12.09	0.30	11.76
气候因子		7.48		3.95		6.29		2.66		4.44
温度	0.09	3.99	0.02	0.85	0.09	3.88	0.03	1.23	0.08	2.99
降水量	0.07	3.14	0.04	2.00	0.02	0.85	0.02	0.77	0.02	0.90
年日照辐射量	0.01	0.35	0.02	1.10	0.04	1.56	0.01	0.66	0.01	0.55
生境特征因子		12.84		11.27		13.74		11.23		17.77
植被指数	0.18	7.88	0.12	5.99	0.20	8.28	0.14	6.33	0.35	13.47
距水域距离	0.11	4.96	0.10	5.29	0.13	5.46	0.10	4.89	0.11	4.30

注:黑体字表示 4 大类型因子对生境质量指数的相对重要性所占比例之和。

不同时期江西省生境质量驱动力存在差异。图 4 为各解释因子交互探测结果。由图 4 可知,各因子间交互作用均为增强,且各个时期因子间的交互作用对生境质量水平的解释力远大于单个因子的解释力,

说明生境质量的变化是由各因素相互作用形成的。
2000 年,因子 x_5 (耕地比例)和 x_6 (林地比例)交互的解释度为 0.49,表明该时期土地利用类型因子中耕地比例和林地比例是影响生境质量的主控因素。

4 讨论

通过评估江西省 2000—2020 年生境质量可知研究区生境质量整体处于较高水平,但生境质量指数呈现下降趋势。高质量生境主要分布在山区,森林覆盖率较高,低质量生境主要分布在各市城镇用地区,人类活动强度较大区域,林地生境质量水平最高,建设用地生境质量水平最低,这与同区域生境质量的研究结果较为一致^[28]。通过生境质量驱动因子分析,土地利用类型因子中林地占比及耕地占比是影响全省生境质量的主要因子,是生境质量发生变化的主要驱动力,其次是人类活动因子中距建设用地距离因子。原因在于社会经济快速发展、城市群扩张对生境质量的负面影响大于退耕还林、还湖等生态恢复措施对生境质量的正面影响。城市区域在发展经济的同时修补受损生境,提高城市生境质量水平,成为当前城市发展亟待解决的问题。对于生境质量较低区域,应合理控制建设用地的扩张,减小人类活动对生境的威胁,同时加强生态修复措施,以提升全省整体生态环境。

本研究完善了生境质量变化的驱动机制解析,增加了对生境质量的解释度,其次,在单因子解释的基础上增加了各因子间交互作用探测,弥补了常规方法在因子交互作用影响机制方面研究的不足。但本文仍存在不足之处:探究驱动机制所采用的地理探测器模型,仅从固定时间节点探测出各驱动因子对生境质量的影响程度,而现实的生态系统是多稳态非线性的复杂系统,生态过程多变,地理探测器模型无法对生境质量变化过程进行准确分析,可能会与实际情况产生误差,未来的研究会更加关注生态过程中的非线性特征。

5 结论

本文以江西省为研究对象,运用 InVEST 模型分析了研究区 20 a 的生境质量时空演变特征,利用全局 Moran's I 指数对生境质量进行全局空间自相关分析,并运用地理探测器模型探究影响生境质量变化的主要因素,得出以下结论。

(1) 2000—2020 年江西省生境质量指数均接近 0.8,生境质量水平处于较高等级,但生境质量指数总体呈现下降趋势。结合土地利用变化分析知,研究期间,随着城镇化进程加快,对生境威胁较大的建设用地面积快速增加,生境适宜性较高的林地面积减少。

(2) 江西省生境质量在空间上表现出较高相关性,随着时间推移,这种趋势更加明显。生境质量整

体呈现赣南高,赣北较低的空间分布特征。赣南、赣东北及赣西北等山脉丘陵地区森林覆盖率较高,生态资源较丰富,生境质量较好;而赣中及赣北等城区周边多为平原,地势平坦,人类活动强度大,生境质量较差。

(3) 影响江西省生境质量的主要因子是土地利用类型因子中林地占比,其次是耕地占比,表明自然—社会经济系统中土地利用类型对生境质量起主导作用。同时,任何两种因素对生境质量的空间异质交互作用都大于单个因子的作用,耕地占比和林地占比与其他因子的交互作用最显著。

[参 考 文 献]

