

“三生空间”视角下万州区景观生态安全评价及其耦合特征分析

刘顺鑫, 黄云

(西南大学 资源环境学院, 重庆 400715)

摘要:为了探究典型生态脆弱区的景观生态安全格局变化规律,以万州区为例,从三生空间视角出发,综合运用景观生态学、地统计学和耦合协调模型,系统分析了万州区 2009—2018 年景观生态安全时空变化特征和耦合协调特征。结果表明:(1) 2009—2018 年,万州区以林地生态空间为主,城镇生活空间迅速扩张,农业生产空间缩减较多,土地利用程度提高;(2) 万州区景观生态安全整体处于较高水平,呈现中部高、东北—西南低的空间分布特征,安全区集中分布在城镇中心,呈明显的“L”型分布,不安全区主要沿长江流域分布;(3) 万州区景观生态安全存在较强的空间正相关关系,“高一高”聚集区主要分布于城镇中心,“低—低”聚集区集中分布于甘宁镇、响水镇和龙沙镇;最佳拟合模型为高斯模型和线性模型;(4) 万州区“三生空间”景观生态安全的耦合协调度水平不高,整体上呈现“中部高,四周低”的空间分布特征,河流地区的景观生态安全在“生活—生态”空间上还未实现同步发展,城镇中心的景观生态安全在“生产—生态”空间上也处于失衡发展阶段。因此,优化布局各类土地利用类型,控制城镇生活用地的有序扩张,提高生态用地的稳定性和抗干扰性,促进三生空间生态安全的协调发展,对于万州区未来的生态建设和可持续发展具有重要意义。

关键词:三生空间; 景观生态安全; 耦合协调分析; 万州区

中图分类号: X826

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2020)06-0308-09

Evaluation and Coupling Coordination Analysis of Landscape Ecological Security of Wanzhou District from the Perspective of Production-Life-Ecological Space

LIU Shunxin, HUANG Yun

(School of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: In order to explore the changes in the landscape ecological security pattern of typical ecologically fragile areas, taking Wanzhou District as an example, we used landscape ecology, geostatistics and coupling coordination model to systematically analyze the temporal and spatial change characteristics and coupling coordination characteristics of landscape ecological security in Wanzhou District from 2009 to 2018 from the perspective of production-life-ecology. The results show that: (1) from 2009 to 2018, the ecological space of forest land dominated Wanzhou District with the rapid expansion of urban living space, a large reduction of agricultural production space, and a higher degree of land use; (2) the overall landscape ecological security in Wanzhou District was at a high level with a high spatial distribution in the central part and a low spatial distribution in the northeast to the southwest; the safe area concentrated in the town center with an obvious L-shaped distribution; the disturbed area mainly distributed along the Yangtze River Basin; (3) there is a strong positive spatial correlation between the landscape ecological security in Wanzhou District; the ‘high—high’ cluster area mainly distributed in the town center, while the ‘low—low’ cluster area mainly distributed in Ganning Town, Xiangshui Town and Longsha Town; the best fitting models are gaussian model and linear model; (4) the level of coupling and coordination of the landscape ecological security of the ‘production-life-ecological space’ in the study area was not high, and the overall spatial distribution characteristics

收稿日期: 2020-01-05

修回日期: 2020-01-14

资助项目: 国家自然科学基金重点项目(41530855); 教育部人文规划基金(15XJA790002)

第一作者: 刘顺鑫(1995—), 女, 四川宜宾人, 硕士研究生, 研究方向为土地资源利用与规划。E-mail: 1023688451@qq.com

通信作者: 黄云(1962—), 女, 四川宜宾人, 教授, 主要从事农业资源区域开发研究。E-mail: huangyun1622@126.com

presented the high level in the middle and the low level in the surroundings; landscape ecological security in river regions had not yet achieved synchronous development in the ‘life-ecological’ space, and the landscape ecological security in the town center was also in the unbalanced development stage in the ‘production-ecology’ space. Therefore, it is of great significance for the future ecological construction and sustainable development of Wanzhou District to optimize the layout of various land use types, control the orderly expansion of urban living land, improve the stability and anti-interference of ecological land, and promote the coordinated development of production-life-ecological space ecological security.

Keywords: production-life-ecological space; landscape ecological security; coupling coordination analysis; Wanzhou District

生态安全是指区域生存和发展所需的生态环境处于不受或少受破坏与威胁的状态^[1],是评估生态系统健康性的重要指标之一。景观是人类活动在资源开发和环境改造利用过程中的主要对象,是评估生态环境影响的研究尺度^[2]。近年来,随着景观生态学的发展,一些学者从景观尺度出发,通过研究景观格局的变化及演替规律来获知地区生态空间结构的变化特点,并以此为基础对地区的生态安全进行定量的综合评估^[3],不少学者取得了积极的探索^[4-6],景观生态学逐渐成为区域生态安全研究的重要方法之一。土地利用/覆被变化是全球环境变化的重要组成部分,在人类活动占优的景观内,土地利用的方式和强度的变化将会对生态产生区域性和累积性影响^[7]。根据土地利用主导功能划分国土空间,促进形成生产空间集约高效、生活空间宜居适度、生态空间山清水秀的国土空间格局,将会有效地降低区域生态风险,稳定区域生态环境系统。但当前对于三生空间的研究探讨还处于初步阶段,基于“三生”视角将三生空间理念与区域生态安全进行耦合协调分析的研究还较为缺乏。

目前,生态安全已逐渐被视为与国防安全、经济安全以及粮食安全同等重要的第四大安全体系,是国家安全的重要组成部分,是实现可持续发展的关键^[8]。生态安全的研究起源于 20 世纪 90 年代,早期研究内容只是对生态安全的概念和理论基础进行简单介绍^[6],随着景观生态学的发展与应用,景观生态安全研究取得众多成果。其中,研究对象主要包括河流流域、湖泊、城镇、海岛、海岸带等^[9-11],研究尺度以栅格、行政单元、经济带等为主,研究指标多用破碎度、优势度、分离度、分维数、多样性等^[12],研究内容包括生态安全评价、生态安全格局、生态安全影响因素等,研究方法包括 GIS 空间建模和多种空间分析。总的来说,景观生态安全研究正在由简单的理论研究、动态变化向深层次的结构优化、空间关系转变。

