

# 基于景观结构和空间统计学的南昌市景观生态安全评价

袁媛<sup>1,2</sup>, 罗志军<sup>1,2</sup>, 赵杰<sup>1,2</sup>, 齐松<sup>1,2</sup>

(1.江西农业大学 国土资源与环境学院, 南昌 330045; 2.江西省鄱阳湖流域农业资源与生态重点实验室, 南昌 330045)

**摘要:**随着城市化进程快速推进,环境污染、资源短缺和土地利用矛盾等一系列城市通病相继出现,城市生态环境问题日益凸显。分析城市化进程下景观类型变化对区域景观生态安全的影响,对解决城市生态问题、协调区域生态安全至关重要。本研究以江西省南昌市为研究区,基于南昌市 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2017 年遥感影像数据、DEM 等数据,在分析了景观类型变化的基础上,通过构建景观生态安全评价模型,运用地统计学、空间自相关等方法对南昌市景观生态安全进行了评价分析。研究表明:南昌市景观类型以耕地、林地、水域为主,且耕地面积减少了 80 018.72 hm<sup>2</sup>,建设用地面积增加 78 843.51 hm<sup>2</sup>。各时期生态安全指数的最优模型均为球状模型,块金基台比在 25% 左右,存在较强的空间自相关性。景观生态安全水平总体上表现为中部生态安全值较低,四周生态安全值较高的空间格局,集聚现象突出,总体上高值—高值区、低值—低值区的分布与景观生态安全度的分布基本一致。2000—2017 年南昌市景观生态安全指数由 0.632 减少至 0.573,中高安全区面积向中度、中低和低安全区转变,总体上景观生态安全水平呈恶化趋势。研究结果对调控南昌市空间格局、优化区域土地资源利用,保障区域可持续发展具有重要意义。

**关键词:**土地利用;景观生态安全;空间统计;南昌市

中图分类号:F301.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)03-0247-09

## Landscape Ecological Security Evaluation of Nanchang City Based on Landscape Structure and Spatial statistics

YUAN Yuan<sup>1,2</sup>, LUO Zhijun<sup>1,2</sup>, ZHAO Jie<sup>1,2</sup>, QI Song<sup>1,2</sup>

(1.College of Land Resources and Environment, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China;

2.Jiangxi Provincial Key Laboratory of Poyang Lake Basin Agricultural Resources and Ecology, Nanchang 330045, China)

**Abstract:** With the accelerating urbanization process, a series of urban common diseases have emerged one after another, such as environmental pollution, resource shortage, and land use contradictions, and urban ecological environment problems have become increasingly prominent. It is very important to Analyze the impact of changes of landscape types on regional landscape ecological security in the process of urbanization to solve urban ecological problems and coordinate regional ecological security. This study takes Nanchang City of Jiangxi Province as the research area, and based on remote sensing image data of 2000, 2005, 2010, 2015 and 2017, DEM and other data of Nanchang, we analyzed the landscape pattern in Nanchang first, then constructed the landscape ecological security evaluation model, and used geostatistics, spatial correlation analysis and other methods to evaluate and analyze the landscape ecological security of Nanchang City. The results show that the landscape types of Nanchang are mainly cultivated land, forestland and water area, and the cultivated land area has decreased by 80 018.72 hm<sup>2</sup>, while the construction land area has increased by 78 843.51 hm<sup>2</sup>. The results of geostatistical analysis show that the optimal models of landscape ecological security index of Nanchang City from 2000 to 2017 are the spherical model, and the ratio of gold to abutment is about 25%. The landscape ecological security index has strong spatial autocorrelation. The regional landscape ecological security level of Nanchang City had a high positive spatial correlation during the study period, and the high value of landscape ecological safety index was found in the area surrounding Nanchang City, and the low value of landscape ecological safety index was found in the central area of Nanchang City, cluster of the landscape ecological safety index of Nanchang City in each period was significant. And the distributions of high

收稿日期:2019-07-31

修回日期:2019-08-28

资助项目:国家自然科学基金(41961042);教育部人文社会科学研究规划资助项目“基于博弈的城镇用地扩张与生态网络保护空间耦合与优化管控研究”(19YJAZH061);江西省高校人文社科项目(GL18128);江西省教育厅科技项目(GJJ180193)

第一作者:袁媛(1996—),女,江西新余人,硕士研究生,主要从事土地管理方面研究。E-mail:Yyuan118@163.com

通信作者:罗志军(1976—),男,江西新余人,副教授,博士,主要从事土地管理和 3S 应用方面研究。E-mail:luozj10@163.com

value—high value area and low value—low value area are basically consistent with the distribution of landscape ecological security. The landscape ecological security index of Nanchang City decreased from 0.632 in 2000 to 0.573 in 2017, and the areas of middle and high security zones changed to medium, low and low security zones. Overall, the landscape ecological security level showed the deteriorating trend. The results are of great significance for regulating the spatial pattern of Nanchang City, optimizing the utilization of regional land resources, and ensuring the sustainable development of the region.

**Keywords:** land use; landscape ecological security; spatial statistics; Nanchang City

城市是人类在改造和适应自然环境的过程中建立起来的“自然—经济—社会”复合生态系统。随着城市化进程的快速发展,城市景观格局受到愈来愈强的人为干扰,原本单一、连续的自然景观逐步趋向于复杂、异质和不连续的混合斑块镶嵌体<sup>[1]</sup>,由此带来的生态环境影响变得更为突出。因此,在工业化、城市化快速发展背景下,开展景观生态安全评价研究,分析城市景观格局演变特征和景观生态安全时空演变规律,对调控城市空间格局,提升城市发展水平具有重要意义。

