

# 平原丘陵过渡区土地利用变化与 生境质量的时空演变及权衡 ——以江苏省溧阳市为例

樊继玲<sup>1</sup>, 何莎莎<sup>2</sup>, 方 斌<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>连云港市赣榆区自然资源和规划局, 江苏 连云港

<sup>2</sup>南京师范大学地理科学学院, 江苏 南京

收稿日期: 2022年9月11日; 录用日期: 2022年10月11日; 发布日期: 2022年10月18日

## 摘 要

[目的]评估生境质量是提升生态系统服务功能和人类福祉的关键, 对权衡区域生态建设和经济发展提供科学依据。[方法]以溧阳市土地利用变更数据为基础, 将InVEST模型和地理加权回归模型结合, 在空间上定量刻画溧阳市生境质量演变与土地利用变化的交互关系, 探讨其时空分异。[结果]研究结果显示: 1) 2003~2009年间耕地和草地分别减幅17.05% (126.43 km<sup>2</sup>)、71.22% (26.06 km<sup>2</sup>); 建设用地、林地和水域分别增幅48.86% (80.46 km<sup>2</sup>)、4.33% (13.28 km<sup>2</sup>)、20.56% (58.34 km<sup>2</sup>); 其他土地类型变化不大。2003~2009年土地利用的转移主要发生在耕地、林地、建设用地和水域之间, 相互间的转入和转出面积比例较大。2009~2015年间转移数量和速度明显减缓, 且主要以耕地和建设用地的相互转移为主, 水域流向耕地的面积远远高于其转入面积。2) 溧阳市生境质量总体上高等级区域和较低等级区域占比较大, 生境质量存在比较明显的空间异质性。整体特征呈现出南高北低、东高西低, 由中心到外围逐渐升高的趋势。2003~2009年溧阳市的生境质量逐渐提升, 至2015年趋于稳定; 生境质量热点区域主要位于溧阳南部区域和溧阳市的边缘区, 冷点主要分布于居民点密集的中部平原区; 同时溧阳市的生境质量分布具有一定空间正相关性, 多呈高高、低低聚集分布。3) 各土地利用类型的回归系数在空间上仍然存在较大的异质性, 生境质量对林地、草地和水域变化的响应具有较高的正相关效应, 呈协同关系, 面积的增加可提升生境质量水平, 生境质量与建设用地变化在空间上呈负相关效应, 呈权衡关系, 其面积扩张会对生境造成严重干扰, 耕地正负相关效应并存, 呈正相关效应的区域呈协同关系, 呈负相关效应的区域呈权衡关系。[结论]这一研究结果对于制定合理的区域土地开发利用和环境保护政策以及实施区域生态建设工程具有一定的积极指导作用。

## 关键词

土地利用变化, InVEST模型, 生境质量, 协同与权衡, 溧阳市

\*通讯作者。

# Spatial-Temporal Evolution and Trade-Off Relationship between Land Use Change and Habitat Quality in Plain Hilly Transition Area—A Case Study of Liyang City, Jiangsu Province

Jiling Fan<sup>1</sup>, Shasha He<sup>2</sup>, Bin Fang<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Ganyu District Natural Resources and Planning Bureau of Lianyungang City, Lianyungang Jiangsu

<sup>2</sup>School of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing Jiangsu

Received: Sep. 11<sup>th</sup>, 2022; accepted: Oct. 11<sup>th</sup>, 2022; published: Oct. 18<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

[Objective] Assessing the quality of habitat is the key to improving ecosystem service functions and human well-being, and provides a scientific basis for weighing regional ecological construction and economic development. [Methods] Based on the land use change data of Liyang City, the InVEST model and geographically weighted regression model are combined to quantitatively characterize the interactive relationship between the evolution of habitat quality and land use change in Liyang City, and discuss its spatial and temporal differences. [Results] The research results show that: 1) Between 2003 and 2009, cultivated land and grassland decreased by 17.05% (126.43 km<sup>2</sup>) and 71.22% (26.06 km<sup>2</sup>) respectively; construction land, forest land and water area increased by 48.86% (80.46 km<sup>2</sup>) and 4.33% (13.28 km<sup>2</sup>), 20.56% (58.34 km<sup>2</sup>) respectively; other land types have not changed much. From 2003 to 2009, the land use transfer mainly occurred between cultivated land, forest land, construction land and water area, and the proportion of transfer-in and transfer-out areas was relatively large. The number and speed of transfers have slowed significantly between 2009 and 2015, and are mainly based on the mutual transfer between cultivated land and construction land. The area of water flowing to cultivated land is much higher than the transferred area. 2) The habitat quality of Liyang City is generally occupied by high-level areas and lower-level areas, and there are obvious spatial heterogeneities in habitat quality. The overall characteristics show a trend of high in the south and low in the north, high in the east and low in the west, gradually increasing from the center to the periphery. From 2003 to 2009, the habitat quality of Liyang City gradually improved and stabilized by 2015; the hot spot areas of habitat quality were mainly located in the southern area of Liyang and the marginal area of Liyang City, and the cold spots were mainly distributed in the central plain area with dense residential areas; at the same time, Liyang The city's habitat quality distribution has a certain spatial positive correlation, most of which are high, low and low. 3) The regression coefficients of various land use types are still spatially heterogeneous. The response of habitat quality to the changes of forest land, grassland and water area has a high positive correlation effect, showing a synergistic relationship, and the increase in area can be improved Habitat quality level, habitat quality and construction land change have a negative correlation effect and a trade-off relationship. Their area expansion will cause serious interference to the habitat. The positive and negative correlation effects of cultivated land coexist, and the areas with positive correlation effects show synergistic relationship. The areas of related effects are in a trade-off relationship. [Conclusion] The results of this study have a certain positive guiding role in formulating reasonable regional land development and uti-