三峡库区是指受长江三峡工程影响导致淹没的地区,并有移民任务的 20 个县(市),区内受水位变化

的影响,表现出不稳定状态,是典型的生态脆弱带^[13]。万州区地处三峡库区核心地带,承载着三峡库区环境保护和移民安稳致富的双重使命^[14]。近 10 年来,随着城镇化和工业化的快速发展,土地利用结构发生显著变化,给原本就脆弱的生态环境造成了重大影响。基于此,本研究以三峡库区万州区为研究对象,利用 ArcGIS, GS+, Fragstats, Geoda 等软件,从“三生空间”视角出发,运用景观生态学、地统计学原理与方法,通过景观生态安全指数计算及空间自相关分析,对万州区景观生态安全进行定量评价,并引入耦合协调度模型,对万州区三生空间的景观生态安全进行耦合协调分析,以期揭示万州区生态安全变化规律和时空分布特征,为万州区土地资源利用及生态建设提供科学依据和决策支持。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

万州区位于长江上游地区,地处三峡库区腹心,是成渝城市群沿江城市带区域中心城市,重庆市第二大城市,地处东经 107°52′22″—108°53′25″,北纬 30°24′25″—31°14′58″,区域总面积达 3 457 km²,下辖 12 个乡、29 个镇、11 条街道,具有山城和江城双重特色。境内地形复杂,地貌类型众多,以低山、丘陵为主,地势东西高、中部低,整个区域平均海拔达到 907 m,最高海拔 1 762 m(图 1)。区内河流众多,共有 46 条,纵横分布,高低悬殊,落差大,且呈枝状分布,均属长江水系,长江过境长度达 83.4 km。由于受三峡库区蓄水的影响,万州区土壤侵蚀和水土流失问题严重,消落带面积日益增大,是典型的生态环境脆弱区,景观生态安全受到社会各界的广泛关注。

1.2 数据来源及处理

研究涉及数据主要包括 2009 年、2013 年和 2018 年万州区土地利用现状数据和 DEM 数据,其中,DEM 数据来源于地理空间数据云平台,空间分辨率为 30 m;土地利用现状数据来源于万州区土地利用

变更数据库。本研究根据最新《土地利用现状分类》(GB/T21010—2017)与研究区土地利用特点,参考陈仙春^[15]、张红旗^[16]等关于“三生空间”的研究,以土地利用主导功能为依据,将土地利用分类系统分为 9 个二级土地利用空间,分别是农业生产空间、工矿生产空间、城镇生活空间、农村生活空间、其他生活空间、林地生态空间、牧草生态空间、水域生态空间和其他生态空间(表 1)。

1.3 研究方法

1.3.1 评价单元划分 为了将景观生态安全指数进行可视化表达,从空间上更直观地分析万州区生态安全值的变化情况,借鉴已有研究和研究区实际情况,利用 ArcGIS 10.6 中的渔网工具,根据景观斑块平均面积的 2~5 倍进行等间距系统采样,划分成 2 km × 2 km 的单

元网格即评价单元,共得到 957 个评价单元。利用 Fragstats 4.2 软件分别计算每一评价单元的生态安全指数,以此作为评价单元中心点的生态安全水平。

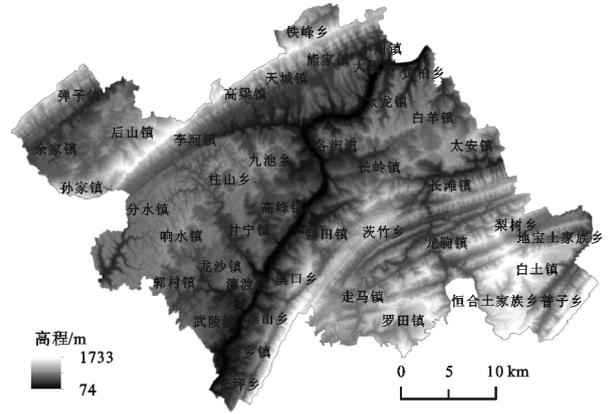


图 1 万州区高程

表 1 土地利用主导功能分类

| 一级地类 | 二级地类 | 三级分类 |
|------|--------|--|
| 生产空间 | 农业生产空间 | 011(水田)013(旱地)021(果园)022(茶园)023(其他园地)122(设施农用地)118(水工建筑用地) |
| | 工矿生产空间 | 061(工业用地)062(采矿用地)063(仓储用地) |
| | 城镇生活空间 | 071(城镇住宅用地) |
| 生活空间 | 农村生活空间 | 072(农村宅基地) |
| | 其他生活空间 | 088(风景名胜设施用地)09(特殊用地)10(交通设施用地) |
| | 林地生态空间 | 031(有林地)032(灌木林地)033(其他林地) |
| 生态空间 | 牧草生态空间 | 041(天然牧草地)043(其他草地) |
| | 水域生态空间 | 111(河流水面)112(湖泊水面)113(水库水面)114(坑塘水面)116(内陆滩涂) |
| | 其他生态空间 | 121(空闲地)123(田坎)126(沙地)127(裸地) |

1.3.2 景观生态安全评价模型构建 景观格局反映了人类对自然生态系统的影响方式和程度,是揭示区域生态系统状况及空间变异的有效手段^[17],景观格局指数则对景观格局的分布与组成进行定量化描述,其中景观干扰度指数和景观脆弱度指数常用来衡量景观生态环境的因果关系^[18]。基于此,本研究在已有研究的基础上,充分结合研究区实际情况,从景观格局出发,选取干扰度指数和脆弱度指数构建景观生态安全评价模型^[4,19],计算公式为:

$$ESI_k = \frac{\sum_{i=1}^m A_{ki}}{\sum_{i=1}^m A_k} \times (1 - 10 \times LDI_i \times LVI_i) \quad (1)$$

$$ESI_k = \frac{\sum_{i=1}^m A_{ki}}{\sum_{i=1}^m A_k} \times (1 - 10 \times LDI_i \times LVI_i)$$

$$LDI_i = aC_i + bH_i + cF_i \quad (2)$$

$$C_i = \frac{N_i}{A_i}, H_i = -M_i \ln M_i, F_i = \frac{2 \ln(P_i/4)}{\ln A_i} \quad (3)$$

式中: ESI_k 为第 k 个评价单元的景观生态安全指数; LDI_i 为景观干扰度指数; LVI_i 为景观脆弱度指数; m 为各单元内的景观类型的数量; k 为评价单元的个数; A_{ki} 为第 k 个评价单元 i 类景观类型的面积; A_k 为第 k 个评价单元的总面积; C_i 为景观破碎度; H_i