景观格局变化是自然与人为多种因素或生态过程作用在某尺度上的生态环境体系的综合反映<sup>[2]</sup>。传统的景观生态安全评价模型多以景观格局指数构建,忽视了景观组分变化对生态环境状况的影响,不能完全反映该区域的景观生态安全状况。基于此,有较多学者通过引入生态服务价值理论或生态质量指数对传统景观生态安全评价模型进行完善,如 Zhou K<sup>[3]</sup>、赵筱青<sup>[4]</sup>等以景观干扰度和景观脆弱度作为景观结构安全指数,引入生态系统服务价值作为景观功能安全指数,通过构建的评价模型分别分析了武汉市、云南省西盟县景观生态安全时空变化特征;于潇等在景观格局安全指数的基础上,引入生态质量指数,构建了现代农业区景观生态安全评价模型,对我国三江平原现代农业区国营友谊农场近 30 年来研究区的景观生态安全时空分异进行分析<sup>[5]</sup>。景观生态安全评价模型的完善,及其与空间统计学方法的结合,能够更加直观、全面的反映城市景观生态安全的时空演变特征。

本文以南昌市为研究区域,基于土地利用变化数据,运用城市生态学和景观生态学的原理及方法,通过分析南昌市 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2017 年 5 个时期的景观格局演变特征,构建景观生态安全评价模型,对 2000—2017 年南昌市景观生态安全进行评价,探究南昌市景观生态安全时空演变规律,以期为调控南昌市空间格局、优化土地资源利用、保障可持续发展提供理论参考。

## 1 研究区概况与数据处理

### 1.1 研究区概况

南昌市是江西省省会,位于江西中部偏北,地处

115°27′—116°35′E, 28°09′—29°11′N, 面积为 7 402.36 km<sup>2</sup>,是联动“长珠闽”地区和长江中游地区的重要经济中心之一,也是鄱阳湖生态经济区核心城市,其地理位置如图 1 所示。南昌市属于亚热带湿润季风气候,气候湿润温和,日照充足。全境山、丘、岗、平原相间,东南平坦,西北丘陵起伏,水资源、森林资源及矿产资源丰富。截至 2017 年末,南昌常住人口达 546.35 万人。近年来,南昌市经济发展迅猛,全市生产总值达到 5 003.19 亿元,全年完成农林牧渔及服务业现价总产值 321.39 亿元。

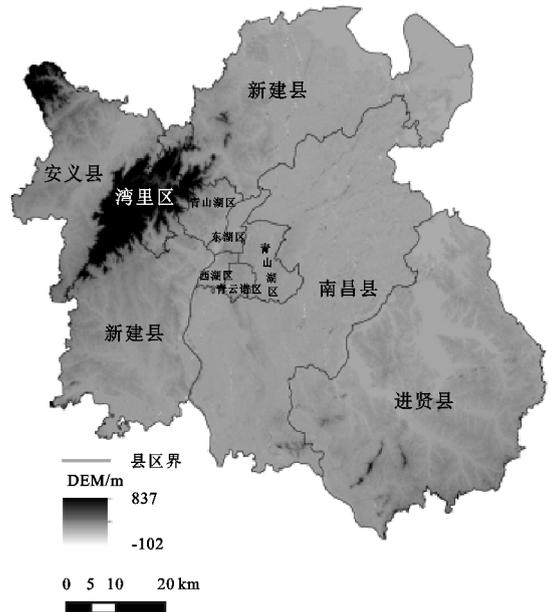


图 1 南昌市地理位置示意图

### 1.2 数据来源与处理

本文所需的数据大致分为两类:

(1) 南昌市 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2017 年五期土地利用数据。主要来自 Landsat5 TM, Landsat8 OLI 数据,空间分辨率均为 30 m,选择成像时间范围为 8 月中下旬至 10 月上中旬且平均云量较低的影像数据。使用 ENVI 5.0 对影像数据进行预处理工作。根据南昌市土地利用实际以及研究需要,将研究区景观类型分为:耕地、林地、草地、水域及湿地、建设用地以及其他用地共 6 类。最后,利用 Kappa 系数进行精度验证,并与 Google Earth 高分辨率卫星影像作为参考对五期分类结果进行采样验证,解译精度达到 90% 以上,符合研究要求。

(2) 其他数据。DEM 数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台。NDVI 数据在 Envi 5.0 软件平台利用遥感数据不同波段之间的关系得到,植被覆盖度采用基于 NDVI 的像元二分模型估算得到。

## 2 研究方法

### 2.1 评价单元划分

为使景观生态安全指数更直观地在空间上表达,也使研究结果更为科学可信,依据研究区景观斑块平均面积 2~5 倍的原则<sup>[6]</sup>,采用等间距法<sup>[7-8]</sup>在 ArcGIS 平台上将研究区划分为 1.5 km×1.5 km 共计 3 192 个评价单元,计算每个评价单元内综合景观生态安全指数并将此作为评价单元中心点的景观生态安全指数值<sup>[7-9]</sup>,进而得到 2000—2017 年南昌市景观生态安全指数值的空间分布情况。

### 2.2 指标体系构建

在景观生态安全评价研究中,较多学者采用以干扰度指数和脆弱度指数构建的景观生态安全评价模型<sup>[10-11]</sup>,没有考虑到因景观组分变化而导致的区域生态环境状况变化。因此,本文基于研究区实际情况和相关

研究成果<sup>[12]</sup>,构建更为完善的景观生态安全评价指标体系,并采用层次分析法确定指标权重(表 1),评价结果可以较真实、全面地反映区域景观生态安全程度。

各评价指标的计算方法及过程如下:

(1) 景观干扰度与脆弱度指数反映各景观类型在人类活动或自然胁迫作用下生态环境的变化情况<sup>[13-14]</sup>。其中,景观干扰度指数( $I_i$ )用于反映不同景观所代表的生态系统受到干扰的程度<sup>[15]</sup>,计算公式见表 2。 $V_i$ 为第  $i$  类景观的脆弱度指数,参考相关研究成果<sup>[16-17]</sup>,依据景观指数的重要性及其对景观干扰度的贡献率,将 6 类景观脆弱程度由高到低进行赋值。其中,建设用地赋值为 1,林地为 2,草地为 3,耕地为 4,水域为 5,未利用地为 6,并进行归一化处理,得到各景观类型脆弱度指数<sup>[18-19]</sup>。

