

# 基于景观结构的土地利用生态空间特征及风险评估 ——以怀来县为例

于化龙<sup>1</sup>, 陈青锋<sup>2</sup>, 田超<sup>1</sup>, 张杰<sup>2</sup>, 陈亚恒<sup>1,2</sup>

(1. 河北农业大学 资源与环境科学学院, 河北 保定 071000; 2. 河北农业大学 国土资源学院, 河北 保定 071000)

**摘要:**根据怀来县 1995 年、2003 年、2010 年 3 期遥感解译土地利用数据,利用景观损失度指数和景观脆弱度指数构建景观意义上的生态风险指数,应用 Geoda、GS+ 以及 ArcGIS 等软件,将统计学方法与空间统计学方法(空间自相关)相结合,探讨怀来县景观生态风险的空间分布和变化特征。结果表明:研究期间各地类面积变化较为明显,耕地、水域以及未利用地等自然景观面积下降。建设用地和园地面积增加且表现出集中连片趋势,景观破碎度和景观分离度略有下降;整体上,怀来县生态风险呈现明显的圈层结构,主要由怀来县中部逐步向外降低。高生态风险区主要集中于沙城镇、土木镇以及孙庄子乡等地,1995—2003 年生态风险等级上升的面积为 96 698.25 hm<sup>2</sup>。2003—2010 年生态风险上升面积明显减少,但高、较高风险区面积总体上仍趋于上升。研究结果为保障县域土地利用生态安全、制定合理的生态风险管理对策提供决策依据。

**关键词:**土地利用; 景观结构; 空间特征; 生态风险; 怀来县

中图分类号: F301.24

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2016)03-0155-09

## Eco-Spatial Characteristics and Risk Evaluation of Land Use Based on Landscape Structure —Taking Huailai County as An Example

YU Hualong<sup>1</sup>, CHEN Qingfeng<sup>2</sup>, TIAN Chao<sup>1</sup>, ZHANG Jie<sup>2</sup>, CHEN Yaheng<sup>1,2</sup>

(1. College of Land and Resources, Agricultural University of Hebei, Baoding, Hebei 071001, China;

2. College of Resources and Environment Science, Agricultural University of Hebei, Baoding, Hebei 071001, China)

**Abstract:** We built an ecological risk index from the view of the landscape based on landscape damage index and landscape fragile index utilizing the remote sensing images of Huailai County in 1995, 2003 and 2010. With the Geoda, GS+ and ArcGIS, we combined the statistical methods and spatial statistical methods (spatial autocorrelation) to explore the spatial distribution and the characteristic of variation of ecological risk of the landscape in Huailai County. The results showed that the area of each kind of land type varied obviously, while the natural landscapes such as cultivated land, water area and unutilized land declined quickly, on the contrary, the building area and park area increased with a concentrated trend, also the landscape fragile index and the landscape isolation index showed the lower value. On the whole, the ecological risk of Huailai County presented a layer structure with a higher risk in the center, especially in Shacheng Town, Tumu Town and Sunzhuangzi Town, the risks were the highest. The land area with a higher ecological risk was 96 698.25 hm<sup>2</sup> in the period from 1995 to 2003, while the area decreased significantly during the period from 2003 to 2010 with the upward tendency of the area of high risk region and higher risk region on the whole level. The results could provide decision basis for guaranteeing the ecological safety of land use at county level and making the reasonable management strategy of ecological risk.

**Keywords:** land use; landscape structure; spatial characteristics; ecological risk; Huailai County

生态风险评价最初起源于生态环境评价<sup>[1]</sup>,1992 年 EPA 美国环境保护署(U. S Environmental Protection Agency)对生态风险评价作了定义,是评价由于外界因素导致可能发生或正在发生的不利生态影响的过程<sup>[2-3]</sup>。伴随着生态环境的日益恶化,人类对于生态环境保护意识日益提升,时至今日生态风险的研究已经成为国内外学者研究的热点问题之一<sup>[4-6]</sup>。我国生态风险评价起步较晚,研究区域主要集中于生态敏感脆弱区以及各大城市<sup>[7-9]</sup>。评价内容包括流域、土地利用、自然灾害等方面<sup>[10-11]</sup>。研究方法通常运用景观结构指数,通过土地利用类型数据,构建研究区域土地利用生态风险指数,借助地统计学等研究方法,评价土地利用变化所带来的区域生态风险<sup>[12-15]</sup>。例如:许妍等<sup>[13]</sup>从风险源、生境、受体等方面构建了太湖流域生态风险评价技术体系,并对太湖流域分析和评价生态风险的时空演化特征;胡和兵等<sup>[16]</sup>在构建土地利用生态风险指数的基础上,利用 ArcGIS 的空间分析功能,揭示研究区域景观结构对城市化发展进程的响应;张学斌<sup>[17]</sup>等构建生态风险指数对石羊河流域生态风险的时空特征进行分析。这些研究取得了一定的成果,对于区域土地可持续利用具有重要的意义。但现有相关研究中存在一些不足之处:评价过程较多偏重于土地利用生态风险状态分析,不能够深层次地揭示土地利用生态风险时空变化和特征规律;通过地统计方法进行函数拟合时,大多数研究学者人为地根据经验选取拟合变异函数模型,缺乏对于选取最优拟合函数的依据。因此本文尝试将空间统计学分析方法与地统计学分析法相结合,深入探讨景观结构变化等造成土地利用生态风险的空间特征和变化规律,同时将 GS+ 专业地统计软件与 ArcGIS 软件中的地统计分析模块进行结合,对数据进行探索性空间数据分析,以弥补变异函数模型选择的主观性。

怀来县地处河北省张家口市,紧邻首都北京,成为防护北京周边生态环境的重要战略点,但随着其城市化进程快速发展,建设用地逐渐增多,耕地资源锐减,生态风险持续增加。因此本文以河北省怀来县为研究区,从景观结构的角度出发,基于遥感数据,利用景观损失度指数和景观脆弱度指数构建景观意义上的生态风险指数,将统计学方法与空间统计学方法(空间自相关)相结合,运用 GeoDa, GS+ 和 ArcGIS 软件完成样本空间聚类,变异函数理论模型的拟合以及风险等级的划分,深入揭示区域生态风险的时空变化特征以及空间分布,以期为该区域城市化进程中制定合理的土地利用及生态环境规划,以确保生态经济协调发展提供理论依据和技术支持。

