

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.06.029.

王彬, 梅志雄, 魏俊超, 等. 基于空间统计的珠三角地区土地利用生态风险时空特征[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 423-431, 440.

Wang Bin, Mei Zhixiong, Wei Junchao, et al. Spatiotemporal Characteristics of Land-Use Ecological Risk in the Pearl River Delta Region Based on Spatial Statistics[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 423-431, 440.

基于空间统计的珠三角地区土地利用生态风险时空特征

王彬, 梅志雄, 魏俊超, 马杰

(华南师范大学地理科学学院, 广州 510631)

摘要: [目的]揭示珠三角地区土地利用生态风险的空间结构模式和时空变化规律, 为促进土地资源可持续利用和保障区域生态安全提供参考依据。[方法]基于景观指数构建土地利用生态风险评价模型, 测算2000年、2010年、2020年珠三角地区多种尺度下的土地利用生态风险, 利用半变异函数确定最适宜的研究尺度, 运用空间自相关和GIS空间分析方法分析了适宜尺度下土地利用生态风险的时空特征。[结果](1) 3 km 样方尺度是最佳研究尺度, 小流域尺度也较合适; 两个尺度下土地利用生态风险空间变异均以结构性因素影响为主, 即存在较强的空间自相关性。(2) 研究区土地利用生态风险总体上具有较强的正空间集聚特征, 但集聚程度趋于减弱; 大多单元局部空间集聚特征相对稳定, 以高一低集聚和低—低集聚为主, 低—高和高—低集聚区零星分布且变化不大。(3) 区域土地利用生态风险总体呈略微下降趋势, 以低风险和较低风险等级区为主且面积逐渐增加, 中风险等级以上面积减小。[结论]珠三角地区土地利用生态风险整体上呈现正空间集聚特征, 且土地利用生态风险水平逐渐降低, 研究结果可为区域国土空间优化利用和生态风险管控提供决策参考。

关键词: 土地利用生态风险; 半变异函数; 空间自相关; 珠三角

中图分类号: X826

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)06-0423-09

Spatiotemporal Characteristics of Land-Use Ecological Risk in the Pearl River Delta Region Based on Spatial Statistics

Wang Bin, Mei Zhixiong, Wei Junchao, Ma Jie

(School of Geography, South China Normal University, Guangzhou 510631, China)

Abstract: [Objective] The aim of this study is to explore the spatial structure pattern and spatial-temporal change rule of land use ecological risk in the Pearl River Delta (PRD) region, and then to provide scientific support for the sustainable utilization of land resources and ecological security. [Methods] A land-use ecological risk assessment model was constructed with landscape metrics, and land-use ecological risk indexes at multiple scales in the Pearl River Delta in 2000, 2010 and 2020 were measured by this model. Then, the semi-variogram, spatial autocorrelation and GIS spatial analysis methods were used to determine appropriate research scales and explore the spatiotemporal characteristics of land-use ecological risk at these scales. [Results] (1) The 3 km quadratic scale was the best research scale, and the small watershed scale was also appropriate. At both scales, the spatial variability of land-use ecological risk from 2000 to 2010 was mainly influenced by structural factors, i.e., there was a strong spatial autocorrelation. (2) The land-use ecological risk in the study area generally had strong positive spatial agglomeration characteristics, but the degree of agglomeration trended to weaken. The local spatial agglomeration characteristics of most units were relatively

收稿日期: 2022-10-25

修回日期: 2022-11-10

资助项目: 国家自然科学基金“珠三角城市群的城市空间集聚时空分析与预测及空间优化决策”(41001078)

第一作者: 王彬(1998—), 女(壮族), 广西南宁人, 硕士生, 研究方向为土地利用生态风险评价。E-mail: wangbinbin_711@163.com

通信作者: 梅志雄(1976—), 男, 湖北黄梅人, 博士, 教授, 主要从事空间分析与建模、土地利用模拟与优化研究。E-mail: zhixiongmei76@126.com

<http://stbcyj.paperon.com>

stable. The distribution of high-high agglomeration and low-low agglomeration areas were obvious, and the distribution of low-high agglomeration and high-low agglomeration areas were sporadic and did not change much. (3) The degree of land-use ecological risk had gradually decreased. Low-risk level and lower-risk level were dominant risks and the distribution areas were increasing, while the areas above medium-risk level were decreasing. [Conclusion] The overall land use ecological risk in the PRD region showed positive spatial clustering characteristics, and the level of land use ecological risk gradually decreased, and the results of this study can provide decision-making reference for the optimal use of regional land space and ecological risk control.

Keywords: land-use ecological risk; semi-variogram; spatial autocorrelation; Pearl River Delta

当前,我国的城市化进程加快推进,加速了对土地的索取,土地资源利用程度持续增加,对自然和生态环境造成了极大压力,人地矛盾日渐突出,其中以土地利用结构不合理、土地生态风险加剧等问题最为明显^[1-3]。研究表明:土地利用是人类活动与自然环境交互过程中的关键部分,与很多生态系统问题密切相关,甚至对区域生态安全起到首要作用^[4-5]。不同土地利用方式和过程对区域内生态系统产生累积性的影响,其影响直观地反映在生态系统的结构和组成变化当中,并涉及到许多生态过程,由此产生了生态风险问题^[6-7]。在此背景下,为探究区域土地利用变化对生态环境引起的不利影响,寻找降低其影响的方法和途径,开展区域土地利用生态风险分析并提出相应的管控措施,有利于促进土地资源可持续利用和保障生态安全。

土地利用生态风险是指土地利用及其变化造成的生态系统结构破坏及功能降低的可能性^[8],近年来受到诸多学者的关注,且日益注重表现其时空分异特性^[9-10]。土地利用生态风险在不同尺度上表现出的空间格局差异较大,具有尺度效应^[11]。但现有相关研究通常基于一种空间尺度,如以格网作为评价单元(样方尺度)^[12-13]或以行政区(省、区县、乡镇)为评价单元^[14],或小流域单元尺度等^[15]。这些研究一定程度上推动了土地利用生态风险研究的进展,但仍存在如下缺陷:仅限于单一尺度的土地利用生态风险时空变化分析,普遍缺乏多种空间尺度下的土地利用生态风险规律的对比分析而未真正揭示其尺度效应,且主要依赖经验及主观因素选取研究尺度,缺乏客观判断依据^[16]。目前土地利用生态风险评价方法主要有基于风险源汇和基于景观格局两类^[4,8]。基于风险源汇的方法需要识别风险受体和风险源,涉及变量多且变量间关系复杂,数据获取困难,且对生态风险的空间表达能力不足、未考虑空间异质性;基于景观格局的土地利用生态风险评价方法是以土地利用变化为诱因,直接从景观格局角度定量识别和评估生态本底安全风险^[4,17-18]。这类方法所需数据易获取,便于通过空间采样将景观空间结构转化为空间化的生态风险变量,与GIS结合可