表 1 南昌市景观生态安全评价指标体系

目标层	要素层(权重)	指标层(权重)	指标性质
景观	景观结构(0.40)	景观干扰度指数(0.20)	负指标
		景观脆弱度指数(0.20)	负指标
生态	景观活力(0.20)	植被覆盖度(0.20)	正指标
		景观功能(0.25)	景观生态服务价值(0.25)
安全	景观压力(0.15)	城市开发利用强度指数(现状)(0.10)	负指标
		城市扩展强度(动态)(0.05)	负指标

表 2 景观结构指数计算方法

景观指数	计算公式	描述
破碎度( $C_i$ )	$C_i = n_i / A_i$	$n_i$ 为景观类型 $i$ 的斑块数; $A_i$ 为景观类型 $i$ 的总面积; $D_i$ 为景观类型 $i$ 的距离指数; $A$ 为景观总面积; $N$ 为景观斑块总数量; $m_i$ 为某一景观类型斑块出现的样方数; $M$ 为总样方数。 $a, b, c$ 为各指数对应的权重,根据相关研究 <sup>[18-19]</sup> ,结合专家打分法,分别赋以景观破碎度指数、景观分离度指数和景观优势度指数的权重为 0.5, 0.3, 0.2
分离度( $N_i$ )	$N_i = D_i \cdot A / A_i, D_i = 0.5 \cdot (n_i / A)^{1/2}$	
优势度( $DO_i$ )	$DO_i = 0.25 \cdot n_i / N + m_i / M + 0.5 \cdot (A_i / A)$	
干扰度指数( $I_i$ )	$I_i = a \cdot C_i + b \cdot N_i + c \cdot DO_i$	

(2) 植被覆盖度采用基于 NDVI 的像元二分模型进行估算<sup>[20-22]</sup>,主要包括归一化植被指数(NDVI)计算和利用 NDVI 反演植被覆盖度。

归一化植被指数又称标准化植被指数,具有消除地形以及大气条件有关辐照度的变化等优点<sup>[23-24]</sup>,计算公式为:

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R) \quad (1)$$

式中:NDVI 为归一化植被指数;NIR 为近红外波段的反射率; $R$  为可见光红光波段的反射率。NDVI 数值越大代表植被的覆盖状况越好,植被的生物量越多<sup>[25]</sup>。

在 NDVI 的基础上进一步计算研究区的植被覆盖度 FVC,公式如下:

$$FVC = (DNVI - NDVI_{soil}) / (NDVI_{veg} - NDVI_{soil}) \quad (2)$$

式中:NDVI<sub>soil</sub> 为裸土覆盖像元的 NDVI 值;NDVI<sub>veg</sub> 为纯植被覆盖像元的 NDVI 值。

(3) 本文在借鉴相关学者<sup>[26]</sup>的基础上结合南昌

市实际情况,使用当量因子法来确定南昌市不同景观类型生态服务价值。基于实际情况的考虑,将不同景观类型生态服务价值当量因子代替相对应的生态服务价值系数,计算公式如下:

$$ESV = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m A_i \times VC_{ij} \quad (3)$$

$$UESV = ESV / A \quad (4)$$

式中:ESV 为生态系统服务价值; $i$  为景观类型; $j$  为生态系统服务功能的类型; $A_i$  为第  $i$  种景观类型的面积; $VC_{ij}$  为第  $i$  种景观类型第  $j$  种生态服务价值的系数;UESV 为单位面积生态系统服务价值; $A$  为所有景观类型总面积。

城市建设用地扩张是快速城市化过程中的城市面临的首要景观生态压力,也是引起区域生态系统退化的主要因素<sup>[27-29]</sup>,因此,景观压力指数由城市开发利用强度及城市扩展强度共同确定。其中,城市开发利用强度以建设用地面积/土地总面积表征;城市扩展强度指数用于衡量城市扩展的速度,计算公式为:

$$U_{i,t \sim t+n} = [(ULA_{i,t+n} - ULA_{i,t})/n] \times 100 / TL A_i \quad (5)$$

式中:  $U_{i,t \sim t+n}$  分别为空间单元  $i$  在  $t \sim t+n$  时段内的城市扩展强度指数以及  $t+n$  及  $t$  年时的城市土地利用面积;  $TL A_i$  空间单元  $i$  的面积。

### 2.3 空间统计学方法

(1) 空间自相关。空间自相关分析是通过计算空间自相关系数来分析某一变量是否在空间上相关及其相关程度,以发现研究对象间的空间相互作用现象<sup>[28-29]</sup>。本研究使用全局空间自相关(Moran's  $I$ )以及局部空间自相关(LISA)分析景观生态安全指数的空间模式。

(1) 全局空间自相关(Moran's  $I$ )。Moran's  $I$  系数反映空间邻近区域单元属性值的相关程度,计算公式如下:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 (\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m W_{ij})} \quad (6)$$

式中:  $n$  为栅格数;  $x_i, x_j$  是变量  $x$  在相邻配对空间单元(或栅格细胞)的取值(或属性);  $\bar{x}$  是研究对象  $x$  的均值;  $W_{ij}$  是空间权重矩阵。

(2) 局部空间自相关(LISA)。LISA 反映的是局部小区域单元上的属性值与相邻局部小区域单元上同属性值的相关程度<sup>[30]</sup>,计算公式为:

$$I_i = \frac{(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_j - \bar{x})}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (7)$$

Moran's  $I$  值一般在  $[-1, 1]$  区间内,小于 0 为负相关,大于 0 为正相关,等于 0 则表示不相关。通常采用  $Z$  检验法对 Moran's  $I$  值进行统计检验,其公式为:

$$Z(I) = \frac{I - E(I)}{\sqrt{\text{var}(I)}} \quad (8)$$

式中:  $Z(I)$ 、 $E(I)$  分别为 Moran's  $I$  的  $Z$  法检验值和数学期望。

(2) 地统计学分析方法。地统计学分析的半变异函数法不仅能解释属性或现象的空间相关,而且可以模拟和估计空间上的未知变量<sup>[31-33]</sup>,计算公式为:

$$r(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2 \quad (9)$$

式中:  $h$  为样本间隔距离;  $N(h)$  为相隔距离为  $h$  时的样点对数,  $Z(x_i)$ ;  $Z(x_i+h)$  分别为变量在位置  $x_i$ ,  $x_i+h$  处的值。