## 1 研究区概况

怀来县位于河北省西北部,张家口市东南部,地处冀西北山地,燕山山脉的西南端,东经  $115^{\circ}16' - 115^{\circ}58'$ ,北纬  $40^{\circ}4' - 40^{\circ}35'$ ,总面积为  $1\,782\text{ km}^2$ 。全县南北群山起伏,两山之间形成盆地,中部较为平坦,平均海拔为  $792\text{ km}$ ,温带大陆性季风气候,年平均降水量为  $413.3\text{ mm}$ 。怀来县境内河流穿行,拥有 3 条海河水系,包括桑干河、永定河、洋河以及 14 条 3 级河道。水资源及植被较为充足。全县总人口  $34.6$  万人,其中农业人口  $24.1$  万人,非农业人口  $10.5$  万人,分别占总人口的  $70.83\%$  和  $29.17\%$ ,全县平均人口密度  $192.1\text{ 人/km}^2$ ,人口自然增长率  $6.24\%$ 。

根据全县土地二次调查数据及土地变更数据,2010 年怀来县土地利用现状总面积  $178\,232.1\text{ hm}^2$ ,耕地面积为  $22\,677.1\text{ hm}^2$ ,占全县土地总面积  $12.72\%$ ,主要分布在土木镇、存瑞镇、沙城镇、大黄庄镇、东花园镇和西八里镇等乡镇;园地面积为  $31\,144.5\text{ hm}^2$ ,占全县面积的  $17.47\%$ ;林地面积为  $44\,545.6\text{ hm}^2$ ,占全县面积的  $24.99\%$ ;建设用地  $17\,433.5\text{ hm}^2$ ,占全县土地总面积的  $9.78\%$ ;自然保留地面积为  $50\,966.1\text{ hm}^2$ ,占全县土地总面积的  $28.60\%$ ;水域面积为  $8\,535.3\text{ hm}^2$ ,占全县土地面积的  $4.79\%$ 。

近年来,怀来县由于其地理位置优越,自然资源丰富,紧邻北京市,被划入“环首都经济圈”,全县经济快速发展,城镇化速度加快,农用地转出严重,导致大量耕地流失,同时工业化速度加快,工矿企业大量涌现,给周边环境带来了严重的影响,生态用地的生态功能降低,县域生态环境呈恶化趋势。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源与处理

基于成像时间为 1995 年 10 月、2003 年 10 月和 2010 年 8 月怀来县 Landsat-TM 影像数据,轨道号为 122/33 成像质量好,平均云量  $0\%$ 。用几何精校正及配准的  $1:5$  万土地利用现状图及其矢量化数据,对影像进行配准。采用遥感多波段数据融合获取土地利用信息,通过相关性及统计分析,确定最佳波段影像组合为 TM3(B)、4(G)、7(R)合成假彩色方案。根据建立的土地利用地表景观解译标志,矢量化栅格数据,编码土地利用类型,建立拓扑关系,生成土地利用类型属性库和图形库。利用 Envi 4.7 软件的分类监督功能解译出 3 期怀来县土地利用现状图。参照《全国土地分类》将研究区土地分为耕地、园地、林地、建设用地、水域和未利用地 6 种类型。在 3 个时期的遥感影像分类结果上分别随机选取 300 个检查点,通过实地调查、参考

同年的土地利用图和地形图获取检查点的实际土地利用类型,然后在 Envi 4.7 软件的支持下计算混淆矩阵和 Kappa 指数,对遥感影像的解译结果进行精度检验,得出遥感影像解译精度评价结果,计算得出 Kappa 指数分别为 0.84(1995 年)、0.84(2003 年)和 0.85(2010 年),3 个时期遥感影像解译的总体精度都达到了 80% 以上,满足本文研究的需要。

## 2.2 研究方法

**2.2.1 风险小区划分** 本文采用等间距系统采样法将研究区划分为 215 个风险小区,大小为 3 km×3 km (图 1),以风险小区为单元计算每个小区的综合生态风险指数,以此作为每个小区中心点的生态风险值,实现生态风险指数的空间化处理。

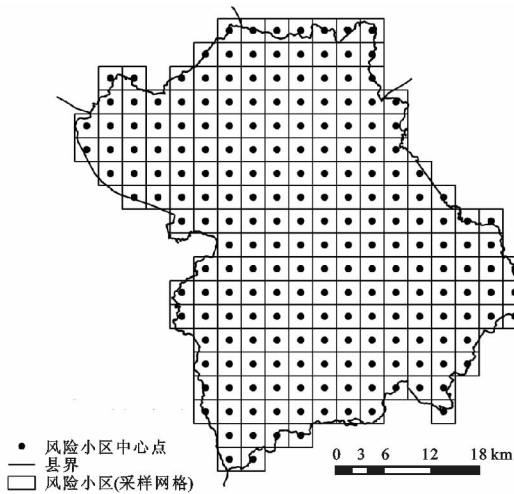


图 1 怀来县生态风险小区划分

**2.2.2 土地利用生态风险指数** 区域内生态风险反映区域生态系统抵抗外部干扰以及内部自我协调能力,不同土地利用类型(景观)抵抗外界干扰能力不同,同时在促进景观结构的自然演替、完善整体功能与结构、维持生物多样性等方面存在差异<sup>[16,18-19]</sup>。本研究从区域生态系统的景观结构出发,选取能够度量 and 反映生态系统过程和概念的景观格局指标,如景观破碎度、分离度、优势度、干扰度、脆弱度以及损失度<sup>[20-24]</sup>构建综合土地利用景观生态风险指数,将景观结构转化为空间化的生态风险变量,分析怀来县土地利用景观生态风险大小及变化情况。其中景观干扰度指数  $E_i = aC_i + bN_i + cD_i$ ,破碎度指数  $C_i = \frac{n_i}{A_i}$ ,分离度指