lization and environmental protection policies and implementing regional ecological construction projects.

## Keywords

Land Use Change, InVEST Model, Habitat Quality, Coordination and Trade Off, Liyang City

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

生境是各类生物赖以生活的生态地理环境[1] [2], 生境质量(Habitat Quality)是指生态系统提供的适宜于生物稳健发展的生存能力, 被视为区域所有生态系统服务功能的重要基础和区域生态安全保障的关键环节[3] [4] [5]。而土地利用对生境斑块之间的能量流动和物质循环至关重要, 其变化会进而影响区域生境的服务功能和分布格局[6]。在全球气候变化复杂背景下, 生态系统的水土要素及资源的耦合作用过程也会发生相应改变, 会对生物多样性产生重要的影响, 且快速城镇化的发展会促使城乡之间土地利用的空间不断发生转型和重构, 进而对区域生境产生较大冲击并直接影响着整个区域环境和生态系统服务水平[7] [8] [9]。生境质量评估将土地利用变化作为研究视角, 推进了土地利用变化研究与生态系统服务研究的融合, 已成为了全球变化研究领域的热门问题之一[10] [11] [12] [13], 对生境质量对土地利用变化的响应机制进行科学探讨, 剖析区域生境质量的变化规律, 可为维持区域生态系统平衡奠定坚实的基础。

学者们已对生境质量展开广泛研究[14] [15] [16]。早期学者的评估重点主要集中在两方面, 通过野生种群评价生境质量高低及人类活动对生境结构和功能的影响[17] [18], 随着土地利用/覆被变化被代表性国际项目作为全球变化的核心问题, 土地利用变化对区域生境质量的影响也开始被广泛关注[10]。目前关于开展土地利用变化与生境质量关系的研究方法总体可分为两大类: 一类主要是通过野外调查的方式获取与生境质量有关的植被类型、水质、生物物种以及人类干扰活动等指标来构建指标体系评估生境质量[19] [20] [21] [22], 该研究方法的数据需求较大且不易获取。随着 HIS [23]、ARIES [24]、InVEST [25] [26]、SolVES [27]等模型应运而生, 基于模型进行评估成为了生境质量的另一类主流评价方式。主要是为了识别适宜的生存环境, 分析生物的生存环境和分布规律[28] [29]。其中数据需求较少且空间分析能力强的 InVEST 模型发展成为了生态系统服务评估的主流模型之一[30] [31] [32], 其研究主要侧重于定量探究土地利用变化对生境质量的影响过程[33] [34] [35] [36] [37], 并未显示化表达土地利用类型与生境质量的空间关系, 在揭示二者内在关联等方面存在短板。在此基础上本研究引入地理加权回归模型(geographical weighted regression, GWR), GWR 作为现代空间计量局部模型分析, 能够较好描述空间异质性及其规律性, 可以揭示空间非平稳性和依赖性, 被视为空间异质性探究的高效途经[38] [39], 在本研究中, 利用 InVEST 模型结合地理加权回归模型能够更准确的表达土地利用类型和生境质量的空间关系, 探究生境质量及其驱动因素的关联关系。

溧阳市地貌多状, 低山、丘陵、平原圩区分布境内, 属典型的平原丘陵过渡区, 气候温和湿润, 资源丰富, 该研究区内土地利用类型多样, 近年来随着产业调整和生态创新, 溧阳市的土地利用格局逐渐发生变化, 引起区域内生境质量发生改变, 具有较好代表性。因此本文选取江苏省溧阳市作为研究区域, 采用 InVEST 模型生境质量模块, 结合地理加权回归模型, 以 2003~2015 作为研究时间尺度, 以 2003 年、

2009 年及 2015 年为时间节点, 探究土地利用变化与生境质量在空间上的定量关系, 同时在分析该区域土地利用变化的基础上, 探究其对生境质量的影响机理, 以期为该区域提供探寻资源环境和社会经济协调发展规律的科学依据和决策支持。