## 3 结果与分析

### 3.1 景观类型变化分析

3.1.1 景观类型数量和结构变化 依据土地利用数据,对南昌市 2000—2017 年景观类型变化进行分析。图 2 和表 3 可反映南昌市 2000—2017 年景观类型结构及其变化情况。由表 3 可知,南昌市景观类型以耕地、林地、水域为主,不同景观类型之间的面积变化差异较大。2000—2017 年,南昌市耕地面积由 391 890.94  $\text{hm}^2$  减少为 311 872.22  $\text{hm}^2$ ,减少了 80 018.72  $\text{hm}^2$ ,在各景观类型中所占的比例减少了 11.12%。期间建设用地面积逐年增加,2017 年比 2000 年增加了 78 843.51  $\text{hm}^2$ ,在各景观类型中所占的比例由 6.28% 提高至 17.23%,表明南昌市城市化进程不断提速。其他景观类型面积在研究期内呈现出不同程度地波动,2000—2017 年,南昌市林地面积减少了 7 450.09  $\text{hm}^2$ ,减幅为 6.14%,草地面积减少了 1 688.22  $\text{hm}^2$ ,水域面积增加了 4 357.27  $\text{hm}^2$ ,增幅为 2.92%,其他景观类型面积增加了 5 955.39  $\text{hm}^2$ 。

表 3 2000—2017 年南昌市景观类型结构

景观类型	2000 年		2005 年		2010 年		2015 年		2017 年	
	面积/ $\text{hm}^2$	比例/%	面积/ $\text{hm}^2$	比例/%	面积/ $\text{hm}^2$	比例/%	面积/ $\text{hm}^2$	比例/%	面积/ $\text{hm}^2$	比例/%
耕地景观	391890.94	54.46	359008.06	49.89	339047.37	47.11	318454.81	44.25	311872.22	43.34
林地景观	121297.85	16.86	108441.97	15.07	101474.19	14.10	115653.93	16.07	113847.77	15.82
草地景观	9251.01	1.29	9811.70	1.36	9108.43	1.27	7493.52	1.04	7562.80	1.05
建设用地景观	45170.79	6.28	76573.51	10.64	95706.45	13.30	117220.72	16.29	124014.30	17.23
水域景观	149175.50	20.73	159350.56	22.14	164983.78	22.93	151624.76	21.07	153532.77	21.33
其他景观	2850.32	0.40	6450.69	0.90	9314.83	1.29	9188.68	1.28	8805.71	1.22
合计	719636.40	100.00	719636.40	100.00	719636.40	100	719636.40	100.00	719636.40	100.00

3.1.2 景观类型空间转移矩阵 从表 4 可以看出,2000—2017 年,耕地、林地、水域和建设用地的转移面积较大。耕地景观主要与林地、建设用地、水域景观发生面积转移,其中耕地转为建设用地的面积最大,转移面积达 71601.02  $\text{hm}^2$ ,表明快速城市化发展

会导致耕地面积减少;林地占流入耕地面积比例最大,占 46.02%;林地景观流出以耕地和建设用地为主,两者占林地景观流出总量的 88.66%,林地景观流入的主要来源为耕地,达到 26 858.77  $\text{hm}^2$ ,占流入总量的 76.17%;水域主要与耕地进行转移,与其他景观