为多样性指数; F_i 为分维数; N_i 为景观类型 i 的斑块个数; A_i 为景观类型 i 的面积; P_i 为景观类型 i 的周长; M_i 为景观类型 i 占总面积的比重; a, b, c 分别是破碎度、多样性、分维数的权重, $a + b + c = 1$, 参考前人研究成果,分别赋值为 $a = 0.5, b = 0.3, c = 0.2$ 。

景观脆弱度指数的大小与生态系统对外部干扰时的抵御强度有关,抵御强度越大,则受干扰程度越小,生态脆弱度也越小,表明生态系统越稳定。根据研究区实际状况,并参考其他相关研究,采用专家打分法,将研究区各土地利用类型的脆弱性由低到高排列:城镇生活空间、农村生活空间、其他生活空间、林地生态空间、牧草地生态空间、农业生产空间、水域生态空间、工矿生产空间、其他生态空间,经归一化得到各自景观脆弱指数。

1.3.3 耦合协调度模型构建 在三生视角下,区域生态安全由 3 部分组成,即生产空间生态安全、生活空间生态安全和生态空间生态安全,各空间存在着相互影响、相互制约的耦合关系。基于此,本研究引入物理学中的耦合协调度模型,用耦合度来表示三生空间景观生态安全的相互作用水平,用协调度来表示三者间的综合协调发展情况,从而探讨三生空间景观生

态安全的耦合协调关系在不同时段上的空间分布状况和演变规律特征。计算公式如下^[20]：

$$C = \left[\frac{V_1 \times V_2 \times V_3}{(V_1 + V_2)(V_1 + V_3)(V_2 + V_3)} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

$$T = \alpha V_1 + \beta V_2 + \gamma V_3 \quad (5)$$

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (6)$$

式中： V_1, V_2, V_3 分别为生产空间、生活空间、生态空间的景观生态安全值； C 为耦合度； D 为耦合协调度； T 为区域景观生态安全综合评价值； α, β, γ 为三生空间景观生态安全对应权重。由于生产空间、生活空间和生态空间的景观生态安全同等重要，因此，取

$$\alpha = \beta = \gamma = \frac{1}{3}。$$

为了进一步分析景观生态安全在“生产—生活”空间、“生产—生态”空间、“生活—生态”空间中的两两相互作用程度，耦合协调度模型可以演化如下式所示，其中 $\alpha = \beta = \gamma = \frac{1}{2}$ ：

$$C_1 = \left[\frac{V_1 \times V_2}{(V_1 + V_2)^2} \right]^{\frac{1}{2}}, C_2 = \left[\frac{V_1 \times V_3}{(V_1 + V_3)^2} \right]^{\frac{1}{2}},$$

$$C_3 = \left[\frac{V_3 \times V_2}{(V_3 + V_2)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

$$T_1 = \alpha V_1 + \beta V_2, T_2 = \alpha V_1 + \gamma V_3, T_3 = \beta V_2 + \gamma V_3 \quad (8)$$

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (9)$$

1.3.4 地统计分析

(1) 空间自相关分析。空间自相关分析是用来检验某些空间变量在特定位置的属性值是否与邻近位置的属性值显著相关的算法，可以分为全局空间自相关与局部空间自相关^[21]。本研究利用 GeoDa 5.1 软件，选用 Moran's I 指数来表示景观生态安全值在整体上的集聚状况，选用局部空间关联指标 (LISA) 来度量某一评价单元生态安全值与周边地区生态安全值的空间集聚程度。

(2) 半变异函数分析。景观生态安全指数在空间分布上具有结构性和随机性，是一种典型的空间变量^[22]，其空间异质性可利用地统计学中的半变异函数进行度量，以此分析不同距离下景观生态安全值的变化。基于此，本研究采用 GS+ 7.0 软件进行半变异函数拟合，并建立拟合模型，通过比较选择最优拟合模型，然后借助 ArcGIS 10.6 空间分析工具进行普通克里金插值，从而实现研究区 2009—2018 年景观生态安全数值空间化。

2 结果与分析

2.1 “三生空间”土地利用类型演变

从万州区 2009 年、2013 年和 2018 年各土地利用类型面积 (表 2) 来看：2009—2018 年，万州区以林地生态空间为主，占总面积的 39% 以上，其次是农业生产空间，占总面积的 38% 以上，两者共同占总面积的 77% 左右，构成万州区的主要土地利用类型。从各地类面积增减变化来看，生活空间中除农村生活空间在不断缩小外，城镇生活空间和其他生活空间都在迅速扩张，特别是其他生活空间的面积由 2009 年的 8.48 km² 增至 2018 年的 16.26 km²，增加了 7.78 km²，增幅高达 91.76%。生产空间中农业生产空间在不断缩小，减少了 16.29 km²，工矿生产空间面积总量最少，仅有 4 km² 左右，从 2009—2018 年面积有小幅增加，共增加了 0.6 km²，增幅达 13.68% 左右。生态空间各地类面积均在减少，其中水域生态空间减少的最多，减少了 2.82 km²，林地生态空间面积呈现先减后增的趋势，牧草地生态空间则是先增后减的趋势。据研究，这是由于近几年来万州区为促进经济发展，不断增加交通用地面积，从而改善交通环境，减少运输距离和成本，其他生活空间的面积也由此增加。经济的发展必然加快城市化的进程，许多农村居民为了得到更好的生活环境，不断向城市转移，城市向外扩张占用农业用地，从而导致城镇生活空间扩大，农业生产空间缩小。