## 2. 研究区概况

溧阳市三面环山, 一面临水, 胥溪河横贯腹地, 拥有万亩竹海和茶园, 全市林木、耕地和水域总覆盖率达 89.18%。地处苏浙皖三省接壤地区, 位居长江三角洲南部。土地总面积 1535 平方公里, 境内有多种类型的地貌, 包括陡峭的低山, 起伏的丘陵, 地势较平的平原圩区等, 其腹部与东部海拔较低, 南部和西北边缘海拔较高, 作为典型的平原丘陵过渡区, 属于特殊的地形地貌交错地带(见图 1)。降水集中, 是我国旱涝多发地之一[40]。溧阳境内河网棋布星陈, 具有较高的水源涵养功能, 近年来溧阳首倡“生态创新”, 倡议建立“长三角一体化生态创新试验区”, 使得溧阳市的生境质量引起了人们的广泛关注。溧阳作为推进江苏省社会主义现代化建设的试点, 提出要抓好生态理念模式创新, 既注重生态资源保护, 又注重创新生态资源转化路径, 以生态促进区域联动发展。本研究可为溧阳市生态文明建设过程中的生态安全格局构建和生态经济发展提供科学决策依据。

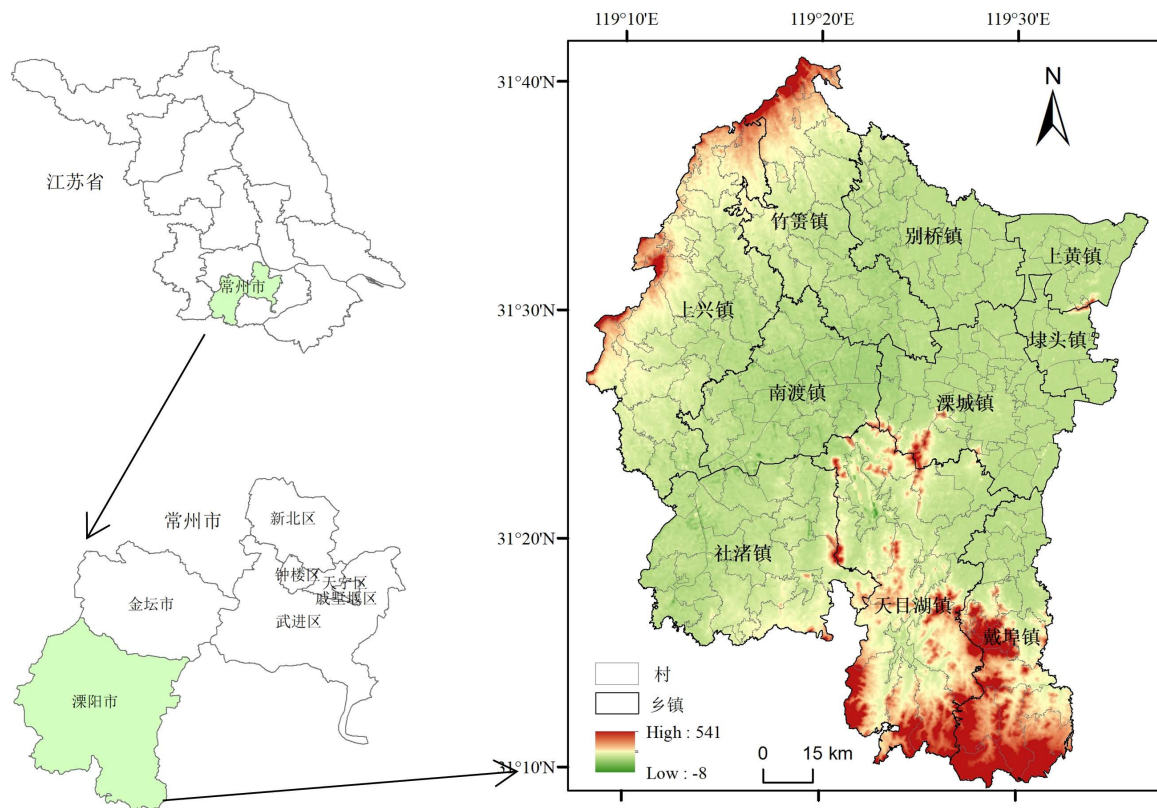


Figure 1. Overview of study area  
图 1. 研究区概况

## 3. 数据与方法

### 3.1. 数据来源

本研究中 2003~2015 年土地利用数据来源于溧阳市国土局的土地变更调查数据, 根据中国土地资源

分类系统[41]和最新的土地利用现状分类标准建立二级分类体系,然后将土地利用二级类型合并为一级类,包括草地、建设用地、水域、林地、耕地、和其他土地等六大类。栅格数据空间分辨率为30 m,数据处理是通过 ArcMap 10.2 和 GeoDa1.10 软件实现。