类型转移的比例都较小,流向耕地面积为 13 648.64 hm<sup>2</sup>,且总体流入面积远大于流出面积。其他景观主

要与水域及耕地发生面积的转移,与其他景观类型的面积变化不明显。

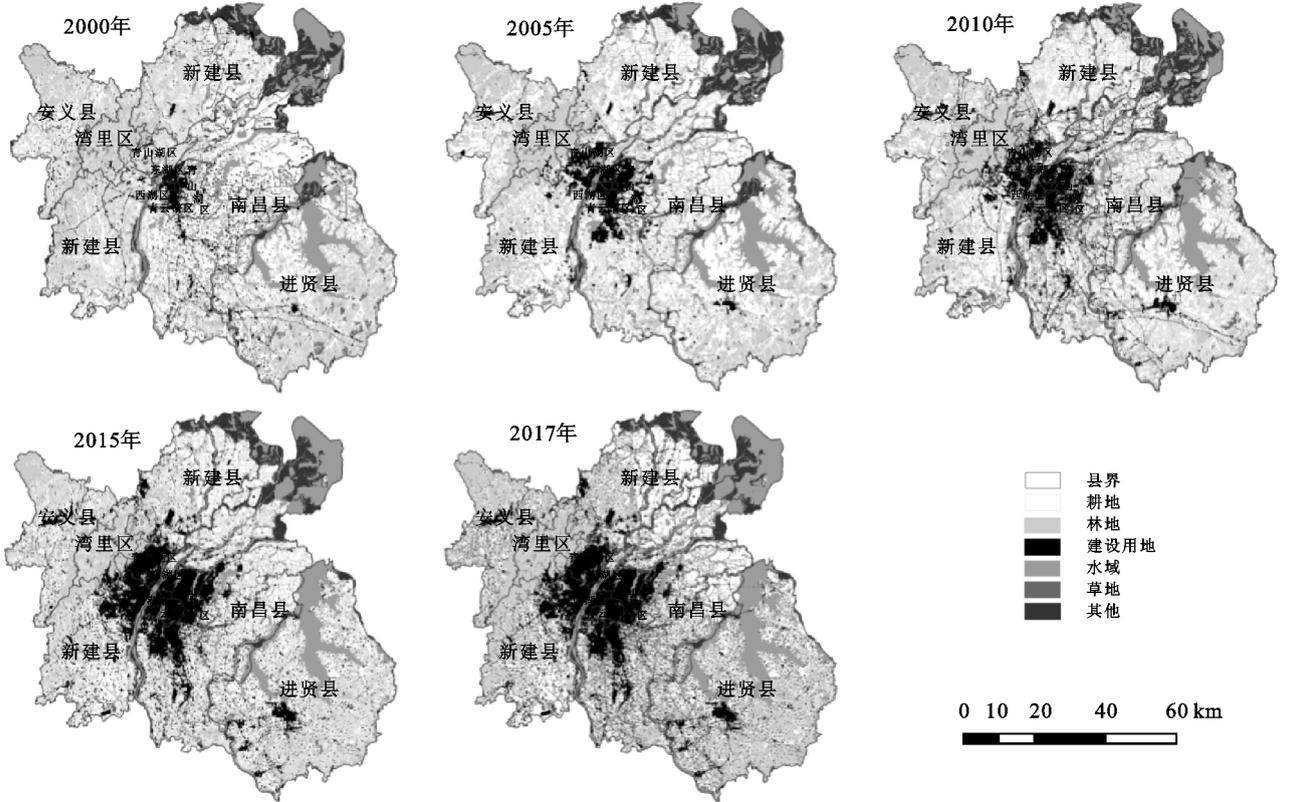


图 2 2000—2017 年南昌市景观类型分布

表 4 2000—2017 年南昌市景观类型转移矩阵

hm<sup>2</sup>

景观类型	2017 年						合计
	耕地	林地	草地	建设用地	水域	其他	
2000 年							
耕地	257388.80	26858.77	4254.10	71601.02	27573.66	4214.56	391890.94
林地	25075.46	78584.09	1980.62	12793.62	2441.00	423.07	121297.85
草地	2523.85	4756.42	228.41	894.22	623.04	225.06	9251.01
建设用地	12499.79	1216.55	316.58	28433.86	2339.51	364.46	45170.79
水域	13648.64	1836.12	729.49	9877.57	119626.96	3456.80	149175.50
其他	735.68	595.82	53.61	414.95	928.60	121.77	2850.32
合计	311872.22	113847.77	7562.80	124014.30	153532.77	8805.71	719636.40

### 3.2 景观生态安全空间分异特征

为探究南昌市不同时期景观生态安全的空间分异特征,利用 GS+9.0 软件进行半方差函数的拟合,得到不同时期景观生态安全指数的半方差函数拟合模型及其相关参数(表 5)。

从表 5 可以看出,2000—2017 年南昌市景观生态安全指数的最优模型均为球状模型,其决定系数分别为 0.866,0.843,0.890,0.989,0.970,表明模型具有较好的拟合效果。块金基台比可以反映区域变量空间自相关程度的强弱。2000—2017 年,南昌市景观生态安全指数的块金基台比呈波动变化趋势,其中,2010 年的块金基台比最大,达到 35.37%,但总体上在 25%左右,表明南昌市景观生态安全程度具有较强的空间自相关性,结构性因素对生态安全指数的空

间分异具有显著的影响作用。变程反映区域化变量空间自相关的尺度。2000—2017 年研究区景观生态安全度空间分异的变程在 23 300.00~33 000.00 m 之间,具有高度的空间自相关性。

在 ArcGIS 10.2 软件的支持下,对各时期南昌市景观生态安全空间变量进行趋势分析,将景观生态安全指数值投影到 x,z 平面和 y,z 平面上,并在此基础上分析 2000—2017 年南昌市景观生态安全空间分布变异趋势。

各时期南昌市景观生态安全水平总体上表现为中部生态安全值较低,四周生态安全值较高的空间格局。在南北方向上,5 个时期均呈凹型曲线,凹型程度不断加大。2000 年与 2005 年的南北趋势线较平缓,表明区域景观生态安全变异程度较低,2005 年以

后变异程度逐渐变大;在东西方向上,2000 年与 2005 年景观生态安全的趋势线为平缓,2010—2017 年景观生态安全值的趋势线均呈明显的凹型曲线。总体来看,各时期南北、东西两条趋势线呈向下降趋势,表

表 5 不同时期景观生态安全指数半变异函数理论模型及参数

年份	理论模型	块金值	基台值	块金系数/%	变程	决定系数	残差
2000	球状模型	0.0038	0.0118	32.20	26100.00	0.866	$9.74 \times 10^{-6}$
2005	球状模型	0.0039	0.0156	25.22	23700.00	0.843	$2.41 \times 10^{-5}$
2010	球状模型	0.0052	0.0147	35.37	26500.00	0.890	$1.15 \times 10^{-5}$
2015	球状模型	0.0042	0.0190	22.11	33000.00	0.989	$2.98 \times 10^{-6}$
2017	球状模型	0.0042	0.0198	21.22	29400.00	0.970	$8.46 \times 10^{-6}$

### 3.3 景观生态安全空间相关性分析

3.3.1 全局空间自相关分析 借助 Geoda 以及 ArcGIS 10.2 软件对 2000—2017 年南昌市景观生态安全指数数据进行处理,建立空间权重矩阵,得到 Moran's  $I$  和相关检验结果(表 6)。

表 6 Moran's  $I$  指数及验证值统计

年份	Moran's $I$	$E(I)$	Z-Score
2000	0.6571	-0.000313	71.89
2005	0.6889	-0.000313	75.38
2010	0.6952	-0.000313	76.05
2015	0.7810	-0.000313	85.41
2017	0.7770	-0.000313	84.97

由表 6 可知,2000—2017 年南昌市区域景观生态安全指数的全局 Moran's  $I$  指数均为正值且均在 0.65 以上,标准化  $Z$  值大于 1.96,且均通过  $p=0.05$  的显著性水平检验,表明在研究期间南昌市区域景观生态安全水平存在着正空间相关性,且相关性较高。Moran's  $I$  指数的增长及标准化  $Z$  值的不断增大表明区域景观生态安全指数在空间上的集聚现象进一步显化。

3.3.2 局部空间自相关分析 全域空间自相关指标用于检验全区域各要素的空间分布模式,但无法测度相邻区域之间要素或属性的空间关联状况<sup>[28]</sup>,因此,本文在 ArcGIS 软件支持下进行聚类分析,以反映 2000—2017 年南昌市景观生态安全指数在局部空间上的集群格局,结果见图 3。