数  $N_i = \frac{A}{2A_i} \sqrt{\frac{n_i}{A}}$ ,优势度指数  $D_i = \frac{Q_i + M_i}{4} + \frac{L_i}{2}$ ,损失度指数  $R_i = E_i F_i$ ,  $a, b, c$  为相应各景观指数的权重,且根据分析权衡,并结合前人研究成果,破碎度指

数最为重要,其次为分离度指数和优势度指数,以上 3 种指数分别赋以 0.5, 0.3, 0.2 的权值。景观脆弱

度指数  $F_i$  针对研究区实际情况,在借鉴他人研究成果的基础上,针对研究区实际情况,采用专家打分法分别对 6 种景观类型赋值,然后进行归一化处理,得到各景观类型的脆弱度指数。

土地利用生态风险指数 ERI 的计算公式为:

$$ERI_i = \sum_{k=1}^N \frac{A_{ki}}{A_k} R_i \quad (1)$$

式中:  $ERI_i$ ——第  $i$  个风险小区的土地利用生态风险指数;  $N$ ——景观类型的数目;  $A_{ki}$ ——第  $k$  个风险小区内第  $i$  类土地利用类型的面积;  $A_k$ ——第  $k$  个风险小区的面积;  $R_i$ ——第  $i$  类土地利用景观类型的损失度指数。

### 2.2.3 空间统计分析方法

(1) 空间自相关分析法。空间自相关是空间统计学研究中的一个重要方法,是指一些变量在同一空间中,某区域观测值与周围观测值之间的潜在依赖关系,从而分析这些区域在空间上分布的特性。本文运用 Geoda 0.9.5i(beta) 软件通过全局空间自相关 Moran's  $I$  指数(是对属性值在整个区域的是否具有聚集特征)和局部空间自相关 LISA(揭示局部直至每个空间单元的空间自相关性质)分析土地利用生态风险指数能够可视化空间格局<sup>[19,22,25]</sup>。

Moran's  $I$  计算公式如下:

$$I = \frac{n}{S_0} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad i \neq j \quad (2)$$

式中:  $n$ ——研究单元总个数;  $(x_i - \bar{x})$ ——第  $i$  个单元上的属性值与平均值之间的偏差;  $w_{ij}$ ——权重;  $W_{ij}$ ——研究对象  $i, j$  之间的空间连接矩阵,表示空间单元间潜在相互作用的力量。  $S_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}$  为空间权重矩阵(根据研究情况采用 K-nearest 权重,以距离确定是否相邻,且保证每个分析单元有 7 个相邻居)。Moran's  $I$  接近 1 或 -1 时,表示空间自相关的程度强烈;接近 0 时,则表明属性值呈现随机分布且不存在空间自相关现象。

局部指标 LISA 公式为:

$$LISA_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2 / n} \sum_j W_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad i \neq j \quad (3)$$

式中:  $x_i, x_j$ ——各单元观测值;  $\bar{x}$ ——平均值;  $w_{ij}$ ——权重,  $w_{ij}$  确定的方法与全局自相关中方法相同。通过绘制置信水平 0.05 下的 LISA 分布图,体现区域周围 HH, LL 等空间集聚现象。

(2) 半方差分析法。变异函数即半方差函数,反映了不同距离观测值之间的变化<sup>[17,22]</sup>。土地利用生态风险指数作为一种典型的区域化变量,在空间上的

异质性规律,通过半方差分析体现。

$$\gamma(h)=\frac{1}{2N(h)}\sum_{i=1}^{N(h)}[Z(x_i)-Z(x_i+h)]^2 \quad (4)$$

式中: $h$ ——样点间空间分隔距离; $N(h)$ ——研究区内间隔为  $h$  的点对数; $Z(x_i), Z(x_i+h)$ ——土地利用风险指数在空间位置  $x_i$  及点  $x_i+h$  的观测值。

2.3 土地利用生态风险可视化表达

根据调查数据,可计算 1995 年、2003 年、2010 年土地利用生态风险指数,运用 GS+专业地统计软件实现土地利用生态风险半变异函数拟合,在此基础上

运用 ArcGIS 中 Kriging 插值法进行空间插值分析,实现土地利用生态风险的空间可视化,最终绘制生态风险等级图,直观反映怀来县生态风险空间分布。

3 结果与分析

3.1 怀来县景观指数变化

利用 ArcGIS 的 Patch Analyst 扩展模块功能,提取各类土地利用类型的斑块数目及面积,通过公式计算后,得到怀来县 1995 年、2003 年、2010 年各土地利用类型的景观格局指数(表 1)。

表 1 怀来县土地利用类型景观格局指数

土地利用类型	年份	斑块数目/个	面积/hm <sup>2</sup>	破碎度	分离度	优势度	干扰度	脆弱度	损失度
耕地	1995	916	31853	0.0288	0.2006	0.2767	0.1299	0.1905	0.0247
	2003	5746	40240	0.1428	0.3976	0.4339	0.2775	0.1905	0.0529
	2010	906	13461	0.0673	0.4719	0.1877	0.2128	0.1905	0.0405
园地	1995	4282	28256	0.1515	0.4888	0.4019	0.3028	0.1429	0.0433
	2003	3256	15344	0.2122	0.7850	0.2824	0.3981	0.1429	0.0569
	2010	4114	43232	0.0952	0.3131	0.4250	0.2265	0.1429	0.0324
林地	1995	1277	49892	0.0256	0.1512	0.3343	0.1250	0.0952	0.0119
	2003	1159	42603	0.0272	0.1687	0.2751	0.1192	0.0952	0.0114
	2010	1568	53637	0.0292	0.1558	0.3658	0.1345	0.0952	0.0128
建设用地	1995	2748	7293	0.3768	1.5173	0.3033	0.7043	0.0476	0.0335
	2003	2113	9007	0.2346	1.0773	0.2583	0.4921	0.0476	0.0234
	2010	4306	16127	0.2670	0.8587	0.3536	0.4618	0.0476	0.022
水域	1995	124	8999	0.0138	0.2612	0.0909	0.1034	0.2381	0.0246
	2003	75	5242	0.0143	0.3487	0.0670	0.1252	0.2381	0.0298
	2010	34	4526	0.0075	0.2719	0.0611	0.0975	0.2381	0.0232
未利用地	1995	2796	51933	0.0538	0.2149	0.4371	0.1788	0.2857	0.0511
	2003	4397	65795	0.0668	0.2127	0.4857	0.1944	0.2857	0.0555
	2010	3474	47167	0.0737	0.2637	0.4287	0.2017	0.2857	0.0576