### 3.2. 研究方法

本研究主要采用 InVEST 模型中的生境质量模块评价研究区景观类型的生境质量和生境退化程度,在此基础上进行生境质量热点分析及空间自相关分析,使用 Getis-Ord  $G^*$ 指数[42]来刻画漯河市生境质量在局部空间上的集聚情况,通过 LISA 集聚图结合 Moran 散点图将空间格局进行可视化表达,研究该区域生境质量的空间分布规律,最后运用地理加权模型(GWR)探究漯河市各地类变化对生境质量的影响程度及作用趋势的空间差异,探讨生境质量演变与土地利用变化的交互关系。

#### 3.2.1. 基于 InVEST 模型的生境质量评估

生境质量的优劣是由 InVEST 模型的 Habitat Quality 模块基于景观类型对威胁因子的敏感性和外界对生物多样性的威胁强度测算得到的一个无量纲指数,用来评价研究区景观类型的生境适宜性和生境退化程度的综合特征[43],其计算公式为:

$$Q_{xj} = H_j \left[ 1 - \left( \frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + K^z} \right) \right] \quad (1)$$

式中:  $Q_{xj}$  是第  $j$  种地类中栅格  $x$  的生境质量;  $H_j$  是生境适宜度;  $D_{xj}$  是生境退化度;  $K$  是半饱和常数,当  $1 - \frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + K^z} = 0.5$  时,  $K$  值和  $D$  值相等;  $z$  通常默认 2.5, 为尺度常数。  $D_{xj}$  公式为:

$$D_{xj} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{Y_r} \frac{\omega_r}{\sum_{r=1}^R \omega_r} r_y i_{rxy} \beta_x S_{jr} \quad (2)$$

式中:  $R$  为威胁因子数量;  $Y_r$  为威胁因子的栅格总数;  $\omega_r$  为权重;  $r_y$  为栅格单元上威胁因子数;  $\beta_x$  为栅格  $x$  的法律保护度水平;  $S_{jr}$  表示地类  $j$  对威胁因子的敏感性;  $i_{rxy}$  为威胁因子的作用范围,计算公式为:

$$i_{rxy} = 1 - \left( \frac{d_{xy}}{d_{rmax}} \right) \quad (3)$$

式中:  $d_{xy}$  为栅格单元  $x$  与  $y$  的线性距离;  $d_{rmax}$  为威胁因子  $r$  的最大作用范围。

参考以往研究[13] [25] [44] [45],再综合考量漯河市实际状况,依据 InVEST 模型手册,以模型推荐值为基础,确定了 Habitat Quality 模块相关参数值(见表 1、表 2)。

**Table 1.** Threat factor and its maximum impact distance and weight

**表 1.** 威胁因子及其最大影响距离和权重

威胁因子	最大威胁距离	权重	空间衰减类型
农村居民点	8	0.7	指数
城镇用地	10	1.0	指数
交通用地	5	0.7	线性
水田	2	0.5	线性
旱地	2	0.5	线性

**Table 2.** Habitat suitability and its relative sensitivity to different threat sources  
**表 2.** 生境适宜度及其对不同威胁源的相对敏感程度

土地利用类型	生境适宜度	农村居民点	城镇用地	交通用地	水田	旱地
水田	0.50	0.35	0.70	0.20	0	1
旱地	0.30	0.35	0.60	0.20	1	0
城镇用地	0	0	0	0	0	0
农村居民点	0	0	0	0	0	0
其他建设用地	0	0	0	0	0	0
灌木林地	1	0.65	0.7	0.50	0.7	0.9
有林地	1	0.80	0.8	0.65	0.7	0.7
其他林地	1	0.85	0.85	0.70	0.8	0.5
草地	0.60	0.60	0.65	0.40	0.8	0.8
交通用地	0	0	0	0	0	0
水域	1	0.65	0.75	0.60	0.3	0.2
其他土地	0.10	0.20	0.20	0.15	0.3	0.4

### 3.2.2. 生境质量热点分析及空间自相关分析

本文使用 Getis-Ord  $G^*$ 指数[46]来刻画溧阳市生境质量在局部空间上的集聚情况,其计算公式[46]为:

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n \omega_{ij} x_j - x \sum_{j=1}^n \omega_{ij}}{S \sqrt{\frac{[n \sum_{j=1}^n \omega_{ij}^2 - (\sum_{j=1}^n \omega_{ij})^2]}{n-1}}} \quad (4)$$

式中,  $x_j$ 表示栅格单元  $j$  的生境质量;  $w_{ij}$ 表示栅格单元  $i$  与栅格单元  $j$  的空间权重矩阵;  $x$  和  $S$  分别表示生境质量平均值和标准差;  $n$  为栅格数量。