由局部空间自相关集聚图(图 3)可知,各时期南昌市景观生态安全指数的高值—高值区和低值—低值区集聚现象突出,低高或高低离群“奇异点”相对较少。与景观生态安全分布图(图 4)相结合可以看出,总体上高值—高值区、低值—低值区的分布与景观生态安全度的分布基本一致,高值—高值区主要分布在以高生态安全度为核心的区域,大多分布在湾里区全境、安义县北部以及下新建西部,该地区景观类型以林地为主,森林覆盖度高,景观生态功能优势明显,且地势较高、交通通达度低、人为活动干扰少;低值—低值区主要分布在以低生态安全度为核心的区域,主要分布在南昌市城区及城

明区域景观生态安全状况逐步恶化,景观生态安全值降低的部分聚集在中部地区并且聚集程度不断加大,表明南昌市中部地区景观结构、活力及功能等受到人类活动影响较大,其生态功能进一步弱化。

区周边、进贤县县城,该区域受人类活动影响大,景观生态功能基本丧失,且随着城市化的快速推进,低值—低值区的分布范围明显扩大,景观生态安全面临巨大压力。高低或低高离群点分布零散,特征不明显。

2000—2005 年,高值—高值区以及低值—低值区分布面积在缩减,可能是由于经济发展改变了原有景观生态系统结构,且新的景观生态安全格局尚未形成,致使高值—高值区及低值—低值区分布格局发生改变;到 2010 年,进贤县军山湖周边以及南部区域高值—高值明显聚集,并且高值—高值区有向进贤县东南部聚集的明显趋势。2017 年的分布格局与 2015 年相近。可见,研究期间南昌市总体格局在空间上变化明显,且呈现出由随机分布向集群分布格局转变的趋势。

### 3.4 景观生态安全时空演变分析

根据构建的景观生态安全评价模型,计算得到研究区景观生态安全指数,借鉴已有研究的标准划分方法<sup>[32-33]</sup>并结合研究区实际情况,采用自然断点法将区域的景观生态安全分为 5 个等级,分别为:低安全区( $0.00 \leq \text{LESI} \leq 0.36$ )、中低安全区( $0.36 < \text{LESI} \leq 0.52$ )、中度安全区( $0.52 < \text{LESI} \leq 0.62$ )、中高安全区( $0.62 < \text{LESI} \leq 0.72$ )以及高安全区( $0.72 < \text{LESI} \leq 1.00$ )。

在分析南昌市不同时期景观生态安全的空间分异特征的基础上,根据半变异函数拟合最优模型及其参数,采用普通克里金插值法得到南昌市景观生态安全的空间分布(图 4),并进一步进行景观生态安全指数的统计以及各安全等级区面积统计,描述性统计结果见表 7。

从表 7 可以看出,2000—2017 年南昌市景观生态安全状况总体上呈恶化趋势,景观生态安全指数平均值不断减小,由 2000 年的 0.632 降低到 2017 年的 0.573,景观生态安全指数的最大、最小值呈波动变化,总体上最小值从 0.118 减小到 0.090,最大值从 1.000 降低到 0.964,表明南昌市景观生态安全整体向低值区发展。从各年份景观生态安全值的变异系数来看,2000—2017 年变异系数总体上不断增大,表明期间人为因素对景观类型影响较大,导致空间上的生态安全度异质性不断增加。