如表 1 所示,1995—2010 年研究区各地类面积变化较为明显,但林地和未利用地一直为研究区的基质景观类型,林地面积不断增大,未利用地减少。园地与建设用地面积均增加,且园地增加较为明显,由 1995 年的 28 256 hm<sup>2</sup> 增加到 43 232 hm<sup>2</sup>,耕地和水域面积减少更为显著。建设用地和未利用地的斑块数目由 1995 年的 2 748 个、2 796 个增加到 2010 年的 4 306 个、3 474 个,增加较为明显,但与建设用地不同的是,未利用地面积减少且其景观破碎度和景观分离度逐渐增大,表明未利用地逐渐由大斑块集中连片转变为小斑块随机分布,这与近年来未利用地的开发整理直接相关。建设用地和园地面积增加较为明显,且表现出集中连片趋势,致使其景观破碎度和景观分离度略有下降。耕地斑块数目从 1995 年的 916 个增加至 2003 年的 5 746 个,之后下降到 2010 年的 906 个,斑块数目变化剧烈,同时耕地景观破碎度和

景观分离度等指数变化也较为显著,表明虽然土地开发整理项目的有效实施,在 2003 年耕地面积较 1995 年增加,但伴随着城镇化进程的加速发展,耕地资源破碎化程度加深,其大量转化为建设用地等非耕地类,致使 2010 年耕地面积减少。景观损失度由景观干扰度和景观脆弱度计算而得,未利用地景观损失度最大,耕地景观损失度增加明显由 1995 年的 0.024 7 增加到 2010 年的 0.040 5,其景观损失度仅低于未利用地,主要由于景观面积不断减少,景观优势度下降,干扰度增加,并且其本身的景观脆弱度较高。

3.2 土地利用生态风险度空间聚类分析

参照表 2 中的景观格局指数和土地利用生态风险指数计算公式,核算 1995 年、2003 年和 2010 年怀来县各土地利用生态风险小区生态风险指数,运用 Geoda 空间分析软件,基于 k-nearest 标准空间权重和风险指数数据对怀来县 3 期影像图的 215 个风险

小区进行空间自相关分析,得到 3 期 Moran's  $I$  指数,并且绘制各年度以及 1995—2010 年生态风险指数变化的局部空间自相关 LISA 结果图。通过全局自相关分析,在显著性水平  $p<0.05$  下,怀来县 3 期生

态风险 Moran's  $I$  分别为 0.505 7,0.541 0,0.576 8,空间自相关强烈且表现出增强趋势。表明随着时间的推移,生态风险在空间布局上呈现正相关性,且存在高度相似性,在县域空间 HH 和 LL 聚类表现出增强趋势。