本文采用全局 Moran's I 指数来描述溧阳市生境质量在全域空间上的集聚效应[47]。采用 LISA (Local indicators of spatial associations) [48]来识别溧阳市各栅格单元的生境质量与其邻近栅格单元的差异程度和局部关联,将其空间格局分为 H-H (高高集聚)、H-L (高低离散)、L-H (低高离散)、L-L (低低集聚)和 NS (不显著)等 5 种类型,详细计算原理请参见文献[48]。

### 3.2.3. 地理加权回归分析

运用地理加权模型(GWR)探究溧阳市各地类变化对生境质量的影响程度及作用趋势的空间差异。该模型是将数据的地理位置嵌至回归参数,可揭示被传统模型(最小二乘法回归模型)忽略的局部特性,使变量间的关系随空间位置而变[49]。探讨生境质量演变与土地利用变化的交互关系,以生境质量指数变化为因变量,景观类型面积变化为自变量。模型表达式为:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \beta_1(u_i, v_i)x_{i1} + \beta_2(u_i, v_i)x_{i2} + \dots + \beta_p(u_i, v_i)x_{ip} + \varepsilon_i \quad (5)$$

式中:  $y_i$ 表示  $i$  的因变量解释值;  $x_{ip}$ 表示  $i$  的自变量解释值;  $(u_i, v_i)$ 是  $i$  的地理坐标;  $\beta_p(u_i, v_i)$ 是坐标  $(u_i, v_i)$  处的回归参数;  $\varepsilon_i$ 表示随机误差项。

本文采用 Adaptive 校准权重函数,其权重函数表达式为:

$$W_{ij} = \exp\left[-\left(d_{ij}/b\right)^2\right] \quad (6)$$

式中： $b$  表示基带宽度，采用 BANDWIDTH\_PARAMETER 确定； $d_{ij}$  表示位置 $(\mu_i, \nu_i)$ 到位置 $(\mu_j, \nu_j)$ 的间距。

## 4. 结果分析

### 4.1. 土地利用转移变化分析

结合土地利用类型图(见图 2)，统计溧阳市 2003~2015 年各地类面积(见表 3)可知：耕地、林地、建设用地和水域等四大地类是溧阳市主要的景观类型，总占比高达 90%以上。其中耕地、水域和建设用地三类景观变化较大，2003~2009 年，耕地减幅 18.43%，建设用地和水域分别增幅 39.03%和 27.13%；2009~2015 年，水域减幅 5.17%，耕地和建设用地分别增幅 1.66%和 7.07%。总体来看，12 年间耕地和草地分别减幅 17.05% (126.43 km<sup>2</sup>)、71.22% (26.06 km<sup>2</sup>)；建设用地、林地和水域分别增幅为 48.86% (80.46 km<sup>2</sup>)、4.33% (13.28 km<sup>2</sup>)、20.56% (58.34 km<sup>2</sup>)；其他土地变化不大。可见，建设用地持续扩张，耕地大幅减少是溧阳市土地利用变化的主要特点，建设用地的大肆增长以占用大量耕地和草地为代价。

进一步解释 12 年来溧阳市土地利用变化情况，由土地利用转移矩阵(见表 4)和土地利用转移变化图谱(见图 3)可明显得出：2003~2009 年间溧阳市的用地类型转换频繁，2009~2015 年间整体趋于平稳。2003~2009 年土地利用的转移主要发生在耕地、林地、建设用地和水域之间，相互流转面积比例较大。耕地以流向林地、建设用地和水域为主，林地则以流向耕地和建设用地为主，林地和建设用地转出明显低于转入。且可以明显看出溧阳市建设用地与耕地的置换规模和建设用地对耕地的占用面积都较大；与上一时段相比，2009~2015 年间转移数量和速度明显减缓，且主要以耕地和建设用地的相互转移为主，水域流向耕地的面积远远高于其转入面积。总体分析，溧阳市水域面积的增加对溧阳市生态环境起到改善作用，在有限的空间资源中，建设用地大肆增长在满足人类需求的同时是以减少生态用地面积为代价，我们仍需加强对生态用地保护政策的落实。