深入表达生态风险的空间特征、空间异质性及其时序变化^[4,7-8,19-20],逐渐成为近年土地利用生态风险评价的主流方法。目前国内外相关研究热点区域主要集中在城市^[18]、流域^[7,21]、沿海地带^[22]以及重点自然保护区^[23]等,而针对珠三角地区开展的相关研究较少。仅见叶长盛等^[24]评价了1990—2006年珠三角地区土地利用生态风险,但缺乏2006年后的分析,且只基于5 km×5 km 格网尺度。

为此,本文再次从土地利用视角,选取城镇化快速发展、土地利用结构剧烈变化导致生态风险较为突出的珠三角地区为研究区,以2000年、2010年、2020年的土地利用数据为基础构建生态风险指数,通过半变异函数工具对比分析样方尺度、行政单元尺度和小流域尺度下土地利用生态风险的空间异质性,并借助空间自相关和GIS空间分析方法揭示其时空变化特征。研究将力图揭示不同尺度下区域土地利用生态风险的空间结构模式、时空规律及其差异表现,探测其尺度效应,弥补现有相关研究的不足,并识别和探寻出需要关注的重点区域和潜在生态风险区,进而根据生态风险等级制定不同土地规划管理措施,为区域土地资源合理利用和规划管理及促进区域生态安全提供决策参考。

1 研究区及数据

珠三角(21°40'—24°30'N,111°20'—115°30'E)位于广东省中南部,毗邻南海,与东南亚隔海相望,总面积约5.48万 km²,包括广州、深圳、佛山、惠州、东莞、珠海、中山、肇庆和江门9个地级市。改革开放尤其是新世纪以来,伴随着经济和城镇化的快速发展,该区大量农业用地和生态用地转为建设用地^[25]、土地利用结构变化剧烈,严重扰动了生态环境,区域内生态风险问题备受关注^[26]。因此,从土地利用视角分析新世纪以来该区土地利用变化所引起的生态风险时空特征,对生态风险防控具有重要理论及实践指导意义。

本文所用的数据主要包括数字高程模型(DEM)和土地利用数据。从地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>)获得2009年30 m分辨率的DEM数据,用

于划分分水岭小流域单元。通过全球地理信息公共产品平台 (<http://www.globallandcover.com/>) 获取 2000 年、2010 年、2020 年 30 m 分辨率的地表覆盖栅格数据,根据研究区实际和本文需要,将该地表覆盖数据重新归类得到 100 m 分辨率下耕地、林地、草地、建设用地、水体和未利用地 6 种地类。

2 研究方法

2.1 评价单元划分

选取格网单元、行政区划单元和小流域单元,分别对应样方、行政单元和小流域 3 种空间尺度,来实现多尺度土地利用生态风险值的空间表达。具体划分情况为:(1) 根据景观生态学原理,通常将研究区内斑块平均面积的 2~5 倍来确定格网单元的划分尺度^[19]。根据研究区土地景观斑块大小实际,选取 0.5 km 为步长,从 0.5 km×0.5 km 到 5 km×5 km 创建 10 种格网单元,分别得到 216 060,53 940,23 998,13 488,8 629,6 025,4 542,3 383,3 061,2 160 个格网评价单元;(2) 以研究区下辖 569 个乡镇为行政区评价单元;(3) 使用 ArcGIS 的水文分析模块,从 DEM 提取出 3 415 个小分水岭作为小流域评价单元。

2.2 土地利用生态风险指数

为综合表达不同景观类型在外界影响下产生的潜在危害性,参考前人研究^[6,8,27],选择土地利用类型面积比例、景观干扰度指数和景观脆弱度指数来构建土地利用生态风险指数,计算公式为:

$$ERI_k = \sum_{i=1}^n \frac{A_{ki}}{A_k} (E_i \times F_i) \quad (1)$$

式中:ERI_k为单元 k 的土地利用生态风险指数;A_k和 A_{ki}分别为单元 k 的面积(km²)和单元 k 内地类 i 的面积(km²);E_i和 F_i分别为 i 地类的景观干扰度指数和景观脆弱度指数。

2.2.1 景观干扰度指数 景观干扰度指数 E_i表示景观要素受到外部环境干扰的程度^[28-29],可表达为:

$$E_i = aC_i + bS_i + cU_i \quad (2)$$

式中:C_i,S_i,U_i分别为 i 地类的景观破碎度指数、分离度指数和优势度指数;a,b,c 为权重,参考相关研究^[28]并结合专家咨询分别赋值为 0.5,0.3,0.2。

(1) 景观破碎度指数(C_i)指某一地类在外界干扰下从均匀的整体状态转变为异质的破碎状态,其值越大,单元内部越不稳定,可由 i 地类的斑块数与单元面积的比值表示。

(2) 景观分离度指数(S_i)指某地类的斑块单元在空间上的分离程度,其值越高,表示该地类的空间散布程度越大,容易受到外界干扰。其计算公式为:

$$S_i = \frac{D_i}{P_i} \quad (3)$$

$$D_i = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{n_i}{A}} \quad (4)$$

$$P_i = \frac{A_i}{A} \quad (5)$$

式中:S_i为 i 地类的景观分离度指数;D_i为 i 地类的距离指标;P_i为 i 地类的面积比值;A 和 A_i分别为单元面积(km²)和单元内 i 地类的面积(km²);n_i为单元内 i 地类的斑块数。

(3) 景观优势度指数(U_i)指某一地类对景观整体的影响程度,其值越大,表明该地类对景观格局的影响程度越大,可表达为:

$$U_i = (1 + \frac{n_i}{n} + P_i) / 3 \quad (6)$$

式中:U_i为 i 地类的景观优势度;n 为单元内总斑块数;n_i,P_i含义同上。

2.2.2 景观脆弱度指数 景观脆弱度指数 F_i表示景观要素结构受到外部因素扰动时的易损性,一般通过专家咨询法并结合实际对不同地类赋值并归一化获得。参考相关研究^[20,28]和专家意见,并进行归一化得到 6 种地类的脆弱度指数如下:耕地 0.190 5,林地 0.095 2,草地 0.142 9,建设用地 0.047 2,水体 0.238 1,未利用地 0.285 7。