- [1] 张海涛,李加林,田鹏,等.基于土地利用变化的东海区大陆海岸带生境质量时空演变研究[J].生态学报,2023,43(3):937-947.
Zhang Haitao, Li Jialin, Tian Peng, et al. Spatio-temporal evolution of habitat quality in the East China Sea Continental coastal zone based on land use changes [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(3):937-947.
- [2] Hall L S, Krausman P R, Morrison M L. The habitat concept and a plea for standard terminology [J]. Wildlife Society Bulletin, 1997,25(1):173-182.
- [3] Haddad N M, Brudvig L A, Clobert J, et al. Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems [J]. Science Advances, 2015,1(2):e1500052.
- [4] 黄鑫,程文仕,李晓丹,等.甘肃省生境质量变化的图谱特征[J].应用生态学报,2020,31(9):3131-3140.
Huang Xin, Cheng Wenshi, Li Xiaodan, et al. Spectral characteristics of habitat quality changes in Gansu Province [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020,31(9):3131-3140.
- [5] 傅伯杰,于丹丹,吕楠.中国生物多样性与生态系统服务评估指标体系[J].生态学报,2017,37(2):341-348.
Fu Bojie, Yu Dandan, Lv Nan. An indicator system for biodiversity and ecosystem services evaluation in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017,37(2):341-348.
- [6] 严岩,朱捷缘,吴钢,等.生态系统服务需求、供给和消费研究进展[J].生态学报,2017,37(8):2489-2496.
Yan Yan, Zhu Jieyuan, Wu Gang, et al. Review and prospective applications of demand, supply, and consumption of ecosystem services [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017,37(8):2489-2496.
- [7] 王琦琨,武玮,杨雪琪,等.陕西省生境质量时空演变及驱动机制分析[J].干旱区研究,2022,39(5):1684-1694.
Wang Qikun, Wu Wei, Yang Xueqi, et al. Spatial-temporal changes and driving factors of habitat quality in Shaanxi Province during the Past 20 years [J]. Arid Zone Research, 2022,39(5):1684-1694.

- [8] 郑云有,刘艳婷,姚鹏,等.湖南省重点生态功能区生境质量时空变化及其预测[J].水土保持通报,2022,42(4):347-356.
- Zheng Yunyou, Liu Yanting, Yao Peng, et al. Spatial and temporal changes and prediction of habitat quality in key ecological function area of Hu'nan Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(4): 347-356.
- [9] He Jianhua, Huang Junlong, Li Chun. The evaluation for the impact of land use change on habitat quality: A joint contribution of cellular automata scenario simulation and habitat quality assessment model [J]. Ecological Modelling, 2017, 366: 58-67.
- [10] 汪东川,张威,王志恒,等.拉西瓦水电站建设对区域景观格局与生境质量的影响[J].水土保持学报,2021,35(3):200-205.
- Wang Dongchuan, Zhang Wei, Wang Zhiheng, et al. Impact of Laxiwa Hydropower Station construction on the regional landscape pattern and habitat quality [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(3): 200-205.
- [11] 赵晓同,王建,苏军德,等.基于 InVEST 模型和莫兰指数的甘肃省生境质量与退化度评估[J].农业工程学报,2020,36(18):301-308.
- Zhao Xiaojiong, Wang Jian, Su Junde, et al. Assessment of habitat quality and degradation degree based on InVEST model and Moran index in Gansu Province, China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(18): 301-308.
- [12] 吴庆明,王磊,朱瑞萍,等.基于 MAXENT 模型的丹顶鹤营巢生境适宜性分析:以扎龙保护区为例[J].生态学报,2016,36(12):3758-3764.
- Wu Qingming, Wang Lei, Zhu Ruiping, et al. Nesting habitat suitability analysis of red-crowned crane in Zhalong Nature Reserve based on MAXENT modeling [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(12): 3758-3764.
- [13] 王玉,傅碧天,吕永鹏,等.基于 SolVES 模型的生态系统服务社会价值评估:以吴淞炮台湾湿地森林公园为例[J].应用生态学报,2016,27(6):1767-1774.
- Wang Yu, Fu Bitian, Lv Yongpeng, et al. Assessment of the social values of ecosystem services based on the SolVES model: A case study of Wusong Paotaiwan Wetland Forest Park, Shanghai [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(6): 1767-1774.
- [14] 黄从红,杨军,张文娟.生态系统服务功能评估模型研究进展[J].生态学杂志,2013,32(12):3360-3367.
- Huang Conghong, Yang Jun, Zhang Wenjuan. Development of ecosystem services evaluation models: research progress [J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(12): 3360-3367.
- [15] Stoll S, Frenzel M, Burkhard B, et al. Assessment of ecosystem integrity and service gradients across Europe using the LTER Europe network [J]. Ecological Modelling, 2015, 295: 75-87.
- [16] Wong C P, Jiang Bo, Kinzig A P, et al. Linking ecosystem characteristics to final ecosystem services for public policy [J]. Ecology Letters, 2015, 18(1): 108-118.
- [17] 陈竹安,刘子强,张立亭,等.南昌市 LUCC 多情景模拟和生境质量时空演变与预测[J].农业机械学报,2023,54(5):170-180.
- Chen Zhuan, Liu Ziqiang, Zhang Liting, et al. Multi-scenario simulation of LUCC and spatial-temporal evolution and prediction of habitat quality in Nanchang City [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 170-180.
- [18] Zhang Ziyi, Liu Yanfang, Wang Yiheng, et al. What factors affect the synergy and tradeoff between ecosystem services, and how, from a geospatial perspective? [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 257: 120454.
- [19] 周婷,陈万旭,李江风,等.神农架林区人类活动与生境质量的空间关系[J].生态学报,2021,41(15):6134-6145.
- Zhou Ting, Chen Wanxu, Li Jiangfeng, et al. Spatial relationship between human activities and habitat quality in Shennongjia forest region from 1995 to 2015 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(15): 6134-6145.
- [20] 王燕,高吉喜,金宇,等.基于 2005—2015 年土地利用变化和 InVEST 模型的内蒙古巴林右旗农牧交错带生境质量研究[J].生态与农村环境学报,2020,36(5):654-662.
- Wang Yan, Gao Jixi, Jin Yu, et al. Habitat quality of farming-pastoral ecotone in Bairin Right Banner, Inner Mongolia based on land use change and InVEST model from 2005 to 2015 [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2020, 36(5): 654-662.
- [21] 郭洪峰,许月卿,吴艳芳.基于地形梯度的土地利用格局与时空变化分析:以北京市平谷区为例[J].经济地理,2013,33(1):160-166,186.
- Guo Hongfeng, Xu Yueqing, Wu Yanfang. Analysis of the land use pattern and spatio-temporal changes based on Terrain Gradient: A case study of Pinggu District in Beijing [J]. Economic Geography, 2013, 33(1): 160-166, 186.
- [22] 陈实,金云翔,黄银兰.长三角中心区生境质量时空变化及其影响机制[J].生态学杂志,2023,42(5):1175-1185.
- Chen Shi, Jin Yunxiang, Huang Yinlan. Spatio-temporal variations of habitat quality and its underlying