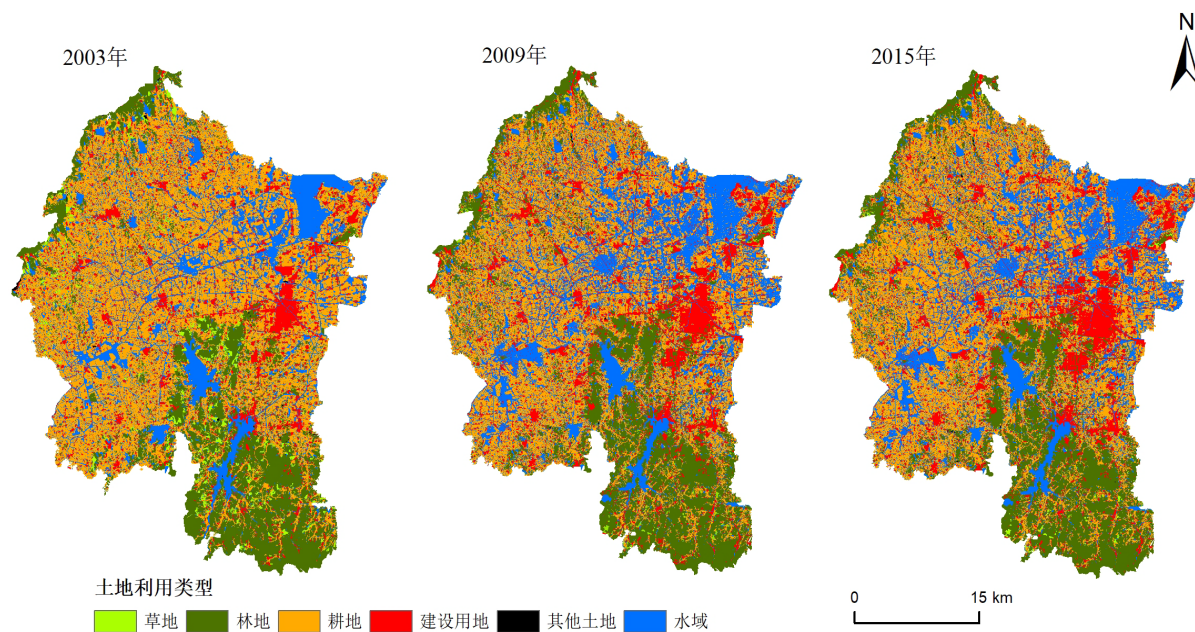
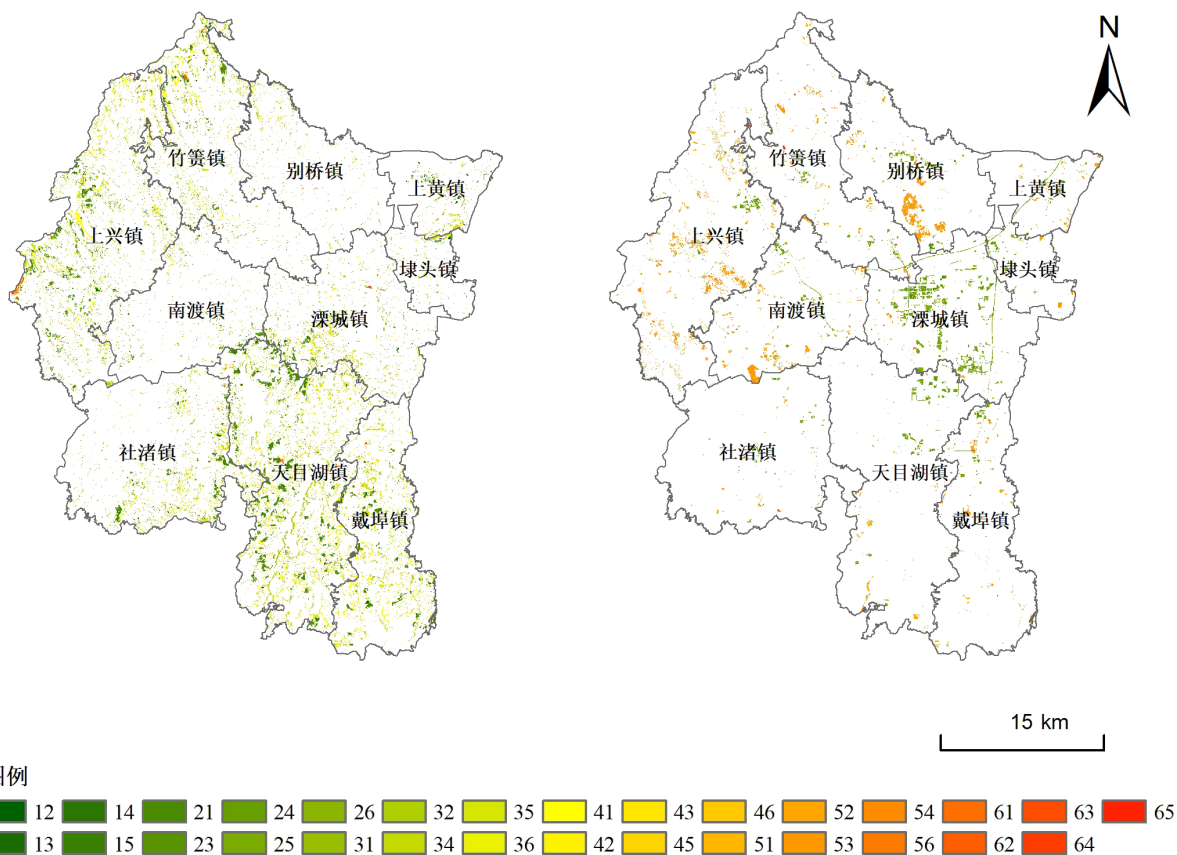