2.3 半变异函数

半变异函数是地统计学中研究区域化变量空间异质性的方法,能够表述变量的结构性和随机性变化特征^[30]。其计算公式为:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (7)$$

式中:γ(h)为半变异函数;h 为样本点间隔距离即步长;N(h)为步长为 h 时的样本点对数量;z(x_i)和 z(x_i+h)分别为位置 x_i和(x_i+h)处的土地利用生态风险值。

半变异函数有 3 个重要拟合参数:(1) 块金值 C₀,表示区域化变量的不确定性;(2) 基台值 C+C₀。(包括块金值 C₀和结构方差 C),为半变异函数保持平稳时对应的数值,描述变量整体变异情况;(3) 变程 A,表示变量保持空间自相关性的距离。常用的半变异函数模型有指数模型、球状模型和高斯模型等,可通过模型拟合后的决定系数 R²和残差 RSS 大小对比来确定最优拟合模型^[30]。

2.4 空间自相关方法

空间自相关用来探测空间单元与邻域单元在相同属性值上的关联程度,并揭示其空间异质和空间集聚,以检验区域化变量的空间结构关系,包括全局和

局部空间自相关,常用 Moran's I 指数表示^[31]。

全局 Moran's I 反映区域单元观测值在整个研究区的空间自相关特征^[32],其表达式为:

$$I = \frac{N}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N W_{ij}} \times \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N W_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \quad (8)$$

式中: X_i 为 i 单元的观测值; W_{ij} 为行标准化的空间权重矩阵; I 值范围落在 $[-1, 1]$,在定义的显著性水平下,当 I 显著为正时,单元观测值呈空间集聚分布;当 I 显著为负时,单元观测值呈空间散布状态;当 I 值为 0 时,表明单元观测值为独立随机分布。

全局空间自相关虽可探测区域中具有同一属性单元的总集聚程度,但无法表示局域单元的空间集聚特征。而局部空间自相关不仅可探测空间异质,也可准确反映出集聚区的具体位置和范围^[31]。局部 Moran's I 表达式如下:

$$I_i = \frac{X_i - \bar{X}}{S^2} \sum_{j=1, j \neq i}^N W_{ij} (X_j - \bar{X}) \quad (9)$$

表 1 2000 年不同尺度下土地利用生态风险指数半变异函数模型拟合结果

Table 1 Land use ecological risk index semi-variance function model fitting results at different scales in 2000

尺度	最优拟合模型	C_0	$C+C_0$	$C/(C+C_0)$	A/m	R^2	RSS
样方尺度	0.5 km 指数模型	3.17×10^{-6}	1.90×10^{-5}	0.833	20700	0.431	1.96×10^{-8}
	1 km 指数模型	6.00×10^{-6}	3.40×10^{-5}	0.824	21500	0.575	5.49×10^{-11}
	1.5 km 指数模型	1.50×10^{-5}	9.40×10^{-5}	0.840	22500	0.481	5.23×10^{-10}
	2 km 指数模型	4.70×10^{-5}	2.86×10^{-4}	0.836	25500	0.492	6.10×10^{-9}
	2.5 km 指数模型	8.80×10^{-5}	5.26×10^{-4}	0.833	29400	0.535	2.23×10^{-8}
	3 km 指数模型	1.92×10^{-4}	1.12×10^{-3}	0.829	32400	0.829	9.78×10^{-8}
	3.5 km 球状模型	7.45×10^{-4}	1.63×10^{-3}	0.543	43600	0.600	2.39×10^{-7}
	4 km 球状模型	1.35×10^{-3}	2.90×10^{-3}	0.534	42600	0.579	8.04×10^{-7}
	4.5 km 球状模型	1.82×10^{-3}	3.97×10^{-3}	0.540	43700	0.562	1.77×10^{-6}
小流域尺度	5 km 球状模型	2.49×10^{-3}	5.70×10^{-3}	0.563	47400	0.623	3.50×10^{-6}
行政单元尺度	指数模型	2.28×10^{-3}	1.42×10^{-2}	0.839	24900	0.617	1.26×10^{-7}
	高斯模型	1.99×10^{-2}	8.67×10^{-2}	0.770	17666	0.453	1.86×10^{-7}

由表 1 可知,0.5 km 样方尺度下,土地利用生态风险指数的 C_0 和 $C+C_0$ 均最小,说明该尺度下土地利用生态风险的随机性较小;随着样方尺度评价单元从 0.5 km 到 5 km 变化, C_0 和 $C+C_0$ 逐渐增加,说明土地利用生态风险的随机性逐渐增大,人类活动或自然灾害等外部干扰因素即偶然因素造成的空间异质性逐渐增强。行政单元尺度下的 C_0 和 $C+C_0$ 均最大,说明该尺度下土地利用生态风险的随机性特征比其他尺度都明显。0.5~3 km 样方尺度下,其结构方差/基台值即 $C/(C+C_0)$ 呈小幅波动,但均维持在 0.82 以上。根据地统计学原理,这说明结构性因素引起的空间异质性在样本间总变异中起主导作用,也反映了土地利用生态风险的空间自相关性较强^[16]。而 3 km~5 km 样方尺度下, $C/(C+C_0)$ 总体呈快速下

式中: S 为各单元观测值的标准差。

局部 Moran's I 计算结果可划分为高一高集聚、低—低集聚、高一低集聚和低—高集聚 4 种类型。高一高(低—低)型即某单元与邻域单元间表现为正空间自相关,高(低)值在局域空间呈现集聚现象;高一低(低—高)型即某单元与邻域单元间表现为负空间自相关,高(低)值单元被邻域的低(高)值包围,是空间异质区域^[31]。

3 结果与分析

3.1 多尺度比较及适宜评价尺度的确定

根据公式(1)~(6),借助 Fragstats 软件计算得到选择的不同空间尺度下 2000 年、2010 年、2020 年各评价单元的土地利用生态风险值,将其作为样本点数据进行后续研究。以 2000 年土地利用生态风险指数计算结果为例,使用 GS+ 软件计算得到其半变异函数拟合结果(表 1)并对比不同尺度的参数变化特征,以选取最适宜研究尺度。