Mechanism in the Central Region of Yangtze River Delta [J]. Chinese Journal of Ecology, 2023,42(5):1175-1185.

[23] 郑贱成,谢炳庚,游细斌.1980—2020 年粤港澳大湾区生境质量变化特征[J].经济地理,2022,42(8):41-50.
Zheng Jiancheng, Xie Binggeng, You Xibin. Evolution of habitat quality and its influencing factors in the different terrain gradient of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay area from 1980 to 2020 [J]. Economic Geography, 2022,42(8):41-50.

[24] 周德志,关颖慧,张冰彬,等.基于土地利用变化的陕北地区生境质量时空演变及其驱动因素[J].北京林业大学学报,2022,44(6):85-95.
Zhou Dezhi, Guan Yinghui, Zhang Bingbin, et al. Spatial-temporal evolution of habitat quality in Northern Shaanxi Province of Northwestern China based on land use change and its driving factors [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022,44(6): 85-95.

[25] 张紫怡,刘艳芳,张扬,等.生态系统服务协同权衡对影响因子的空间响应:以福建省生态功能区为例[J].武汉大学学报(信息科学版),2022,47(1):111-125.
Zhang Ziyi, Liu Yanfang, Zhang Yang, et al. Spatial non-staionary response of the ecosystem services synergy and tradeoff to influencing factors: A case study of ecological function area in Fujian Province [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022,47(1):111-125.

[26] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetectors: Principle and prospective [J]. Journal of Geography, 2017, 72 (1):116-134.

[27] Zhang Xue, Liao Lingyun, Xu Zhengduo, et al. Interactive effects on habitat quality using InVEST and Geo-Detector models in Wenzhou, China [J]. Land, 2022, 11(5):630.

[28] 傅春,王乐志,邓俊鹏,等.不同影响因素对鄱阳湖流域生境质量变化特征分析[J].中国农村水利水电,2021, 11:1-8,23.
Fu Chun, Wang Lezhi, Deng Junpeng, et al. An analysis of the characteristics of habitat quality change in Poyang Lake basin by different influencing factors [J]. China Rural Water and Hydropower, 2021,11:1-8,23.

~~~~~

(上接第 302 页)

[31] 刘艳芳,安睿,曲胜秋,等.福建省耕地生态安全评价及障碍因子分析[J].中国农业资源与区划,2022,43(11): 121-132.  
Liu Yanfang, An Rui, Qu Shengqiu, et al. Ecological security evaluation and obstacle factor diagnosis of the cultivated land in Fujian Province [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2022,43(11):121-132.

[32] 黄曦.近 20 年福建省耕地承压分析与区划[J].中国农业资源与区划,2021,42(5):108-113.  
Huang Xi. Analysis and regional division of cultivated land pressure of Fujian Province in the recent twenty years [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2021,42(5):108-113.

[33] 吕火明,赵颖文,刘宗敏,等.四川省粮食生产时空演变特征及其影响因素:基于 90 个粮食生产重点县视角[J].西南农业学报,2022,35(9):2220-2228.  
Lyu Huoming, Zhao Yingwen, Liu Zongmin, et al. Spatial and temporal evolution characteristics of food production in Sichuan Province and its influencing factors: From the perspective of 90 key food production counties [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2022,35(9):2220-2228.

[34] 陈浮,刘俊娜,常媛媛,等.中国耕地非粮化空间格局分异及驱动机制[J].中国土地科学,2021,35(9):33-43.  
Chen Fu, Liu Junna, Chang Yuanyuan, et al. Spatial pattern differentiation of non-grain cultivated land and its driving factors in China [J]. China Land Science, 2021,35(9):33-43.

[35] 陈志文.福建省改革开放 40 年经济发展战略回顾[J].改革与开放,2019(1):4-7.  
Chen Zhiwen. Review of Fujian Province's economic development strategy in the 40 years of reform and opening up [J]. Reform & Openning, 2019(1):4-7.