Figure 2. Land use type map from 2003 to 2015

图 2. 2003~2015 年土地利用类型图

**Table 3.** Liyang City in different years around the class area  
**表 3.** 不同年份溧阳市各地类的面积

土地利用类型	2003 年		2009 年		2015 年	
	面积 km <sup>2</sup>	比例%	面积 km <sup>2</sup>	比例%	面积 km <sup>2</sup>	比例%
草地	36.59	2.38%	12.35	0.80%	10.53	0.69%
耕地	741.42	48.32%	604.94	39.42%	614.99	40.08%
建设用地	164.67	10.73%	228.94	14.92%	245.13	15.97%
林地	306.35	19.96%	326.28	21.26%	319.63	20.83%
其他土地	1.75	0.11%	1.29	0.08%	2.16	0.63%
水域	283.72	18.49%	360.70	23.51%	342.06	22.29%



12: 草地转为建设用地; 13: 草地转为水域; 14: 草地转为林地; 15: 草地转为耕地; 21: 建设用地转为草地; 23: 建设用地转为水域; 24: 建设用地转为林地; 25: 建设用地转为耕地; 26: 建设用地转为其他用地; 31: 水域转为草地; 32: 水域转为建设用地; 34: 水域转为林地; 35: 水域转为耕地; 36: 水域转为其他用地; 41: 林地转为草地; 42: 林地转为建设用地土地; 43: 林地变成水域; 45: 林地变成耕地; 46: 林地变成其他土地; 51: 耕地变成草地; 52: 耕地变成建设用地; 53: 耕地变成水域; 54: 耕地变成林地; 56: 耕地转为其他土地; 61: 其他土地转为草地; 62: 其他土地转为建设用地; 63: 其他土地转为水域; 64: 其他土地转为林地; 65: 其他土地转为耕地。

**Figure 3.** Atlas of land use change in Liyang City from 2003 to 2015

**图 3.** 2003~2015 年溧阳市土地利用变化图谱



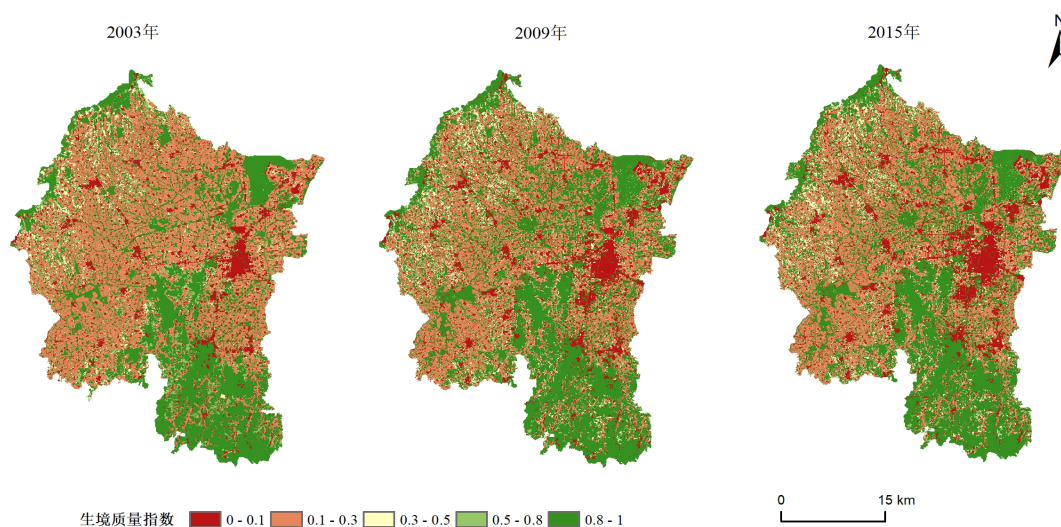
**Table 4.** Land use transfer matrix from 2003 to 2015**表 4.** 2003~2015 年土地利用转移矩阵