表 2 2009—2018 年各土地利用类型面积及占比

| 土地利用 功能分类 | 面积/km ² | | | 2009—2013 年 | | 2013—2018 年 | | 2009—2018 年 | |
|--------------|--------------------|---------|---------|----------------------|-------|----------------------|-------|----------------------|-------|
| | 2009 年 | 2013 年 | 2018 年 | 变化面积/km ² | 比例/% | 变化面积/km ² | 比例/% | 变化面积/km ² | 比例/% |
| 农业生产空间 | 1341.50 | 1339.40 | 1325.22 | -2.10 | -0.16 | -14.18 | -1.06 | -16.29 | -1.21 |
| 工矿生产空间 | 4.38 | 4.41 | 4.98 | 0.03 | 0.65 | 0.57 | 12.95 | 0.60 | 13.68 |
| 城镇生活空间 | 73.23 | 81.33 | 90.37 | 8.11 | 11.07 | 9.04 | 11.11 | 17.14 | 23.41 |
| 农村生活空间 | 209.27 | 203.98 | 205.37 | -5.29 | -2.53 | 1.39 | 0.68 | -3.90 | -1.86 |
| 其他生活空间 | 8.48 | 10.21 | 16.26 | 1.73 | 20.34 | 6.06 | 59.34 | 7.78 | 91.76 |
| 林地生态空间 | 1374.20 | 1372.55 | 1373.12 | -1.65 | -0.12 | 0.57 | 0.04 | -1.08 | -0.08 |
| 牧草生态空间 | 282.57 | 282.62 | 281.21 | 0.05 | 0.02 | -1.41 | -0.50 | -1.36 | -0.48 |
| 水域生态空间 | 155.95 | 155.09 | 153.13 | -0.86 | -0.55 | -1.96 | -1.27 | -2.82 | -1.81 |
| 其他生态空间 | 6.97 | 6.96 | 6.93 | -0.01 | -0.11 | -0.04 | -0.55 | -0.05 | -0.66 |

2.2 景观生态安全时空变化

根据公式(1)计算每个评价单元的景观生态安全指数,并对各评价单元进行克里金插值,先采用自然断点法进行分类,再人为进行细微调整阈值,将景观生态安全指数划分为 5 个等级:1 级($0 < \text{ESI} \leq$

0.607), 2 级($0.607 < \text{ESI} \leq 0.632$), 3 级($0.632 < \text{ESI} \leq 0.660$), 4 级($0.660 < \text{ESI} \leq 0.710$), 5 级($\text{ESI} > 0.710$), 以此得到万州区景观生态安全等级分布图(图 2)和景观生态安全等级面积统计表(表 3)。

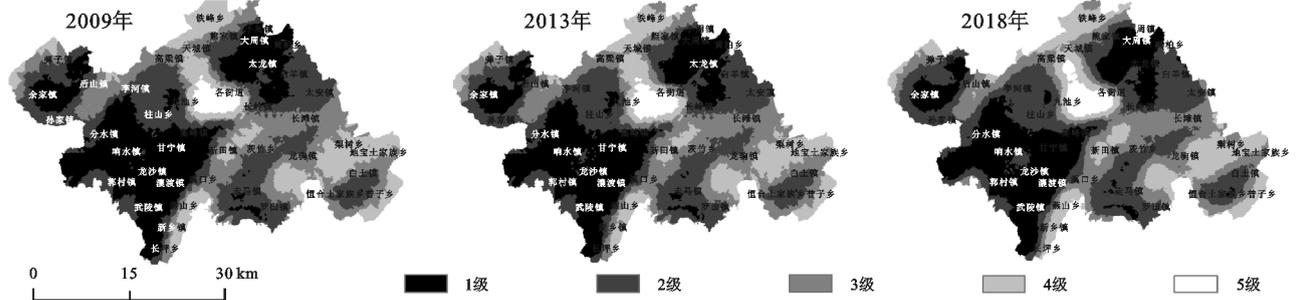


图 2 景观生态安全等级分布

表 3 2009—2018 年景观生态安全等级面积及占比

| 安全等级 | 2009 年 | | 2013 年 | | 2018 年 | |
|-----------|--------------------|-------|--------------------|-------|--------------------|-------|
| | 面积/km ² | 比例/% | 面积/km ² | 比例/% | 面积/km ² | 比例/% |
| 1 级(不安全) | 976.71 | 28.30 | 958.44 | 27.74 | 920.22 | 26.64 |
| 2 级(较不安全) | 1047.70 | 30.36 | 1055.54 | 30.55 | 1105.84 | 32.01 |
| 3 级(中等安全) | 795.54 | 23.05 | 817.25 | 23.66 | 764.10 | 22.12 |
| 4 级(较安全) | 560.14 | 16.23 | 548.52 | 15.88 | 571.28 | 16.54 |
| 5 级(安全) | 70.72 | 2.05 | 75.01 | 2.17 | 93.33 | 2.70 |

万州区的景观生态安全整体处于较高水平,2009 年景观生态安全值介于 0.52~0.94,平均值为 0.714;2013 年、2018 年景观生态安全值均介于 0.52~0.96,平均值分别为 0.63、0.74,可以看出,万州区景观生态安全指数整体呈现上升趋势,但 2013 年空间分布差异较大。由表 3 可见,研究区不安全区和较不安全区面积占比在 58% 以上,超过了中等安全及以上等级区的面积,其中,较不安全区一直是研究区生态安全的主要类型,且面积持续增加,说明研究区景观生态安全整体上还有待提高。各等级间的面积变化也较为显著,不安全区面积持续下降,从 2009—2018 年,下降了约 56.5 km²,中等安全区面积波动下降,较安全区面积波动上升,较不安全与安全区面积持续上升,其中安全区面积变化幅度最大,约为 32%,增加了 22.61 km² 左右,表明研究区生态环境在不断完善,生态安全状况在朝着好的方向改变。

在空间分布上,研究区景观生态安全分布具有明显的规律性和异质性特征,由图 2 可知,总体上呈现中部高、东北—西南低的空间分布特征。安全区分布较为集中,2009 年主要分布在城镇中心,随着城镇化的扩张,到 2018 年分布范围明显扩大,逐步向北部扩张,呈现出明显的“L”型分布,这是因为该区是万州区的城市中心,以建设用地为主,土地利用类型较为稳定,不易受环境变化和人类活动的影响而发生改变,城市扩张导致建设用

地面积扩大,从而景观生态安全区的面积随之增加。较安全区分布较为分散,一部分主要分布在安全区附近,即城市郊区;另一部分主要分布在海拔较高的山地地区,周围围绕着中等安全区,主要山脉包括开梁山、铁峰山、大山、七曜山等,多呈西南—东北走向,景观类型较为单一,人为扰动较少,因此生态环境良好。不安全区主要沿长江流域分布,呈现 3 大片区,分别位于东北部、西部和西南部,其中分布面积最大的片区是西南部,主要包括甘宁镇、响水镇、龙沙镇、分水镇、瀼渡镇等地区,其中,龙沙镇的不安全区面积从 2009—2018 年在明显减少,生态环境逐步改善,这主要得益于近年来龙沙镇结合当地地形地貌,调整产业结构,大力引进农业企业,积极打造柑橘产业园区、花海观景区、优质粮油示范区等现代农业园区,实现农业现代化、机械化、生态化,美丽乡村建设效果显著。较不安全区大致分布在不安全区周围,以不安全区为中心向外扩散,该区以低山、丘陵为主,景观破碎,人类活动频繁,破坏强度大。