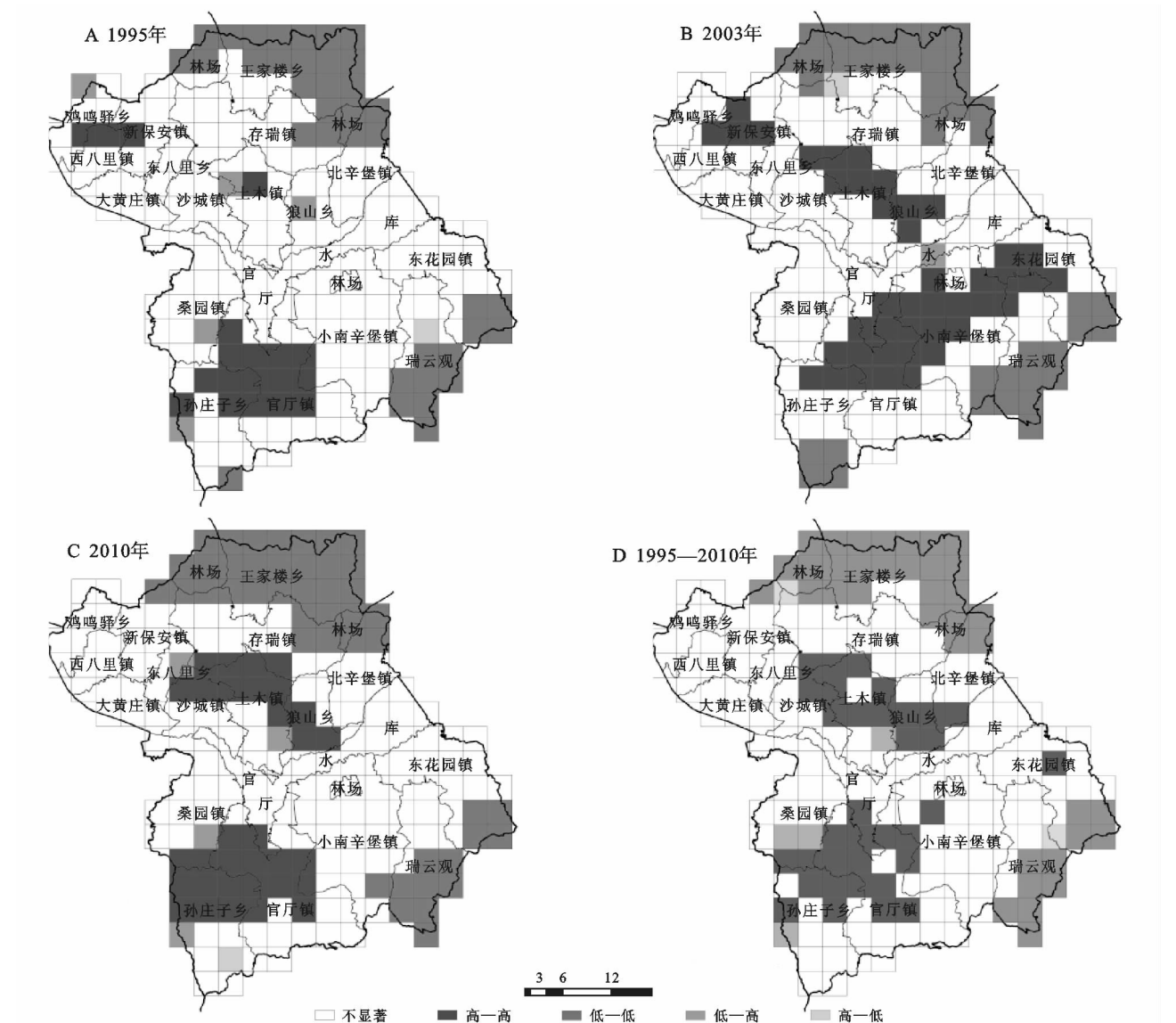


图 2 怀来县生态风险指数变化空间关联局部指标

怀来县在研究期间大部分地区土地利用生态风险度存在显著变化,土地利用生态风险指数较高的区域显著增加,县域生态环境质量下降。分析图 2 中 A,B,C 发生聚集或异常的风险小区从 1995 年的 62 个,占整个研究区风险小区的 28.84%,到 2003 年上升为 85 个,占整个研究区风险小区的 39.53%,而较 2003 年,2010 年发生聚集或异常生态风险小区数量波动较小为 82 个,占整个研究区的 38.14%。变化较显著的区域主要集中于孙庄子乡、官厅镇以及土木镇等地区,在这些地方研究期间生态风险变化较大,相邻区域土地利用生态风险变化较显著,同时相邻地区生态风险度变化也较大。其中,2003 年 HH 聚类(风险高值区)较 1995 年和 2010 年向东花园镇、小南

辛堡镇及林场等周边区域扩张并出现明显的集中连片,并且呈现出较为明显的区域特征。研究期间的 LL 聚类(风险低值区)所占比例波动较小,但 2010 年 LL 聚类(风险低值区)位置较 1995 年有所转移,县域北部潜在低值区减少。LH 和 HL 聚类在研究期间数量较少,其分布较为分散且未呈现区域性,对全局聚类特征影响较小。

由图 2D 可以看出,1995—2010 年怀来县土地利用生态风险指数变化较为明显的区域,主要分布于孙庄子乡、官厅镇、沙城镇、土木镇、狼牙乡、东花园镇以及小南辛堡林场等区域,表明随着经济发展土地开发利用步伐加快,土地利用景观结构被破坏,区域内土地利用生态风险指数显著提升,致使生态系统风险性增加。

### 3.3 土地利用生态风险度的空间分异

为了进一步分析区域土地利用生态风险指数的空间化结构,运用地统计学方法,对怀来县进行土地利用生态风险的空间分异研究。本文通过 ArcGIS 地统计分析模块中 Kriging 法进行怀来县土地利用生态风险空间分异研究,但由于 Kriging 法是以变异函数为基础的,其参数设置和变异函数模型的选择对内插效果影响很大,而 ArcGIS 软件的地统计分析模块受到数据计算限制等原因,本文故将 ArcGIS 和

GS+专业地统计软件结合,运用 GS+对每个生态风险小区的生态风险指数进行探索性空间分析,对变异函数模型客观的选择,弥补变异函数模型选择的主观性<sup>[26]</sup>。

通过对怀来县 1995 年和 2010 年采样数据变异函数的计算,得到两个年度土地利用生态风险指数变异函数的拟合模型及其模型参数(表 2,图 3)。再利用 ArcGIS 软件中的地统计分析模块对所选择的参数和模型进行空间插值分析。

表 2 1995—2010 年土地利用生态风险指数变异函数的拟合模型参数

年份	拟合模型	块金值	基台值	变程	有效变程	块金值/基台值	$r^2$	RSS
1995	指数	0.0079	0.0380	13350	40050	0.208	0.972	$9.780 \times 10^{-6}$
2003	指数	0.0001	0.0407	6170	18510	0.002	0.987	$6.218 \times 10^{-6}$
2010	指数	0.0037	0.0389	9090	27270	0.095	0.984	$7.562 \times 10^{-6}$

通过分析 1995 年、2003 年、2010 年 3 期生态风险数据,运用指数模型拟合最为理想,因此本文选取指数模型分析研究期生态风险度的空间结构。在半变异函数曲线中有 3 个主要参数:块金值、基台值和拱高占基台值的比例。由表 3 可知,怀来县 1995—2010 年土地利用结构特征发生了较大变化。基台值反映土地利用生态风险指数上下波动程度的参数,1995 年、2003 年和 2010 年基台值分别为 0.038,0.040 7,0.038 9,虽然基台值有所上升,但幅度不大,表明怀来县的土地利用生态风险强度在提高,但空间分布差异不大。变程可以反映土地利用生态风险指数的空间相关距离,从

1995—2010 年呈现先下降后上升的趋势,说明人类活动导致土地利用类型之间转化频繁,土地类型区域破碎化。块金方差占总空间异质性变异的大小可由拱高占基台值的比例 $[C/(C_0+C)]$ 来反映,比值较高,说明结构性因素引起的异质性程度大于随机部分引起的空间异质性程度。怀来县拱高占基台值的比例 $[C/(C_0+C)]$ 从 1995 年的 79.2%增加至 2003 年的 99.8%,到 2010 年有所下降为 90.5%,比值相对较大,表明随着怀来县社会经济的快速发展,人类增加了对自然状态的干扰,导致景观结构逐渐趋于破碎,空间异质性逐渐由小尺度的随机变异转变为大尺度的结构变异。

表 3 怀来县生态风险正态分布指数值

年份	最大值	最小值	平均值	中位数	标准差	偏度	峰度
1995	0.74067	0.036653	0.38052	0.38311	0.18003	-0.07812	2.1186
2003	0.81692	0.038683	0.43526	0.43698	0.21422	-0.08584	1.8862
2010	0.82802	0.036947	0.37143	0.35712	0.20098	0.21336	2.0993