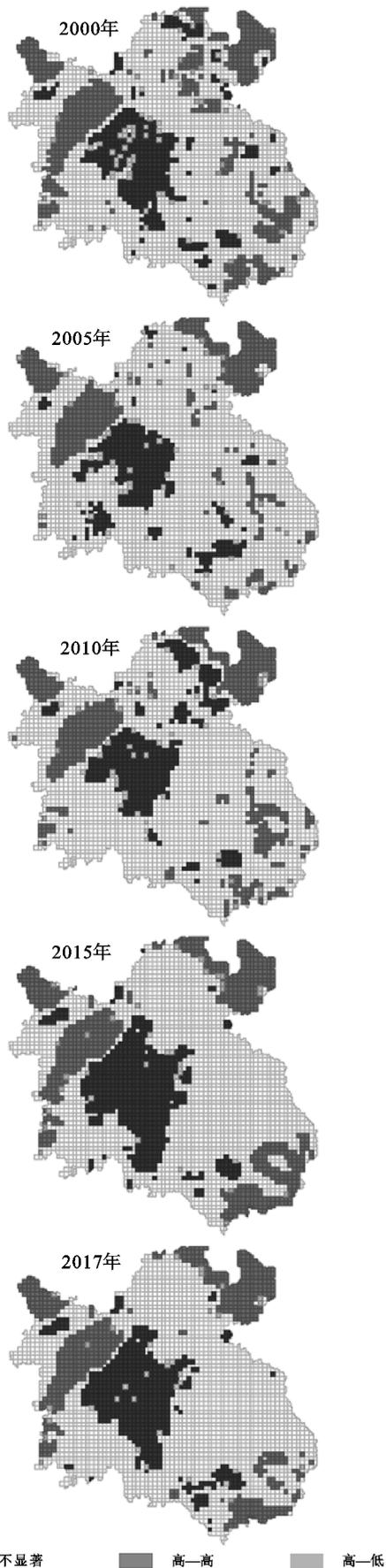


图 3 2000—2017 年南昌市景观生态安全指数局部空间自相关图

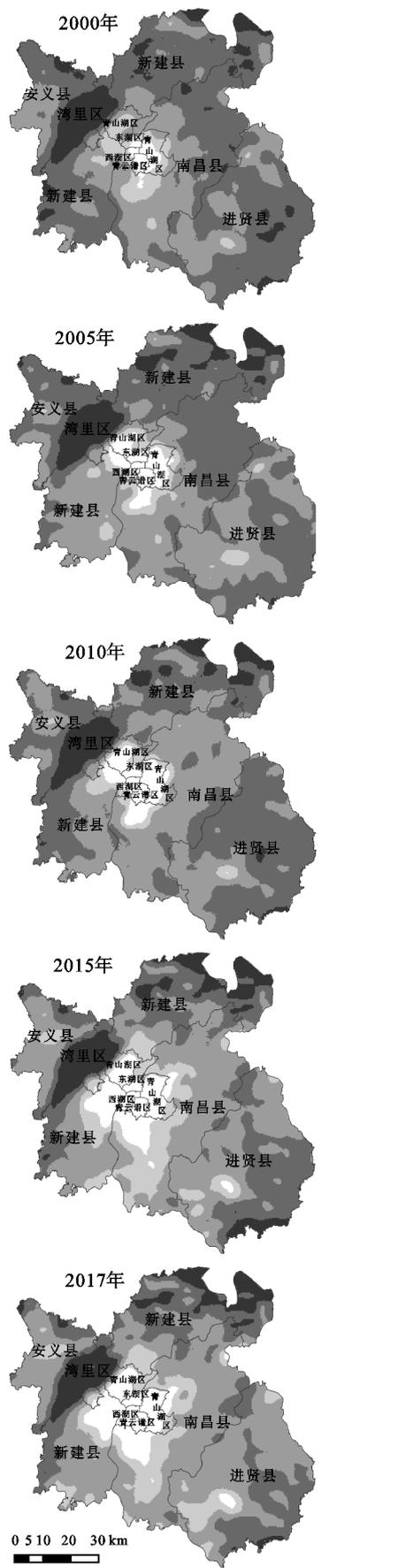


图 4 2000—2017 年南昌市景观生态安全空间分布

表 7 南昌市景观生态安全指数描述性统计分析

参数	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2017 年
最大值	1.000	0.915	0.910	0.938	0.964
最小值	0.118	0.000	0.058	0.102	0.090
平均值	0.632	0.613	0.617	0.582	0.573
变异系数/%	16.240	19.260	18.740	22.320	23.340

由不同时期南昌市各景观生态安全等级区面积比例表(表 8)可知,2000—2017 年南昌市景观生态安全格局发生了较大变化,主要表现为:高安全区面积所占比例基本不变,中高安全区面积所占比例不断减少,中度安全区、中低安全区以及低安全区面积所占比例有不同幅度的增加。其中,高安全区面积所占比例由 2000 年的 6.14% 增加至 2017 年的 7.27%,增幅为 1.12%;中高安全区面积所占比例由 56.72% 减小至 24.33%,减少了 32.39%;中度安全区的面积持续增加,其面积所占比例从 30.70% 增长到 47.03%;中低安全区的面积在 2 000 至 2010 年基本不变,2010—2017 年明显增加,所占比例从 2000 年的 5.50% 增加至 2017 年的 14.45%,变化量居其他安全等级之首;低安全区面积所占比例除 2010 年略有降低外,研究时段内呈增加趋势,到 2017 年其所占比例为 6.93%。且 2000 年、2005 年、2010 年以中高安全区和中度安全区为主,平均占总面积的 85%;2015 年、2017 年整体景观生态安全水平有恶化趋势,以中高安全区、中度安全区和中低安全区为主,约占总面积的 86%。

从表 8 也可以看出,不同时间段内的景观等级间的转化情况不同:2 000 至 2005 年,景观生态安全状况主要由中高安全区向中度安全区以及低安全区转化,中度安全区、低安全区面积比例分别增加了 6.53%,2.61%,中高安全区减小的比例达到 9.78%;2005—2010 年,各安全等级所占面积比例变化不大,主要为其他安全区向中度安全区以及中低安全区转化,中度安全区、中低安全区比例分别增加了 2.12%,0.51%;2010—2015 年,南昌市景观生态安全等级结构发生了较大变化,中高安全区比例减小了 17.82%,其他 4 个等级区的面积比例不同程度增加,其中,中低安全区面积比例增加最大,增加了 9.59%;2 015 至 2017 年的变化情况不明显,但总体呈恶化趋势。

## 4 结论与讨论

南昌市景观类型以耕地、林地、水域为主。2000—2017 年,南昌市耕地面积不断减少,减少了 80 018.72  $\text{hm}^2$ ,建设用地面积逐年增加,共增加 78 843.51  $\text{hm}^2$ 。其他景观类型的面积呈现出不同程度地波动变化。景观类型转移矩阵表明主要以耕地、林地、水域和建设用地

景观的面积转移为主。半方差函数的拟合结果显示,2000—2017 年南昌市景观生态安全指数的最优模型均为球状模型,块金基台比在 25% 左右,存在较强的空间自相关性。研究期间,南昌市各时期景观生态安全水平总体上表现为中部生态安全值较低,四周生态安全值较高的空间格局,同时呈现出恶化趋势。空间自相关分析结果显示,南昌市生态安全指数聚集现象突出,总体上高值—高值区、低值—低值区的分布与景观生态安全度的分布基本一致。通过构建景观生态安全评价模型对南昌市景观生态安全水平进行定量评价,结果显示:2000—2017 年南昌市景观生态安全状况总体上呈恶化趋势,景观生态安全指数平均值不断减小,由 2000 年的 0.632 降低到 2017 年的 0.573,景观生态安全指数的变异系数升高,表明人类活动对景观影响增大,研究期间中高安全区面积减少明显,主要向中度安全区、中低安全区和低安全区转移。

表 8 不同时期各景观生态安全等级区面积比例变化 %

年际	高安 全区	中高 安全区	中度 安全区	中低 安全区	低安 全区
2000	6.14	56.72	30.70	5.50	0.93
2005	7.15	46.95	37.23	5.13	3.54
2010	6.68	45.76	39.35	5.64	2.57
2015	8.30	27.94	42.62	15.24	5.90
2017	7.27	24.33	47.03	14.45	6.93
2000—2005	1.00	-9.78	6.53	-0.37	2.61
2005—2010	-0.47	-1.19	2.12	0.51	-0.98
2010—2015	1.62	-17.82	3.27	9.59	3.34
2015—2017	-1.03	-3.60	4.40	-0.79	1.02
2000—2017	1.12	-32.39	16.33	8.95	6.00