2.3 景观生态安全地统计分析

2.3.1 空间自相关分析

空间自相关分析可以度量某一变量在空间上是否与其邻近位置的变量相关,在此基础上的局部自相关则能进一步体现集聚特征。本研究利用 GeoDa 5.1 软件,以 2009 年、2013 年、2018 年万州区景观生态安全指数为基础,计算得出:在 2 km 尺度下,2009 年、2013 年和 2018 年的 Moran' I 值分别为 0.408、0.413、0.420,均大于 0,且通过 $p=0.05$ 水平的显著检验,说明研究区景观生态安全在空间上存在正相关关系,空间分布具有集聚特征。3 个时期的 Moran' I 值虽然变化不大,但整体呈上升趋势,说明空间自相关关系有小幅度提升,空间趋同性逐渐增强。在象限分布上,大部分样本单元位于第一、第三象限,属于“高一高”和“低—低”生态安全聚集模式,

其中,第一象限内的样本单元生态安全值差距较大,散点分布较分散,即高安全区域内部差异较大。这与城市发展有关,一方面城市向外扩张增加了建设用地面积,建设用地稳定且不易发生改变,整体上提高了景观生态安全;另一方面,为了改善城市内部环境,绿化用地面积也相应增加,从而导致城市内部景观生态安全差异增大。

为了进一步分析万州区景观生态风险的局部空间相关性,以 LISA 作为度量,根据 GeoDa 5.1 软件运算得出万州区景观生态安全 LISA 聚集图(图 3)。从图 3 可以看出:2009—2018 年万州区景观生态安全高一高值区

域和低—低值区域存在显著的空间集聚特征,高一—低值、低—高值则零星分布。高一—高值区域和低—低值区域的分布范围与景观生态安全等级中的安全区、不安全区空间分布具有较高的一致性,高一—高值区域主要集中于城镇中心和海拔高的景观生态安全区,低—低值区域集中分布于具有河流的甘宁镇、响水镇、龙沙镇等景观生态不安全区。从格网数目来看,2009—2018 年高一—高值与低—低值的格网数目远大于高一—低值与低—高值的格网数目,这说明研究区景观生态安全分布以高一—高集聚和低—低集聚类型为主,低—高集聚和高—低集聚分布现象不明显。

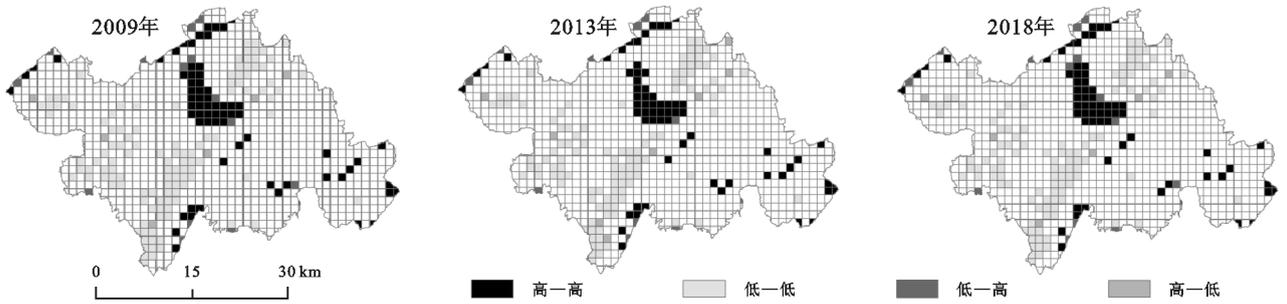


图 3 景观生态安全 LISA 聚集

2.3.2 半变异函数分析 为了探讨研究区景观生态安全的时间分异特征,本研究借助 GS⁺ 7.0 软件,引入地统计学中的半变异函数,对研究区生态安全评价指数进行半变异函数模型拟合,结果见表 4,通过对 4 个模型结果进行比对,可以看出:2009 年高斯模型拟合效果最佳,决定系数为 0.89,2013 年和 2018 年最佳拟合模型均为线性模型,决定系数分别为 0.945,0.943,拟合效果均较好。2009 年、2013 年、2018 年基台值持续增加,分别为 0.003,0.014 8,0.016,表明景观生态安全性的空间分布差异逐渐增大。块金系数是块金值与基台值的比值,该值越大,

表明随机性因素对地理要素空间分异的影响越大,研究区块金系数从 2009 年的 0.613 下降到 2013 年的 0.496,表明随机性因素对研究区景观生态安全的空间分异影响程度下降,结构性因素影响增强,并成为主导影响因素,到 2018 年,块金系数上升到 0.526,随机性因素增强并成为主导因素。此外,块金系数一直介于 0.25~0.75,表明研究区景观生态安全具有中等的空间相关性。2009 年变程为 9 km,2013 年和 2018 年变程均为 49 km,表明研究区景观生态安全指数的相关性范围在逐渐扩张,空间异质性减弱,景观类型趋同。

表 4 景观生态安全指数半变异拟合参数

| 年份 | 模型 | 块金值 | 基台值 | 块金值/基台值/% | 变程/km | 决定系数 | 残差 |
|------|----|--------|--------|-----------|-------|-------|------------------------|
| 2009 | 线性 | 0.0026 | 0.0031 | 0.157 | 49 | 0.129 | 2.073×10^{-6} |
| | 球体 | 0.0008 | 0.0030 | 0.738 | 10 | 0.888 | 2.689×10^{-7} |
| | 指数 | 0.0004 | 0.0030 | 0.872 | 11 | 0.877 | 2.992×10^{-7} |
| | 高斯 | 0.0012 | 0.0030 | 0.613 | 9 | 0.89 | 2.652×10^{-7} |
| 2013 | 线性 | 0.0075 | 0.0148 | 0.496 | 49 | 0.945 | 4.117×10^{-6} |
| | 球体 | 0.0075 | 0.0175 | 0.574 | 96 | 0.932 | 5.191×10^{-6} |
| | 指数 | 0.0073 | 0.0294 | 0.753 | 371 | 0.93 | 5.292×10^{-6} |
| | 高斯 | 0.0002 | 0.0116 | 0.986 | 4 | 0.224 | 5.843×10^{-6} |
| 2018 | 线性 | 0.0076 | 0.0160 | 0.526 | 49 | 0.943 | 5.655×10^{-6} |
| | 球体 | 0.0076 | 0.0205 | 0.632 | 109 | 0.931 | 6.791×10^{-6} |
| | 指数 | 0.0074 | 0.0447 | 0.834 | 579 | 0.932 | 6.740×10^{-6} |
| | 高斯 | 0.0004 | 0.0123 | 0.971 | 5 | 0.216 | 7.775×10^{-5} |