利用 ArcGIS 软件的地统计分析模块,发现其大致符合正态分布。从标准差和范围上(表 3),各生态风险小区的景观生态风险指数(ERI), $ERI_{1995} \in [0.036\ 7, 0.740\ 7]$ , $ERI_{2003} \in [0.038\ 7, 0.816\ 9]$ , $ERI_{2010} \in [0.036\ 9, 0.828\ 0]$ 。研究期间风险小区的风险值分布较为集中,且 2003 年平均生态风险指数最高为 0.435 26。1995 年和 2003 年怀来县各生态小区风险值的峰度均 $>0$ ,而偏度值均 $<0$ ,表明各生态风险小区的生态风险值分布比标准正态分布集中,且两个年度各生态风险小区的生态风险值均为左偏分布,风险值小于平均值的风险小区占多数。而 2010 年偏度值均 $>0$ ,表明各生态风险小区的生态风险值均为右偏分布,虽然近年来怀来县实行生态用地保护政策,相比于 2003 年,县域生态环境风险指数下降,生态风险平均值降低,但其风险值大于平均值的风险小区仍

占多数。

基于 GS+专业地统计分析软件,选取 1995 年、2003 年和 2010 年相关参数设置和最优拟合函数指数模型,利用 ArcGIS 地统计分析模块对 3 期土地利用生态风险数据进行空间分析。为了便于比较 3 期数据生态风险空间分布,通过 ArcGIS 软件进行数据处理,发现大致符合生态分布情况,故采用相对指标法进行土地利用生态风险等级划分,具体划分 5 个等级:低生态风险区( $ERI < 0.28$ )、较低生态风险区( $0.28 \leq ERI < 0.38$ )、中生态风险区( $0.38 \leq ERI < 0.48$ )、较高生态风险区( $0.48 \leq ERI < 0.58$ )、高生态风险区( $0.58 \leq ERI$ ),通过选取指数模型,利用 Kriging 法获得怀来县土地利用生态风险等级图(图 3),并统计不同风险等级面积(表 4),对生态风险评价空间分布情况进行直观描述和风险等级空间分析。

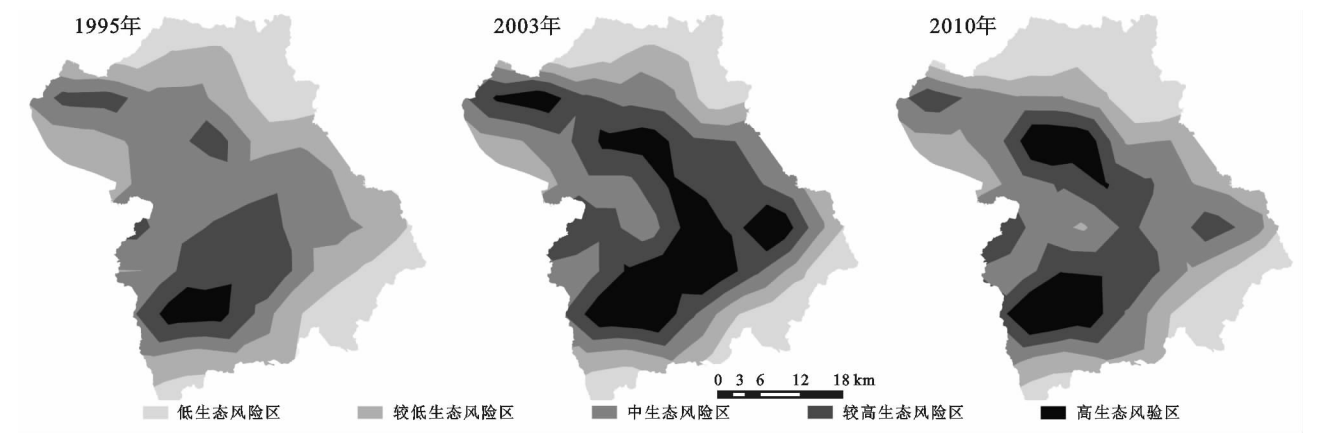


图 3 怀来县生态风险等级分布

表 4 1995—2010 年怀来县生态风险等级面积

等级	1995 年		1990—2003 年		2003 年		2003—2010 年		2010 年	
	面积/hm <sup>2</sup>	百分比/%	面积变化/hm <sup>2</sup>		面积/hm <sup>2</sup>	百分比/%	面积变化/hm <sup>2</sup>		面积/hm <sup>2</sup>	百分比/%
低	30806.01	17.28	—3562.72		27243.29	15.29	8800.15		36043.45	20.22
较低	48693.22	27.32	—22999.83		25693.38	14.42	7340.92		33034.30	18.53
中	65840.64	36.94	—24609.48		41231.16	23.13	17411.32		58642.48	32.90
较高	28550.80	16.02	25365.45		53916.25	30.25	—18518.51		35397.74	19.86
高	4339.49	2.43	25806.58		30146.07	16.91	—15033.89		15112.18	8.48

从怀来县 3 期土地利用生态风险等级空间分布(图 3)可知,整体上,怀来县生态风险呈现明显的圈层结构,主要由怀来县中部逐步向外降低。1995 年高生态风险区集中在官厅镇和孙庄子乡北部;较高风险区主要分布在小南辛堡林场、新保安镇和土木镇等地;低生态风险区则分布于怀来县南部和北部的边缘林地广布地带。相比于 1995 年,2003 年高风险区和较高风险区扩张明显,其他等级风险区均有不同程度减少,扩张方向主要为怀来县西北部沙城镇方向,表明城镇快速发展的同时生态风险也在迅速提升。2010 年相比于 2003 年,怀来县中部地区由高、较高生态风险区逐步降低为中生态风险区,高生态风险主要集中于沙城镇、土木镇以及孙庄子乡等地,同时北部生态风险逐渐降低,低生态风险区略有增加。

由表 4 可知,1995—2003 年,怀来县较高和高生态风险区面积快速增加,其中较高风险区由 28 550.80 hm<sup>2</sup> 增加到 53 916.25 hm<sup>2</sup>,面积百分比由 16.02%增至30.25%;高风险区面积由 4 339.49 hm<sup>2</sup> 增加到 30 146.07 hm<sup>2</sup>,面积百分比由 2.43%增至 16.91%;低、较低、中等风险区范围则逐渐缩小。2003—2010 年则变化与其相反,较高和高生态风险区面积逐渐减少,低、较低、中等风险区面积则逐渐增加;但整体上由 1995—2010 年高生态风险和较高生态风险面积依然处于增加状态。