本文基于南昌市五期遥感影像数据作为数据源,利用 ArcGIS 平台,在分析其景观格局演变的基础上,通过构建评价模型并运用地统计学、空间相关性分析等方法定量评价了南昌市景观生态安全水平。在参考相关研究以及遥感数据源的分辨率后,本文将栅格粒度值设定为 30 m,未考虑到景观指数在不同粒度下的粒度效应,可能会使研究成果与实际情况存在微小差别,这在今后的研究中需要进一步改善。与传统的景观生态安全评价指标体系相比,本文所建立的评价指标体系更为全面,能在一定程度上体现景观组分变化及城市化进程对景观生态安全的影响。但在景观指标选取及权重设定上仍存在一些不足:在景观指数选择上可能存在一定的冗余,且存在景观指数的解释力不够深入问题;在评价指标的权重设定上所采用的层析分析法,会使评价结果存在一定的主观性,在今后的研究中应采用主、客观相结合的权重赋值法,尽量减小人为因素的影响。

## 参考文献:

- [1] 阳文锐.北京城市景观格局时空变化及驱动力[J].生态学报,2015,35(13):4357-4366.
- [2] 李建春,袁文华.基于GIS格网模型的银川市土地生态安全评价研究[J].自然资源学报,2017,32(6):988-1001.
- [3] Zhou K, Liu Y, Tan R, et al. Urban dynamics, landscape ecological security, and policy implications: A case study from the Wuhan area of central China[J]. Cities, 2014,41:141-153.
- [4] 赵筱青,王兴友,谢鹏飞,等.基于结构与功能安全性的景观生态安全时空变化:以人工园林大面积种植区西盟县为例[J].地理研究,2015,34(8):1581-1591.
- [5] 于潇,吴克宁,郎文聚,等.三江平原现代农业区景观生态安全时空分异分析[J].农业工程学报,2016,32(8):253-259.
- [6] 苏海民,何爱霞.基于RS和地统计学的福州市土地利用分析[J].自然资源学报,2010,25(1):91-99.
- [7] 李建春,袁文华.基于GIS格网模型的银川市土地生态安全评价研究[J].自然资源学报,2017,32(6):988-1001.
- [8] 黄木易,何翔.近20年来巢湖流域景观生态风险评估与时空演化机制[J].湖泊科学,2016,28(4):785-793.
- [9] 吴莉,侯西勇,邸向红.山东省沿海区域景观生态风险评估[J].生态学杂志,2014,33(1):214-220.
- [10] 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.
- [11] 陈亚娟.石漠化地区景观生态安全动态评价与预测[D].贵阳:贵州师范大学,2017.
- [12] 裴欢,魏勇,王晓妍,等.耕地景观生态安全评价方法及其应用[J].农业工程学报,2014,30(9):212-219.
- [13] 李月臣.中国北方13省市区生态安全动态变化分析[J].地理研究,2008,27(5):1150-1160,1227.
- [14] 郭砾,薛达元,余世孝,等.泰山景观生态安全动态分析与评价[J].山地学报,2008,26(3):331-338.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 王娟,崔保山,姚华荣,等.纵向岭谷区澜沧江流域景观生态安全时空分异特征[J].生态学报,2008,28(4):1681-1690.
- [18] 曾永年,靳文凭,王慧敏,等.青海高原东部土地利用变化模拟与景观生态风险评估[J].农业工程学报,2014,30(4):185-194.
- [19] 曾永年,何丽丽,靳文凭,等.长株潭城市群核心区城镇景观空间扩张过程定量分析[J].地理科学,2012,32(5):544-549.
- [20] 胡砚霞,黄进良,杜耘,等.2000—2015年丹江口库区植被覆盖时空变化趋势及其成因分析[J].长江流域资源与环境,2018,27(4):862-872.
- [21] 王毅,郭跃.喀斯特地貌区植被覆盖与地形因子的空间关系分析:以贵州普定县为例[J].长江流域资源与环境,2018,27(1):157-167.
- [22] 彭文甫,王广杰,周介铭,等.基于多时相Landsat5/8影像的岷江汶川—都江堰段植被覆盖动态监测[J].生态学报,2016,36(7):1975-1988.
- [23] Liang S L, Li X W, Wang J D. Advanced remote sensing: Terrestrial information extraction and applications [R]. Pennsylvania: Academic Press, 2012.
- [24] 李营,张峰,王桥.呼伦贝尔盟草原植被覆盖状况时空演变特征分析[J].干旱区资源与环境,2010,24(6):126-131.
- [25] Deering D W. Rangeland reflectance characteristics measured by aircraft and spacecraft sensors[R]. Texas: Texas A&M University, College Station, 1978.
- [26] 王景,李文华,任青山,等.西藏森林生态系统服务价值[J].自然资源学报,2007,22(5):831-841.
- [27] 孙翔,朱晓东,李杨帆.港湾快速城市化地区景观生态安全评价:以厦门市为例[J].生态学报,2008,28(8):3563-3573.
- [28] 游巍斌,何东进,巫丽芸,等.武夷山风景名胜区景观生态安全度时空分异规律[J].生态学报,2011,31(21):6317-6327.
- [29] Dale V H, Kline K L. Issues in using landscape indicators to assess land changes [J]. Ecological Indicators, 2013,28:91-99.
- [30] 刘世梁,刘琦,张兆苓,等.云南省红河流域景观生态风险及驱动力分析[J].生态学报,2014,34(13):3728-3734.
- [31] Wang J, Cui B S, Yao H R, et al. The temporal and spatial characteristic of landscape ecological security at Lancang River Watershed of longitudinal range gorge region in Southwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008,28(4):1681-1690.
- [32] Du P, Xia J, Du Q, et al. Evaluation of the spatio-temporal pattern of urban ecological security using remote sensing and GIS[J]. International Journal of Remote Sensing, 2013,34(3):848-863.
- [33] 欧朝蓉,朱清科,孙永玉.元谋干热河谷景观生态安全时空变化[J].中国水土保持科学,2018,16(1):131-140.