降态势,说明结构性因素引起的空间异质性逐渐减弱,随机因素的影响程度加深,土地利用生态风险的随机性变异增强。小流域尺度的 $C/(C+C_0)$ 达到 0.839,行政单元尺度的 $C/(C+C_0)$ 也较高。从不同尺度拟合结果的决定系数 R^2 来看,0.5~2.5 km 样方尺度下的 R^2 总体上比 3.5~5 km 样方尺度下的 R^2 小,而 3 km 样方尺度下的 R^2 为 0.829,为所有尺度中的最大值;小流域尺度下的 R^2 为 0.617,拟合效果尚可;行政单元尺度下的 R^2 为 0.453,拟合效果较差。因此,3 km 样方尺度是研究区 2000 年土地利用生态风险分析的最佳尺度。

以同样的方法分别对 2010 年、2020 年的土地利用生态风险进行适宜评价尺度分析,均得到 3 km 样方尺度为最佳评价尺度。但考虑到小流域尺度的半

方差函数拟合效果也较好以及为了保持研究区地理表面特征,最终选择 3 km 样方尺度和小流域尺度作为本文的分析尺度。

3.2 适宜尺度下土地利用生态风险的空间变异分析

由表 2 可知,3 km 样方尺度和小流域尺度下 2000 年、2010 年、2020 年半变异函数最优拟合模型均为指数模型。这两个尺度下各年拟合结果的决定系数 R^2 均较高,且残差 RSS 均较小,表明各年拟合效果均较好。观察各年最佳拟合参数中的块金值 C_0 ,不论是 3 km 样方尺度还是小流域尺度,均为 2010 年 C_0 值最小、2020 年 C_0 值最大,表明 2020 年土地利用生态风险的空间异质性受到随机因素的影

响程度较强。两个尺度下基台值在 2000—2020 年均逐渐降低,表明土地利用生态风险的空间变异程度有所减弱, $C+C_0$ 变化不大说明结构趋于稳定。两个尺度下结构方差和基台值的比值 $C/(C+C_0)$ 均为 2010 年最大,且 2000 年和 2010 年的 $C/(C+C_0)$ 均达 80% 以上,表明研究区土地利用生态风险的空间异质性受随机部分因素影响较小,以结构性因素影响为主,也反映该区域土地利用生态风险的空间自相关性较强;2010—2020 年,两个尺度的 $C/(C+C_0)$ 均明显下降,说明随机因素对土地利用生态风险的影响逐渐增强。两个尺度下 2000 年变程 A 均最大,表明该年研究区土地利用生态风险的空间相关性的作用范围较大。

表 2 2000—2020 年土地利用生态风险指数半变异函数模型拟合结果
Table 2 Land use ecological risk index semi-variance function model fitting results for 2000—2020

尺度	年份	最优拟合模型	C_0	$C+C_0$	$C/(C+C_0)$	A/m	R^2	RSS
3 km 样方尺度	2000	指数模型	1.92×10^{-4}	1.12×10^{-3}	0.829	32400	0.829	9.78×10^{-8}
	2010	指数模型	1.68×10^{-4}	1.02×10^{-3}	0.835	28500	0.706	3.51×10^{-8}
	2020	指数模型	2.84×10^{-4}	1.10×10^{-3}	0.742	27500	0.939	7.75×10^{-9}
小流域尺度	2000	指数模型	2.28×10^{-3}	1.42×10^{-2}	0.839	24900	0.617	1.26×10^{-7}
	2010	指数模型	2.08×10^{-3}	1.39×10^{-2}	0.850	20100	0.876	5.84×10^{-8}
	2020	指数模型	2.71×10^{-3}	1.16×10^{-2}	0.767	20400	0.853	3.66×10^{-8}

3.3 土地利用生态风险空间自相关分析

3.3.1 全局空间自相关分析 根据公式(8)计算各年两个尺度下土地利用生态风险的全局 Moran's I 值和相关指标(表 3)。由表 3 可知,两个尺度下各年的全局 Moran's I 值均显著为正,说明 2000—2020 年珠三角土地利用生态风险整体呈现正空间集聚模式,即高一高值集聚、低—低值集聚。3 km 样方尺度下全局空间正相关性整体比小流域尺度下更强;相较于 2000 年、2010 年两个尺度下的全局 Moran's I 值小幅上升,说明 2000—2010 年两个尺度下的这种正空间集聚程度均略微增强。但 2020 年两个尺度下的全局 Moran's I 值又略有下降,说明 2010—2020 年两个尺度下的这种正空间集聚程度趋于减弱。

表 3 3 km 样方尺度和小流域尺度下土地利用生态风险的全局 Moran's I 和相关指标

Table 3 Global Moran's I and related indicators of land use ecological risk at the 3 km quadratic scale and small watershed scale

尺度	年份	Moran's I	Z 得分	p 值
3 km 样方尺度	2000	0.575	59.452	0.001
	2010	0.588	60.037	0.001
	2020	0.571	83.144	0.001
小流域尺度	2000	0.375	39.217	0.001
	2010	0.388	36.908	0.001
	2020	0.367	34.948	0.001

3.3.2 局部空间自相关分析 利用公式(9)计算各年两个尺度下各单元土地利用生态风险值的局部 Moran's I 值,然后借助 ArcGIS 软件空间化得到局部空间集聚格局演化图(图 1)。研究期内,两个尺度下研究区大部分评价单元土地利用生态风险的局部空间结构变化较小,高一高集聚和低—低集聚单元相对较多且表现相对突出。高一高集聚区主要集中在较高风险和高风险区域,其主要地类为耕地和水域等,但其面积随着时间推移有减少趋势,说明土地利用生态风险有一定程度的减弱趋向;低—低集聚区主要集中分布在研究区中部,其土地利用类型较单一、多为建设用地,同时该集聚区有向外扩散趋向;低—高集聚区零星分布于高一高集聚区周围,主要地类为耕地和草地等;高一低集聚区零星分布于低—低集聚区周围,主要地类为建设用地和耕地,建设用地的景观脆弱度水平较低、内部结构稳定,对减轻土地利用生态风险值有一定作用。低—高和高—低集聚区零星分布且无多大变化,说明研究期内区域土地利用生态风险的空间异质区域并未发生剧烈的变动,区域内土地利