2.4 景观生态安全耦合特征分析

2.4.1 三生空间景观生态安全耦合特征分析 基于“三生”空间评价体系,在计算出研究区的景观生态安全值的基础上,运用 ArcGIS 10.6 的栅格计算器,引用公式(6)的耦合协调度模型,计算出研究区景观生态安全耦合协调度,并采用自然断点法进行分类,将耦

合协调度划分为 5 个等级:严重失调($0 < D \leq 0.288$)、中度失调($0.288 < D \leq 0.302$)、基本协调($0.302 < D \leq 0.318$)、中度协调($0.318 < D \leq 0.347$)、高度协调($D > 0.347$),以此得到研究区景观生态安全耦合协调度等级分布图(图 4)和景观生态安全耦合协调度等级面积统计图(图 5)。

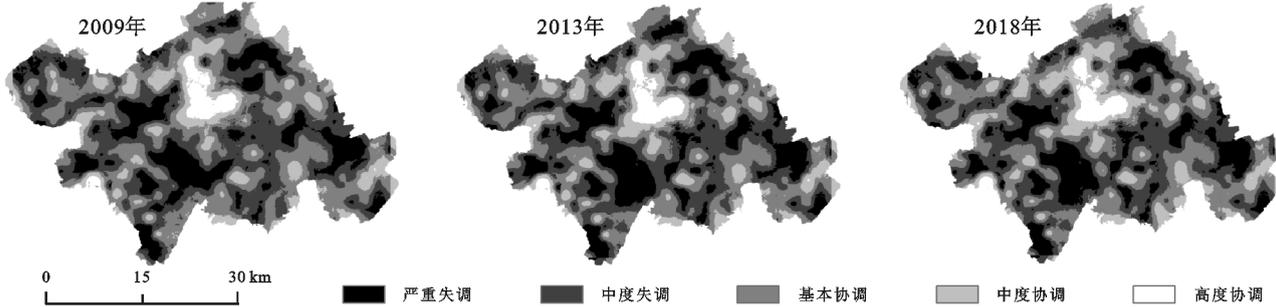


图 4 三生空间景观生态安全耦合协调度等级分布

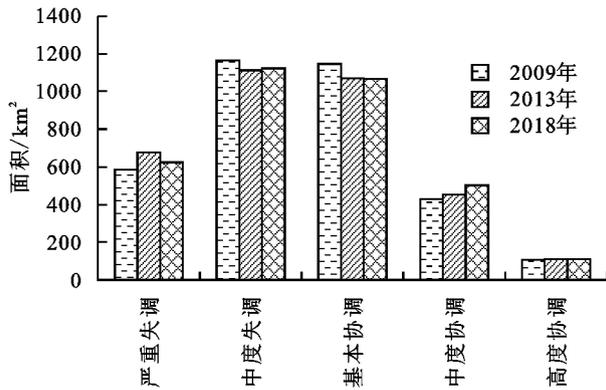


图 5 三生空间景观生态安全耦合协调度等级面积

从整体上看,万州区“三生空间”景观生态安全的耦合协调度水平不高,2009—2018 年的耦合协调度均介于 0.249~0.423,整体上呈现“中部高,四周低”的空间分布特征,地域分异明显。根据耦合协调度等级划分标准,2009—2018 年严重失调区面积呈先增后减的趋势,整体上面积增加了 38.64 km²,2009 年、2013 年、2018 年面积占比分别为 17.05%、19.72%、18.2%,空间分布范围变化较小,主要沿河流分布,集中分布在柱山乡、甘宁镇、溪口乡、梨树乡,这是由于该地景观生态安全在生产空间与生活空间上的差异较大,发展较为不平衡,因此耦合协调度较低。高度协调区面积占比 2009—2018 年均介于 3%~4%,面积出现小幅度增加,共增加了 3.26 km²,空间分布特征明显,与景观生态安全的安全区分布较相似,主要分布在城镇中心,这是由于该区三生空间景观生态安全差异较小,发展较为均衡,因此耦合协调度较高。中度失调区、基本协调区和中度协调区分布较为分散,散落分布在研究区内,其中,中度失调区始终占主导地位,面积占比均在 32.53% 以上,在面积变化上,面积在 2009 年和 2013 年期间减少幅度较大,减少了

49.13 km²,2013—2018 年期间面积有小幅度回升,增加了 8.775 km²;基本协调区面积持续下降,面积变化最大,到 2018 年,面积共减少了 78.13 km² 左右;中度协调区面积持续上升,共增加了 72.7 km²,2009—2018 年增幅高达 20%,是上升幅度最大的区。总的来说,中度协调和高度协调区面积在不断增加,这说明万州区三生空间的景观生态安全综合耦合协调能力一直在改善,但高度协调区面积占比较少,且中度失调区面积占比始终处于主导地位,说明万州区三生空间的景观生态安全相互协调关系还有待改善。

2.4.2 三生空间景观生态安全两两耦合特征分析 为深入探析景观生态安全在生产—生活—生态空间下两两相互协调发展水平与协同发展程度。根据公式(7)~(9),测算出三生空间景观生态安全两两耦合度和耦合协调度,并采用自然断点法将耦合协调度划分为 5 个等级,由此得到 2009—2018 年万州区三生空间景观生态安全两两耦合协调度的空间分布图(图 6)。

“生产—生活”空间景观生态安全的耦合协调度介于 0.12~0.47,“生产—生态”空间景观生态安全的耦合协调度介于 0.11~0.45,“生活—生态”空间景观生态安全的耦合协调度介于 0.15~0.46,可以看出:景观生态安全在“生产—生活”空间、“生产—生态”空间与“生活—生态”空间上的耦合协调度差距不大,年际变化也不明显,但空间分布差异显著。从“生产—生活”空间景观生态安全的耦合协调度来看,城镇中心协调度较高,高度协调区呈“L”字型分布,中度协调区呈斜“1”字型分布,说明城镇中心的景观生态安全在生产空间和生活空间上实现了同步发展。万州区作为三峡库区移民区,在强调城市经济快速发展的同时,也注重为人们提供一个宜居的生活环境。从“生产—生态”空间的景观生态安