3.4 生态风险转换分析

运用 ArcGIS 空间叠加分析功能,将两个年度土地利用生态风险等级分布图进行相互叠加,并对其进行各风险等级转化方向和面积进行定量分析(表 5)。

如表 5 所示,1995—2010 年,研究区生态风险等级由高级向低级转换面积为 130.22 hm<sup>2</sup>,而生态风险等级由低级向高级转换面积为 248.70 hm<sup>2</sup>。说明研究区的生态风险程度有下降的趋势,但是整体还处于上升的状态。分阶段来看,1995—2003 年,生态风险等级上升的面积为 96 698.25 hm<sup>2</sup>,占土地总面积的 54.25%。2003—2010 年生态风险等级上升的面积为 10 340.92 hm<sup>2</sup>,研究区生态风险等级呈下降趋势的面积为 77 091.13 hm<sup>2</sup>。对比两个时期风险等级年均转化速率可知,1995—2003 年由高等级向低等级转换速率均高于 2003—2010 年,主要是由于怀来县社会经济发展迅速,不同土地利用类型之间转换频繁,招商引资规模不断扩大,加快了产业结构调整,大量资金涌入在此圈地建厂,但由于缺乏相对适宜的统筹规划,导致开发区的建设数量偏多、开发规模偏大,建设用地扩张迅速,占用了大量的耕地等,使得不同土地利用类型之间转换频繁,为缓解区域耕地资源减少的影响,满足人口数目增加和生活水平提高对粮食产量和质量的需求,人们在县域北部和南部低山丘陵区部分地势比较低缓的坡地及山麓地带毁林、毁草开荒,开垦梯田,种植粮食作物及果树,导致当地景观类型及相应生态风险指数发生改变,县域内生态风险增大;2003—2010 年由低等级向高等级转换速率均高于 1995—2003 年,主要是由于近年来怀来县划定生态红线以及作为环京津重要的生态战略点,在扩大建设用地规模的同时注重环境的保护,加大了植树造林等维护生态环境措施,注重经济发展和生态环境之间的

关系,制定合理的土地利用规划和生态环境规划,同时  
在社会生产方面注重产业结构的调整,发展新能

源,保护自然资源,提高土地的利用率,使得近年来生  
态风险有所下降。

表 5 1995—2010 年怀来县生态风险转移情况

转换类型	1995—2003 年		2003—2010 年	
	转换面积/hm <sup>2</sup>	年均转换速率/(hm <sup>2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	转换面积/hm <sup>2</sup>	年均转换速率/(hm <sup>2</sup> ·a <sup>-1</sup> )
低—较低	6399.92	711.10	2205.35	367.56
较低—低	2837.20	315.24	10615.87	1769.31
较低—中	20423.77	2269.31	2258.74	376.46
较低—较高	6117.64	679.74	0.00	0.00
较低—高	397.88	44.21	0.00	0.00
中—低	0.00	0.00	389.63	64.94
中—较低	376.75	41.86	16390.49	2731.75
中—较高	37950.34	4216.70	2154.59	359.10
中—高	7662.99	851.44	0.00	0.00
较高—较低	0.00	0.00	1619.69	269.95
较高—中	956.82	106.31	29319.33	4886.55
较高—高	17745.71	1971.75	3722.24	620.37
高—中	0.00	0.00	4767.96	794.66
高—较高	0.00	0.00	13988.16	2331.36

由上可知,怀来县生态风险等级总体趋势上升,转变速率越来越快,主要由于人类长期的干扰导致景观结构复杂,各景观类型之间的转换增多。所以在科学研究方面,应注重经济发展和生态环境之间的关系以期制定合理的土地利用规划和生态环境规划;在社会生产方面应注重产业结构的调整,发展新能源,保护自然资源,提高土地的利用率。

4 结论

(1) 空间统计学方法注重相邻区域的生态风险空间分布特性,地统计学方法注重生态风险整体在空间上的异质性规律,将两者进行有效结合,有助于从局部到全局深入探讨景观结构变化等造成土地利用生态风险的空间特征和变化规律。同时在进行地统计分析时,采用 GS+ 专业地统计软件筛选最适拟合变异函数模型,弥补了 ArcGIS 地统计分析拟合函数选择的主观性。该分析方法更具合理性,为研究区域生态风险空间分析提供新的研究思路。

(2) 随着怀来县城市化进程加速发展,建设用地扩张、耕地和水域等面积减少,生态风险程度总体表现出先上升后下降趋势,并呈现明显的圈层结构,风险高值区主要集中于孙庄子乡、官厅镇以及土木镇等周边区域。1995—2003 年生态风险等级上升的面积为 96 698.25 hm<sup>2</sup>,而 2003—2010 年生态风险等级上升的面积为 10 340.92 hm<sup>2</sup>,并且其等级呈下降趋势的面积为 77 091.13 hm<sup>2</sup>,主要由于怀来县近年来划定生态红线以及作为环京津重要的生态战略点,土地生态环境虽逐渐得到改善,部分风险高值区域等级降低,但高、

较高风险区面积总体上仍趋于上升。因此,在未来快速工业化和城镇化的进程中,应注重生态环境和经济发展的协调研究,调整产业结构,制定合理的土地利用及生态环境规划以确保生态经济协调发展。

土地利用景观格局的改变势必会引起区域生态功能的变化,因此从景观结构出发研究生态风险变化,有助于客观反映县域生态风险格局,但怀来县地形起伏,景观结构复杂,本文以均质方式划分生态风险小区,对县域内林地周边、干湿交错地带等敏感区域的生态风险考虑不足,有待进一步研究。

参考文献:

[1] Bartell S M, Gardner R H, O' Neill R V. Ecological risk estimation [J]. Journal of the North American Benthological Society,1993,36(3):324-325.

[2] Norton S B, Rodier D J, Schalie W H V D, et al. Framework for ecological risk assessment[J]. Environmental Toxicology & Chemistry,1992,11(12):1663-1672.