3.4 土地利用生态风险的时空变化分析

前文已证明 3 km 样方尺度和小流域尺度下 3 个年份的土地利用生态风险指数均具有显著的空间自相关性,因此可利用克里金法进行空间化插值。由

于两个尺度下划分的评价单元大小不同,生态风险指数值计算结果相差较大,但两个尺度的计算结果是相对的而不影响生态风险等级对比分析。为方便对比各年土地利用生态风险空间分布状况,采用自然断裂点法将两个尺度下的插值结果均划分为5个等级,其中3 km样方尺度下插值结果划分为低风险区($ERI < 0.065$)、较低风险区($0.065 \leq ERI < 0.086$)、中风险

区($0.086 \leq ERI < 0.112$)、较高风险区($0.112 \leq ERI < 0.150$)、高风险区($0.150 \leq ERI < 0.230$)。小流域尺度下的等级划分为低风险区($ERI < 0.0062$)、较低风险区($0.0062 \leq ERI < 0.0083$)、中风险区($0.0083 \leq ERI < 0.0106$)、较高风险区($0.0106 \leq ERI < 0.014$)、高风险区($0.014 \leq ERI < 0.024$)。最终得到3个年份土地利用生态风险等级空间格局图(图2)。

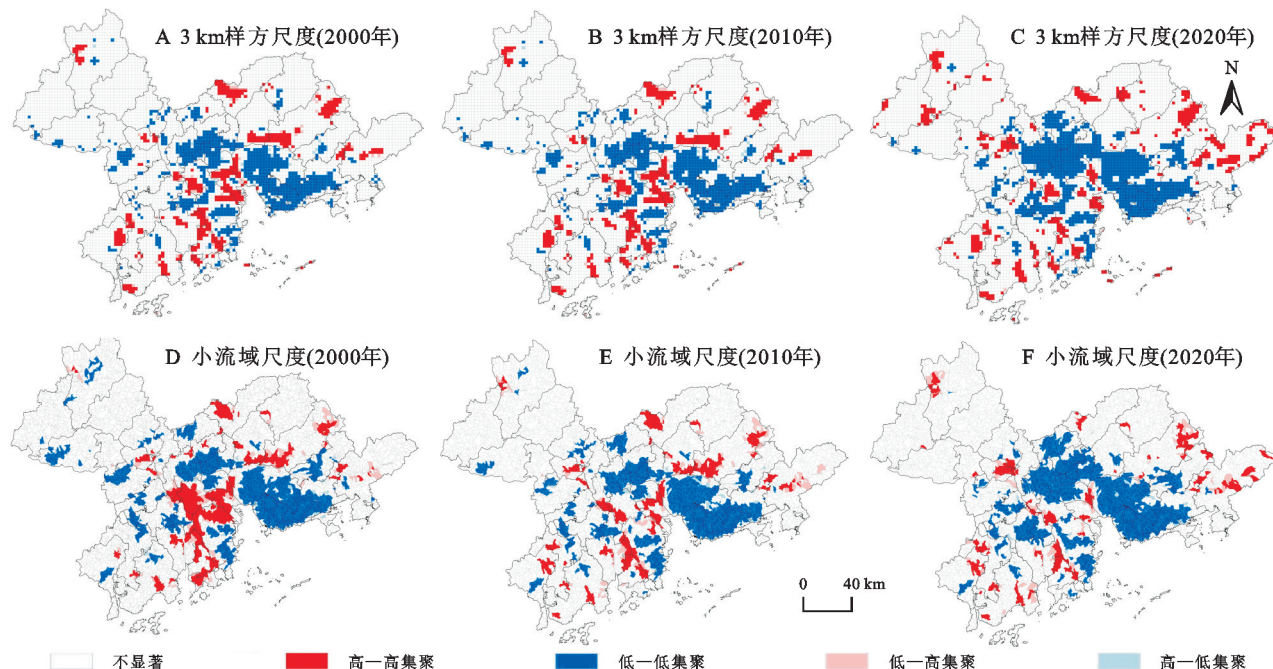


图1 3 km样方尺度和小流域尺度下土地利用生态风险的局部空间集聚格局演化

Fig. 1 Evolution of localized spatial agglomeration patterns of land use ecological risks at the 3 km quadratic scale and small watershed scale

从图2可以看出,3 km样方尺度和小流域尺度下的土地利用生态风险值的空间分布状况比较相似,都随着时间的推移,总体风险程度有所降低。研究区大多都以低风险和较低风险等级为主,主要分布在珠三角的中部、西部和北部地区,包括广州市中心城区、东莞、深圳、肇庆和佛山等地区;低风险区的土地利用类型主要是景观脆弱度较低的建设用地,且有向其周边扩张的趋势;较低风险区主要分布在研究区边缘的山地和丘陵地区,且集中在有大片林地的区域;中风险区散布于整个研究区,其范围从2000—2020年逐渐缩小,以耕地、林地和草地类型为主;较高风险区和高风险区分布范围相对较少,且两个尺度下均有收缩趋势,主要分布在顺德区、南沙区、从化区、博罗县、中山市北部以及珠海市南部的斗门区和金湾区等地。研究区中部的较低和低风险区域范围向外扩张,面积增加,与建设用地集中分布区域有所吻合,而建设用地从碎片化逐渐演变为有序规模模式,能够降低损失程度,对于降低生态风险有较大作用。研究区内较高

和高风险区的主要土地利用类型以耕地、草地、水域和碎片化的建设用地等为主,由于耕地和水域的景观脆弱度较大,且耕地、草地与零碎小斑块的建设用地交错分布在一起会造成景观破碎度增加,同时这些区域的人类活动较为频繁,其原有景观的完整性遭到人为破坏,受到的外界干扰程度较大,导致生态风险值相对较高。

由表4可知,3 km样方尺度下2000年和2010年以较低风险区和中风险区为主,面积占比分别为70.67%,69.79%;2020年较低风险区和低风险区占主导,面积占比达到75.88%。2000—2020年,土地利用生态风险值变化总体趋于降低,表现在较低和低风险区范围变大,其中低风险区的面积增加幅度达到了8.91%;而中等风险以上区域范围均呈缩小态势,中风险区面积减少10.06%,较高风险区面积减少4.51%。小流域尺度下,2000年、2010年、2020年研究区主导风险区均为较低风险和低风险区,面积占比均达67%以上,最高达到72.98%。2000—2020年,土地利用生态风险值变化同样