全耦合协调度来看,其空间分布特征与“生产—生活”空间景观生态安全耦合协调度的空间分布相反,耦合协调度从城镇中心向四周逐渐提高,城镇中心成为严重失调区,且严重失调区面积呈上升趋势,这说明万州区城镇中心的景观生态安全在生产空间和生活空间上存在较为严重的矛盾,难以实现同步发展,这是由于万州区在初期为了快速提升经济,引进大量工业企业,片面注重经济发展而忽视生态保护,从而导致生态环境恶化。从“生活—生态”空间景观生态安全的耦合协调度来看,其空间分布特征与“生产—生活”空间景观生态安全耦合协调度的空间分布相似,城镇中

心的景观生态安全在“生活—生态”空间上依旧是高度协调发展区,良好的生态空间必然带来良好的生活空间;但河流地区的景观生态安全在“生活—生态”空间上处于失调区,这是由于河流附近地形平坦,多为人类聚集区,人类活动频繁,生态环境容易被破坏。总的来说,万州区三生空间景观生态安全的两两耦合协调度还处于较低水平,城镇中心需促进“生产—生活”空间生态环境的协调发展,河流水域地区需注重“生活—生态”空间生态环境的同步发展,只有三生空间的景观生态环境同时达到最优水平,才能从整体上提高万州区的景观生态安全,从而改善生态环境。

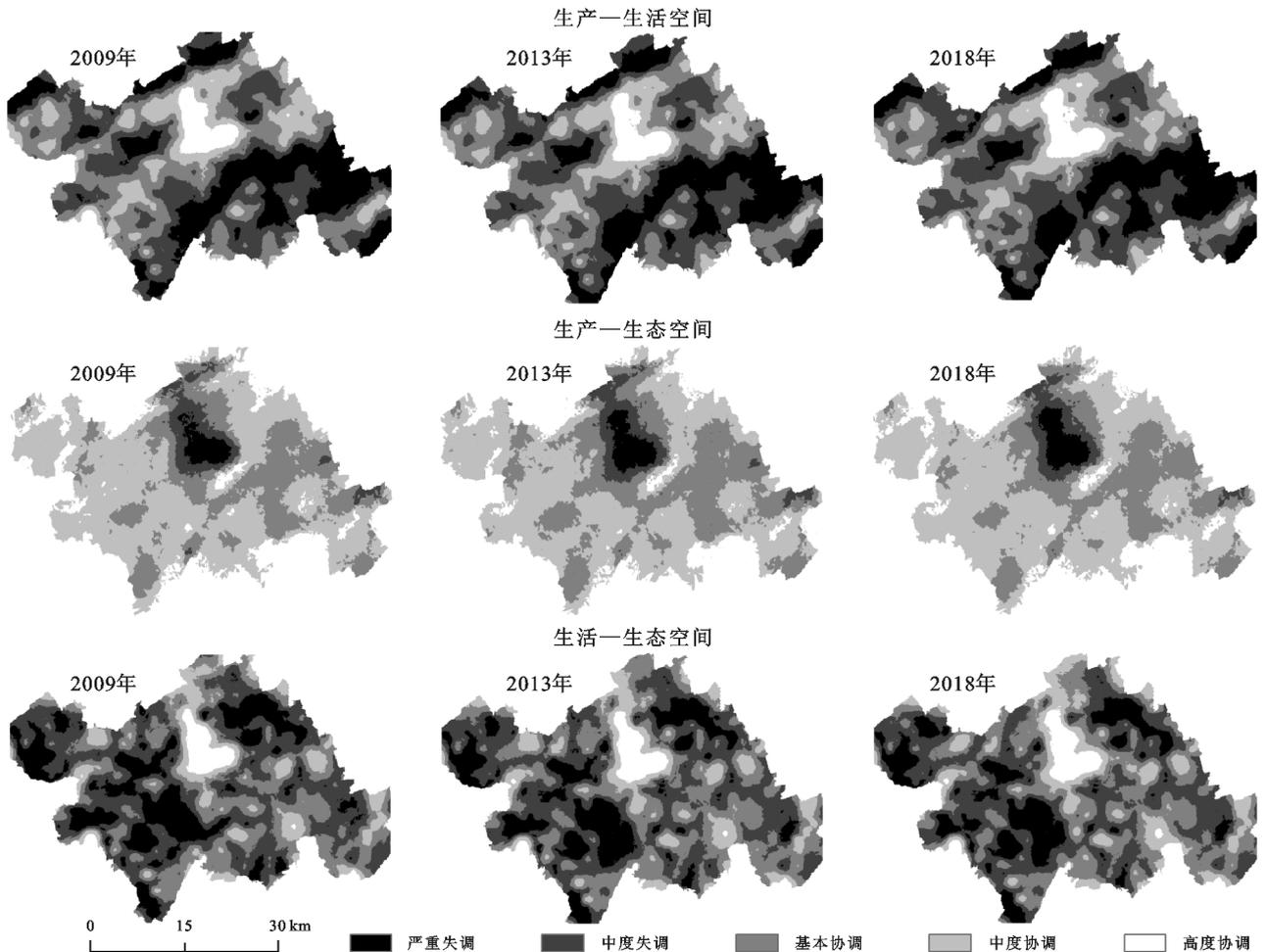


图 6 三生空间景观生态安全两两耦合协调度等级分布

3 讨论与结论

3.1 讨论

本研究从“三生空间”视角出发,以 ArcGIS, Fragstats 为主要技术平台,GS⁺, Geoda 软件为辅助分析工具,结合空间自相关、地统计学和耦合协调模型,研究在 2 km 格网尺度下万州区景观生态安全的时空变化特征。与以往研究相比,本研究中所涉及的土地利用数据均来自万州区土地利用变更数据库,比遥感解译得出