[3] US EPA National Center for Environmental Assessment. Guidelines for ecological risk assessment. EPA/630/R-95/002F[J]. Journal of Object Technology,1998,23(4):501-507.

[4] Verburg P H, Overmars K P, Huigen M G A, et al. Analysis of the effects of land use change on protected areas in the Philippines[J]. Applied Geography,2006,26(2):153-173.

[5] 李谢辉,李景宜. 基于 GIS 的区域景观生态风险分析:以渭河下游河流沿线区域为例[J]. 干旱区研究,2008,25(6):899-903.

[6] 陈利顶,傅伯杰. 黄河三角洲地区人类活动对景观结构的影响分析:以山东省东营市为例[J]. 生态学报,1996



- (4):337-344.
- [7] 陈鹏,潘晓玲.干旱区内陆流域区域景观生态风险分析:以阜康三工河流域为例[J].生态学报,2003,22(4):116-120.
- [8] 卢宏伟,曾光明,谢更新,等.洞庭湖流域区域生态风险评价[J].生态学报,2003,23(12):2520-2530.
- [9] 王娟,崔保山,刘杰,等.云南澜沧江流域土地利用及其变化对景观生态风险的影响[J].环境科学学报,2008,28(2):269-277.
- [10] 孙洪波,杨桂山,苏伟忠,等.沿江地区土地利用生态风险评价:以长江三角洲南京地区为例[J].生态学报,2010,30(20):5616-5625.
- [11] 贾丹.延庆风沙区景观生态风险评价及景观格局优化[D].北京:北京林业大学,2009.
- [12] 高永年,高俊峰,许妍.太湖流域水生态功能区土地利用变化的景观生态风险效应[J].自然资源学报,2010,25(7):1088-1096.
- [13] 许妍,高俊峰,郭建科.太湖流域生态风险评价[J].生态学报,2013,33(9):2896-2906.
- [14] 吴文婕.石羊河流域绿洲水土资源利用生态风险评价研究:以武威市为例[D].兰州:西北师范大学,2012.
- [15] 阳文锐,王如松,黄锦楼,等.生态风险评价及研究进展[J].应用生态学报,2007,18(8):1869-1876.
- [16] 胡和兵,刘红玉,郝敬锋,等.流域景观结构的城市化影响与生态风险评价[J].生态学报,2011,31(12):3432-3440.
- [17] 张学斌,石培基,罗君,等.基于景观格局的干旱内陆河流域生态风险分析:以石羊河流域为例[J].自然资源学报,2014,29(3):410-419.
- [18] 许妍,高俊峰,赵家虎,等.流域生态风险评价研究进展[J].生态学报,2012,32(1):284-292.
- [19] 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.
- [20] 邹桃红.基于土地利用变化的临江市生态风险评价[D].长春:东北师范大学,2012.
- [21] 彭佳捷,周国华,唐承丽,等.基于生态安全的快速城市化地区空间冲突测度:以长株潭城市群为例[J].自然资源学报,2012,27(9):1507-1519.
- [22] 谢花林.基于景观结构和空间统计学的区域生态风险分析[J].生态学报,2008,28(10):5020-5026.
- [23] 傅丽华.基于景观结构的长株潭核心区土地利用生态风险调控研究[D].长沙:湖南师范大学,2012.
- [24] 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.
- [25] 高宾,李小明,李志刚,等.基于景观格局的锦州湾沿海经济开发区生态风险分析[J].生态学报,2011,31(12):3441-3450.
- [26] 吴学文,晏路明.普通 Kriging 法的参数设置及变异函数模型选择方法:以福建省一月均温空间内插为例[J].地球信息科学,2007(3):104-108.

~~~~~

(上接第 154 页)

- [3] Tosun C, Timothy D J, Öztürk Y. Tourism growth, national development and regional inequality in Turkey [J]. Journal of Sustainable Tourism, 2003, 11(2/3):133-161.
- [4] 陈秀琼,黄福才.中国入境旅游的区域差异特征分析[J].地理学报,2006,61(12):1271-1280.
- [5] 陆林,余凤龙.中国旅游经济差异的空间特征分析[J].经济地理,2005,25(3):406-410.
- [6] 王良健,李晶晶,陈锦龙.中国省际旅游业发展演进的时空特征[J].地理科学进展,2010,29(10):1249-1255.
- [7] 程玉申,戴玲丽.浙江省县域旅游经济差异的时空演变分析[J].北京第二外国语学院学报,2015(3):8.
- [8] 陈智博,吴小根,汤澍,等.江苏旅游经济发展的空间差异[J].经济地理,2008,28(6):1064-1067.
- [9] 李秀斌,刘少和,张伟强.旅游发展对县域经济的拉动效应分析:以广东第一“旅游强县”清新县为例[J].热带地理,2008,28(3):271-276.
- [10] 方琰,卞显红.长江三角洲旅游经济差异时空演变分析[J].旅游论坛,2014,7(2):50-56.
- [11] 苏建军.区域旅游经济发展水平非均衡演变的时空差异研究:以山西省为例[J].技术经济,2009,28(7):73-76.
- [12] 李巍,王祖静.甘肃省城市旅游场强的空间格局演化分析[J].干旱区资源与环境,2015(2):034.
- [13] 许学强,周一星,宁越敏.城市地理学[M].北京:高等教育出版社,2003.
- [14] 张志斌,袁寒.西宁城市空间结构演化分析[J].干旱区资源与环境,2008,22(5):36-41.
- [15] 蒋国富,刘长运.河南省县域经济的空间分异[J].经济地理,2008,28(4):636-639.
- [16] 麻永建,徐建刚.基于 ESDA 的河南省区域经济差异的时空演变研究[J].软科学,2006,20(5):51-54.
- [17] 孙奇奇,宋戈,齐美玲.基于主成分分析的哈尔滨市土地生态安全评价[J].水土保持研究,2012,19(1):234-238.
- [18] 潘韬,吴绍洪,何大明,等.纵向岭谷区地表格局的生态效应及其区域分异[J].地理学报,2012,67(1):13-26.
- [19] 王祖静,石培基,李巍.基于路网结构的甘肃省城市服务范围优化研究[J].经济地理,2012,32(9):67-73.