趋于降低,最主要表现为低风险区面积增幅达到了 13.63%,中风险区面积减少 8.08%,较高风险区面积减少 4.97%;2000—2010 年的土地利用生态风险变化幅度比 2010—2020 年变化幅度较小,尤其是低风险区面积增加了 11.11%,整体表现出风险降低的趋势。研究区整体的土地利用生态风险值有所降低,原因在于珠三角地区加快产业升级转换,以节约集约用地为原

则,大力开展“三旧”改造工程,以提高土地利用集约程度,同时落实耕地保护与生态建设有机结合,优化土地利用结构和布局,促进区域经济生态协调发展。

总体上,两个尺度下研究期内土地利用生态风险均逐渐减弱,且生态风险等级在 2000—2010 年变化幅度较小而 2010—2020 年变化幅度较大,其中低风险区的面积增加幅度最大,而中风险区面积减少幅度最大。

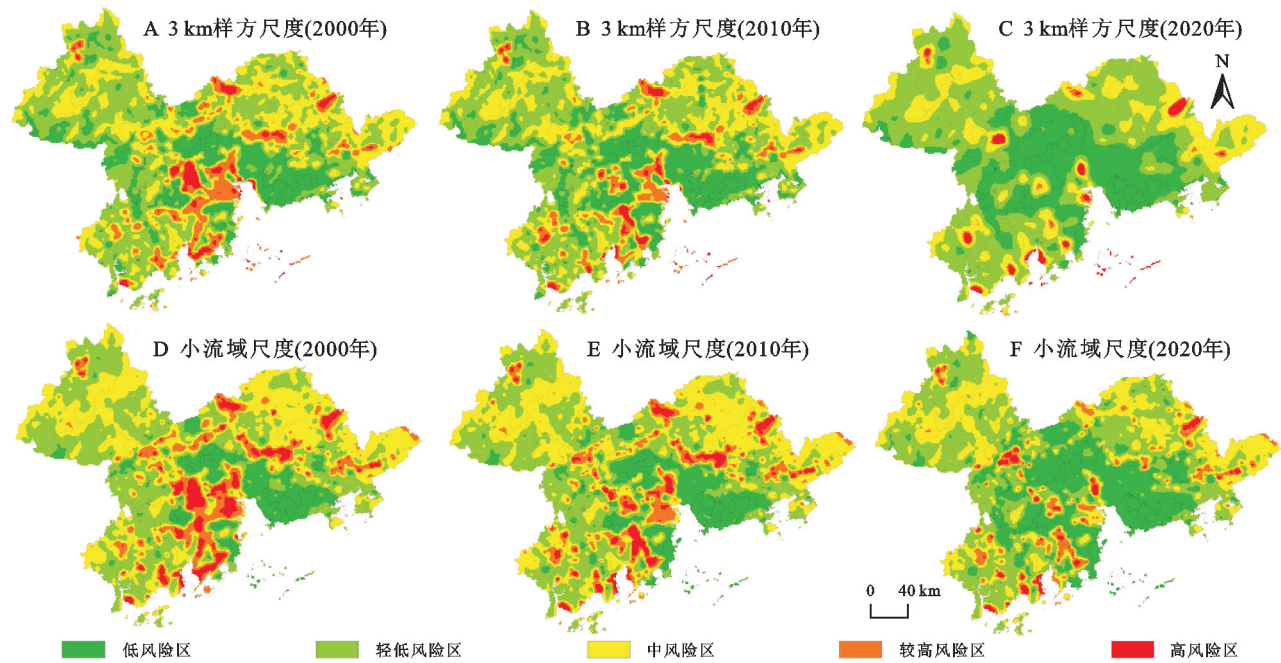


图 2 2000—2020 年 3 km 样方尺度和小流域尺度下的研究区土地利用生态风险空间格局

Fig. 2 Spatial patterns of land use ecological risks in the study area at the 3 km quadratic scale and small watershed scale in 2000—2020

表 4 2000—2020 年 3 km 样方尺度和小流域尺度下的土地利用生态风险等级面积和比例

Table 4 Area and proportion of land—use ecological risk classes at the 3 km quadratic scale and small watershed scale in 2000—2020

尺度	生态风险等级	2000 年		2010 年		2020 年	
		面积/km ²	百分比/%	面积/km ²	百分比/%	面积/km ²	百分比/%
3 km 样方尺度	低风险区	10154.60	18.78	11896.17	22.01	14969.89	27.69
	较低风险区	22215.76	41.10	22414.36	41.46	26051.80	48.19
	中风险区	15987.34	29.57	15316.68	28.33	10548.74	19.51
	较高风险区	4482.26	8.29	3498.42	6.47	2044.06	3.78
	高风险区	1219.10	2.26	934.95	1.73	446.09	0.83
小流域尺度	低风险区	6503.54	12.03	7863.84	14.55	13866.63	25.66
	较低风险区	19881.89	36.79	19867.85	36.76	21365.43	39.53
	中风险区	19499.70	36.08	19571.46	36.22	15131.77	28.00
	较高风险区	5583.15	10.33	4835.93	8.95	2896.88	5.36
	高风险区	2578.64	4.77	1903.17	3.52	781.55	1.45

4 讨论与结论

(1) 研究期内,珠三角地区土地利用生态风险分析的最佳尺度是 3 km 样方尺度,小流域尺度也较为合适。

这两个尺度下,土地利用生态风险的空间异质性均以结构性因素影响为主且存在较强的空间自相关性,而在 2020 年随机因素引起的空间变异程度略有加强。

(2) 总体上研究区土地利用生态风险具正空间集

聚特征,两个尺度下2010年的土地利用生态风险全局正空间集聚程度均比其他两年略强;而局部空间集聚格局变化不大,高一高集聚和低—低集聚单元较多且表现相对突出,分别集中在高风险区和低风险区位置;低—高集聚和高—低集聚区零星分布且变化较小。

(3) 研究期内研究区土地利用生态风险以低风险和较低风险等级为主,整体上逐渐减弱,并且2010—2020年生态风险减少幅度较大。两个尺度下生态风险空间分布格局较为相似,低风险和较低风险区范围均逐渐扩大,以集中分布的建设用地和林地两种地类为主;中风险、较高风险和高风险区范围均逐渐缩小,以耕地、草地和水域为主。由于珠三角地区持续推出了一系列优化土地利用结构政策及生态保护措施,该地生态风险得到一定的控制。