的数据更加精确可靠;其次,“三生空间”与耦合协调模型的综合应用多用于土地利用功能变化分析,但将三生空间理念与区域景观生态安全进行耦合协调分析的研究还较为缺乏。关于三生空间的研究探讨还处于初步阶段,目前还未建立统一的三生空间土地分类体系,研究者需从自己的研究目的和结合研究区实际情况构建合理的分类体系。基于景观格局尺度计算生态安全,一般会选取干扰度和脆弱度构建景观生态安全评价模型,但是景观类型的脆弱度是相对的,具有复杂性

和不确定性,研究中脆弱度的值一般是主观赋值的,不具有客观性。因此,如何构建完善统一的三生分类体系,准确客观地量化景观脆弱度,完善景观格局下的生态安全评价,还需进一步研究。

3.2 结论

(1) 2009—2018 年万州区土地利用类型以林地生态空间和农业生产空间为主,两者共同占总面积的 77% 左右。在面积变化上,生活空间中除农村生活空间面积在不断减少外,城镇生活空间和其他生活空间的面积都在迅速增加;生产空间中农业生产空间面积在逐渐减少,工矿生产空间面积有小幅增加;生态空间各地类面积均在减少,其中水域生态空间减少的最多。

(2) 万州区的景观生态安全整体处于较高水平,2009—2018 年景观生态安全值介于 0.52~0.96,且景观生态安全指数整体呈现上升趋势。在面积变化上,万州区不安全区和较不安全区面积占比在 58% 以上,超过了中等安全及以上等级区的面积,说明研究区景观生态安全整体上还有待提高。在空间分布上,具有明显的规律性和异质性特征,其中,安全区主要分布在城镇中心,呈现出明显的“L”型分布;不安全区主要沿长江流域分布,呈现 3 大组团,分别位于东北部、西部和西南部。

(3) 2009—2018 年万州区景观生态安全总体上存在较强的正向相关关系,且全局空间自相关水平表现出逐渐上升的趋势;局部空间自相关存在显著的高—高集聚区域和低—低集聚区域,年份间差异较小;2009 年最佳拟合模型为高斯模型;2013 年和 2018 年最佳拟合模型为线性模型,总体来看;随机性因素对景观生态安全的空间分布影响作用力较强。

(4) 万州区“三生空间”景观生态安全的耦合协调度水平不高,但地区差异较小,整体上呈现“中部高,四周低”的空间分布特征。其中,严重失调区主要沿河流分布,集中分布在柱山乡、甘宁镇、溪口乡、梨树乡;高度协调区空间分布特征与景观生态安全的安全区分布较相似,主要分布在城镇中心。在“三生空间”景观生态安全两两耦合协调发展上,河流地区的景观生态安全在“生活—生态”空间上还未实现同步发展,城镇中心的景观生态安全虽在“生产—生态”空间和“生活—生态”空间上实现了协调发展,但在“生产—生态”空间上还处于失衡发展阶段。

参考文献:

[1] 肖笃宁,陈文波,郭福良.论生态安全的基本概念和研究内容[J].应用生态学报,2002,13(3):354-358.
 [2] 李加林,徐凉慧,杨磊,等.浙江省海岸带景观生态风险格局演变研究[J].水土保持学报,2016,30(1):293-299,314.
 [3] Focks A, Ter Horst M, Van Den Berg E, et al. Integrating

chemical fate and population-level effect models for pesticides at landscape scale: New options for risk assessment[J]. Ecological Modelling, 2014, 280:102-116.

- [4] 梁二敏,张军民.新疆玛纳斯河流域景观格局变化的生态安全分析[J].水土保持研究,2016,23(3):170-175.
 [5] 韩逸,郭熙,江叶枫,等.南方丘陵区耕地景观生态安全影响因素及其空间差异[J].生态学报,2019,39(17):6522-6533.
 [6] 刘月亮,成方龙,黄勋,等.1995—2015 年广州市景观生态安全时空演变研究[J].生态经济,2019,35(7):221-229.
 [7] 赵越,罗志军,李雅婷,等.赣江上游流域景观生态风险的时空分异:从生产—生活—生态空间的视角[J].生态学报,2019,39(13):4676-4686.
 [8] 邹长新,沈渭寿.生态安全研究进展[J].农村生态环境,2003,19(1):56-59.
 [9] 谢余初,巩杰,张玲玲.基于 PSR 模型的白龙江流域景观生态安全时空变化[J].地理科学,2015,35(6):790-797.
 [10] 陈昆仑,齐漫,王旭,等.1995—2015 年武汉城市湖泊景观生态安全格局演化[J].生态学报,2019,39(5):1725-1734.
 [11] 李秀芝.北戴河新区耕地景观生态安全时空变化研究[J].中国农业资源与区划,2017,38(3):59-64.
 [12] 何珍珍,王宏卫,杨胜天,等.渭干河—库车河绿洲景观生态安全时空分异及格局优化[J].生态学报,2019,39(15):5473-5482.
 [13] 张杨,马泽忠,陈丹.基于生态格局视角的三峡库区土地生态系统服务价值[J].水土保持研究,2019,26(5):321-327.
 [14] 朱小龙,杨华.基于 GIS 的重庆市县域土地利用变化研究:以万州区为例[J].旅游纵览月刊,2016(4):227-229.
 [15] 陈仙春,赵俊三,陈国平.基于“三生空间”的滇中城市群土地利用空间结构多尺度分析[J].水土保持研究,2019,26(5):258-264.
 [16] 张红旗,许尔琪,朱会议.中国“三生用地”分类及其空间格局[J].资源科学,2015,37(7):1332-1338.
 [17] 肖笃宁,李秀珍.当代景观生态学的进展和展望[J].地理科学,1997,17(4):355-364.
 [18] 时卉,杨兆萍,韩芳,等.新疆天池景区生态安全度时空分异特征与驱动机制[J].地理科学进展,2013,32(3):475-485.
 [19] 戴文远,黄华富,黄万里,等.海岛生态脆弱区景观生态安全时空分异特征:以福建海坛岛为例[J].生态科学,2017,36(4):152-159.
 [20] 王成,唐宁.重庆市乡村三生空间功能耦合协调的时空特征与格局演化[J].地理研究,2018,37(6):1100-1114.
 [21] 陈英,冯定邦,蔡立群,等.耕作层土壤养分含量的空间自相关分析:以秦安县郭嘉镇为例[J].干旱地区农业研究,2016,34(1):66-73,107.
 [22] 龚俊杰,杨华,邓华锋.北京明长城沿线景观与生态风险分布格局分析[J].中南林业科技大学学报,2016,36(5):114-120.