基于以上结论,本文的政策启示表现在:对于低等级土地利用生态风险区,应持续全面推进节约集约建设用地政策,并加强实施重要生态功能保护区和生态安全屏障功能区等生态修复工作;对于中、高等级土地利用生态风险区,应适当调整土地利用管理措施,提高土地集约利用水平,以增强生态系统结构稳定性。同时应合理配置生产、生活和生态空间区域,在加强耕地保护、守好耕地红线的前提下巩固退耕还林等政策成果,并划定生态保护区和生态缓冲区等措施来缓解土地利用生态风险压力,优化国土空间布局以促进区域可持续发展。

本文利用多个景观指数构建土地利用生态风险评价模型,借助空间统计方法和GIS空间分析技术,揭示了珠三角地区土地利用生态风险的时空变化特征,并得到需要关注的重点区域和潜在的风险区域,研究结果可为区域国土空间优化利用和生态风险管控指明方向。但是,本文仍存在一些后续需进一步完善的地方:首先,本文主要从土地利用视角探讨生态风险,而区域生态风险演替过程较为复杂,其影响因素众多,未来可考虑将风险源等相关生态因素纳入研究中,使生态风险研究更丰富和全面;其次,在划分不同土地利用生态风险等级时主要参考前人的方法,目前还没有统一的标准来确定生态风险等级,对于不同区域的研究结果可比性不强,这需要进一步深入研究。

参考文献:

[1] Zou T H, Zhang J Q, Yoshino K. Ecological risk assessment of land use change in the Northeast China: A case study of Linjiang area[J]. Journal of Environmental Protection and Ecology, 2016,7(4):312-315.

- [2] 陈斌,徐尚昭,周阳阳,等.基于土地利用变化的江汉平原景观生态风险时空分异特征分析[J].水土保持研究, 2022,29(5):228-234,243.
- Chen B, Xu S Z, Zhou Y Y, et al. Assessment of landscape ecological risk in Jiangnan Plain Area based on land use change[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(5):228-234,243.
- [3] 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.
- [4] 汪翡翠,汪东川,张利辉,等.京津冀城市群土地利用生态风险的时空变化分析[J].生态学报,2018,38(12):4307-4316.
- Wang F C, Wang D C, Zhang L H, et al. Spatiotemporal analysis of the dynamic changes in land use ecological risks in the urban agglomeration of Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(12):4307-4316.
- [5] 杜军,赵胜朝,邱士可,等.2000—2015年豫西黄土丘陵区土地利用变化及景观生态风险评价[J].水土保持研究,2021,28(1):279-284,291.
- Du J, Zhao S C, Qiu S K, et al. Land use change and landscape ecological risk assessment in loess hilly region of western Henan Province from 2000 to 2015 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021,28(1):279-284,291.
- [6] 孙天弘,雷平.国内土地利用生态风险研究进展[J].资源与产业,2019,21(1):95-104.
- Sun T H, Lei P. Research advances in ecological risks of land use in China[J]. Research & Industries, 2019,21(1):95-104.
- [7] 徐羽,钟业喜,冯兴华,等.鄱阳湖流域土地利用生态风险格局[J].生态学报,2016,36(23):7850-7857.
- Xu Y, Zhong Y X, Feng X H, et al. Ecological risk pattern of Poyang Lake Basin based on land use[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016,36(23):7850-7857.
- [8] 王洁,摆万奇,田国行.土地利用生态风险评价研究进展[J].自然资源学报,2020,35(3):576-585.
- Wang J, Bai W Q, Tian G H. A review on ecological risk assessment of land use [J]. Journal of Natural Resources, 2020,35(3):576-585.
- [9] Karimian H, Zou W, Chen Y, et al. Landscape ecological risk assessment and driving factor analysis in Dongjiang River watershed[J]. Chemosphere, 2022,307:135835.
- [10] Qiao F W, Bai Y P, Xie L X, et al. Spatio-temporal

- characteristics of landscape ecological risks in the ecological functional zone of the upper Yellow River, China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(24):12943.
- [11] 申卫军, 邬建国, 林永标, 等. 空间粒度变化对景观格局分析的影响[J]. *生态学报*, 2003, 23(12):2506-2519.
Shen W J, Wu J G, Lin Y B, et al. Effects of changing grain size on landscape pattern analysis [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(12):2506-2519.
- [12] Wang B, Ding M, Li S, et al. Assessment of landscape ecological risk for a cross-border basin: A case study of the Koshi River Basin, central Himalayas[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 117:106621.
- [13] Ai J, Yu K, Zeng Z, et al. Assessing the dynamic landscape ecological risk and its driving forces in an island city based on optimal spatial scales: Haitan Island, China[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 137:108771.
- [14] 咎旺. 基于土地利用动态变化的区域景观生态风险时空分异研究[D]. 成都: 四川师范大学, 2016.
Zao W. Study on Spatial-temporal Differentiation of Regional Landscape Ecological Risk Based on Land Use Dynamic Change: Take Xichang City as an Example [D]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2016.
- [15] Peng J, Zong M L, Hu Y N, et al. Assessing landscape ecological risk in a mining city: A case study in Liaoyuan City, China[J]. *Sustainability*, 2015, 7(7):8312-8334.
- [16] 常小燕, 李新举, 李西灿, 等. 矿区土地利用生态风险的时空异质性[J]. *生态学报*, 2019, 39(9):3075-3088.
Chang X Y, Li X J, Li X C, et al. Spatial-temporal heterogeneity of ecological risk of land use in mining areas[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(9):3075-3088.
- [17] Xu W, Wang J, Zhang M, et al. Construction of landscape ecological network based on landscape ecological risk assessment in a large-scale opencast coal mine area [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 286:125523.
- [18] 侯蕊, 李红波, 高艳丽. 基于景观格局的武汉市江夏区土地利用生态风险评价[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(1):323-330, 403.
Hou R, Li H B, Gao Y L. Ecological risk assessment of land use in Jiangxia District of Wuhan based on landscape pattern[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(1):323-330, 403.
- [19] 苏浩, 吴次芳. 基于景观结构的农林交错带土地利用生态风险时空分异研究[J]. *经济地理*, 2017, 37(5):158-165.
Su H, Wu C F. Land use eco-risk assessment and its spatio-temporal variation of agroforestry ecotone based on landscape structure [J]. *Economic Geography*, 2017, 37(5):158-165.
- [20] 谢花林. 基于景观结构的土地利用生态风险空间特征分析: 以江西兴国县为例[J]. *中国环境科学*, 2011, 31(4):688-695.
Xie H L. Spatial characteristic analysis of land use eco-risk based on landscape structure: A case study in the Xingguo County, Jiangxi Province[J]. *China Environmental Science*, 2011, 31(4):688-695.
- [21] Zhu Z, Mei Z, Xu X, et al. Landscape ecological risk assessment based on land use change in the Yellow River Basin of Shaanxi, China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(15):9547.
- [22] Zhang W, Chang W J, Zhu Z C, et al. Landscape ecological risk assessment of Chinese coastal cities based on land use change[J]. *Applied Geography*, 2020, 117:102174.
- [23] Xie H L, Wang P, Huang H S. Ecological risk assessment of land use change in the PoyangLake Eco-economic Zone, China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2013, 10(1):328-346.
- [24] 叶长盛, 冯艳芬. 基于土地利用变化的珠江三角洲生态风险评价[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(19):224-232, 294.
Ye C S, Feng Y F. Ecological risk assessment for Pearl River Delta based on land use change[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(19):224-232, 294.
- [25] Wang R, Cai M, Ren C, et al. Detecting multi-temporal land cover change and land surface temperature in the Pearl River Delta by adopting local climate zone[J]. *Urban Climate*, 2019, 28:100455.
- [26] 王璉. 珠江口近岸土地利用/覆盖变化及其环境生态效应研究[D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2018.
Wang J. Coastal Land Use/land Cover Change and the Ecological Environment Effects in Pearl River Estuary [D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [27] Wang H, Liu X M, Zang F. Spatial-temporal pattern analysis of landscape ecological risk assessment based on land use/land cover change in Baishuijiang National Nature Reserve in Gansu Province, China[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 12(4):54-74.
- [28] 杨庚, 张振佳, 曹银贵, 等. 晋北大型露天矿区景观生态风险时空异质性[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(1):187-198.
Yang G, Zhang Z J, Cao Y G, et al. Spatial-temporal heterogeneity of landscape ecological risk of large-scale open-pit mining area in north Shanxi[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(1):187-198.

- 持研究,2022,29(1):333-338.
- Wen Q, Sun J T, Fan L Y, et al. Evaluation of agricultural soil-water resources carrying capacity (ASWCC) and relation analysis based on entropy weight TOPSIS in Henan Province [J]. Soil and Water Conservation in China, 2022, 29(1): 333-338.
- [10] 连海东, 牟舵, 张硕, 等. 基于组合权 TOPSIS 数学模型的地表水水质评价[J]. 人民珠江, 2021, 42(8): 85-92.
- Lian H D, Mou D, Zhang S, et al. Evaluation of surface water quality based on combined Weight-TOPSIS mathematical model[J]. Pearl River, 2021, 42(8): 85-92.
- [11] 雷勋平, Qiu R, 刘勇. 基于熵权 TOPSIS 模型的区域土地利用绩效评价及障碍因子诊断[J]. 农业工程学报, 2016, 32(13): 243-253.
- Lei X P, Qiu R, Liu Y. Evaluation of regional land use performance based on entropy TOPSIS model and diagnosis of its obstacle factors[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(13): 243-253.
- [12] 舒小林, 高应蓓, 张元霞, 等. 旅游产业与生态文明城市耦合关系及协调发展研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(3): 82-90.
- Shu X L, Gao Y B, Zhang Y X, et al. Study on the coupling relationship coordinative development between tourism industry and eco-civilization city [J]. China Population, Resources and Environment, 2015, 25(3): 82-90.
- [13] 赵俊. 塔里木河流域农业经济发展的多维度分析: 基于灰色关联度模型[J]. 湖北农业科学, 2022, 61(9): 176-179.
- Zhao J. Multidimensional analysis of agricultural economic development in Tarim River Basin: Based on grey relational analysis [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2022, 61(9): 176-179.
- [14] 李斌, 古丽娜尔·吐尔孙, 张志刚, 等. 24 个白蜡品种(系)生长及光合适应性灰色关联度评价[J]. 安徽农业大学学报, 2022, 49(2): 219-226.
- Li B, Gulinaer T E S, Zhang Z G, et al. Evaluation of gay correlation degree on the growth and photosynthetic adaptability of 24 *Fraxinus* varieties (lines) [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2022, 49(2): 219-226.
- [15] 吕荣芳. 宁夏沿黄城市带生态系统服务时空权衡关系及其驱动机制研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- LV R F. Spatial-temporal Associations Among Ecosystem Services and Their Driving Mechanisms: A Case Study in the City Belt Along the Yellow River in Ningxia [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019.
- ~~~~~
- (上接第 431 页)
- [29] Gong J, Cao E J, Xie Y C, et al. Integrating ecosystem services and landscape ecological risk into adaptive management: Insights from a western mountain-basin area, China [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 281(5): 11-18.
- [30] 陈昭, 罗小波, 高阳华, 等. 基于半变异函数的重庆市地表温度空间异质性建模及多尺度特征分析[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(7): 1051-1060.
- Chen Z, Luo X B, Gao Y H, et al. Modeling and multi-scale analysis of the spatial heterogeneity of land surface temperature in Chongqing based on semi-variogram [J]. Journal of Geo-Information Science, 2019, 21(7): 1051-1060.
- [31] 梅志雄, 徐颂军, 欧阳军. 珠三角县域城市潜力的空间集聚演化及影响因素[J]. 地理研究, 2014, 33(2): 296-309.
- Mei Z X, Xu S J, Ouyang J. Spatial agglomeration pattern evolvement and its influencing factors of urban potential at county level in the Pearl River Delta [J]. Geographical Research, 2014, 33(2): 296-309.
- [32] 金贵, 邓祥征, 赵晓东, 等. 2005—2014 年长江经济带城市土地利用效率时空格局特征[J]. 地理学报, 2018, 73(7): 1242-1252.
- Jin G, Deng X Z, Zhao X D, et al. Spatio-temporal patterns of urban land use efficiency in the Yangtze River Economic Zone during 2005—2014 [J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(7): 1242-1252.