年份	地类 (面积 km <sup>2</sup> )	草地	耕地	建设用地	林地	其他土地	水域
2003~2009	草地	0.90	3.90	1.01	5.08	0.06	1.40
	耕地	9.02	416.68	48.08	49.32	0.29	81.55
	建设用地	4.23	92.92	77.22	26.55	0.62	27.40
	林地	19.24	65.92	16.48	205.13	0.61	18.90
	其他土地	0.06	0.64	0.11	0.23		0.25
	水域	3.14	161.36	21.77	20.04	0.17	154.22
2009~2015	草地	10.50	0.01	0.01	0.01		
	耕地	1.11	590.97	5.92	2.51	0.02	14.46
	建设用地	0.71	12.66	222.69	4.03	0.02	5.02
	林地	0.01	0.14	0.17	319.26		0.05
	其他土地	0.01	0.43	0.02	0.35	1.25	0.10
	水域	0.01	0.73	0.13	0.12		341.07

## 4.2. 生境质量变化分析

### 4.2.1. 生境质量时空格局变化

运用 InVEST 模型获取 2003~2015 年溧阳市生境质量指数空间分布状况(见图 4), 使用自然断点方法将其分为高(0.8~1.0)、较高(0.5~0.8)、中(0.3~0.5)、较低(0.1~0.3)和低(0~0.1) 5 个等级。从空间格局来看, 溧阳市生境质量总体上高等级和较低等级占较大比例, 在空间上存在明显的异质性, 区域差异较大。整体呈现南高北低、东高西低之势, 且从中心到外围逐渐提高。其中, 森林覆盖率较高的南部中低山区, 生境质量指数多处于 0.8~1.0 之间, 该区域人为干扰较弱, 生境适宜性程度高; 中部平原区及平原-山区交界的生境质量指数处多在 0.3 以下, 该区域居民点密集且林耕交错, 人类活动对生境的干扰频繁, 且建设用地持续增加导致景观破碎, 应成为未来生态规划过程中的关注重点。

**Figure 4.** Spatial distribution of habitat quality in Liyang city**图 4.** 溧阳市生境质量空间分布

从时间变化来看(见表 5), 2003~2009 年溧阳市高等级生境质量增幅 15.15%, 较低等级生境质量减幅 26.84%, 折射出近年来溧阳坚守绿色发展理念成效显著, 生境质量取得明显改善。2009~2015 年溧阳市生境质量主要以高等级和较低等级为主, 生境质量各等级面积变化较小。表明 2003~2009 年溧阳市的生境质量逐渐提升, 2009~2015 年趋于稳定。同时反映出溧阳市生境质量逐渐提升与耕地(威胁因子)面积显著减少及林地(生境适宜性高)面积增加的因素密不可分, 虽建设用地(威胁因子)面积也增加, 但其增幅小于耕地(威胁因子)减少和林地(生境适宜性高)增加的总幅度, 所以溧阳市整体生境质量水平提升, 也阐明了生境质量水平受地类转化作用较大。

**Table 5.** The quality area and proportion of different grades of habitat in Liyang city in different years  
**表 5.** 不同年份溧阳市各等级生境质量面积及其比例

生境质量等级	指数区间	2003 年		2009 年		2015 年	
		面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%
低	0~0.1	167.15	10.89	234.61	15.29	251.58	16.39
较低	0.1~0.3	629.39	41.01	460.45	30.00	469.15	30.57
中	0.3~0.5	102.35	6.67	137.27	8.94	138.82	9.05
较高	0.5~0.8	37.11	2.42	12.85	0.84	11.00	0.72
高	0.8~1.0	598.75	39.01	689.48	44.93	664.11	43.27

#### 4.2.2. 生境质量热点分析及空间自相关分析

空间热点探索揭示了溧阳市生境质量空间分布呈“南部和边缘区热、中部冷”的格局。如图所示(见图 5): 热点区主要位于溧阳南部和边缘区, 包括天目湖镇、戴埠镇和上黄镇, 该区域植被覆盖度较高, 水资源丰富, 属于水源涵养区, 生境质量指数较高; 冷点区主要分布于以溧城镇为主的中部平原区, 该区建设用地快速增加, 居民点密集, 胁迫因子对周围生境施压, 导致景观连通性变差, 破碎度加剧, 生境质量指数低。次热点和次冷点主要分布在中部且相对分散, 主要由于大量农村居民点和交通道路等威胁因子分布于此, 胁迫效应致使生境质量不高。

由全局空间自相关可知(见图 6), 溧阳市 2003、2009 和 2015 年生境质量的全局 Moran's I 指数分别为 0.513、0.329 和 0.360 ( $P < 0.01$ ), 表明溧阳市生境质量在空间上存在集聚现象, 也从侧面揭示各区域发展紧密联系, 呈一定空间正相关性。2003~2015 年全球 Moran's I 指数的变化表明 2003~2009 年生境质量空间集聚有分散趋势, 至 2015 年又进一步集中。由图 7 可得出溧阳市生境质量“H-H”集聚主要位于溧阳南部和东部, 具体包括天目湖镇、戴埠镇和上黄镇, 表明该区域总体生境质量较好(见图 7)。2003~2015 年, “H-H”集聚区减少 1.38%, 表明 2003~2015 年间, 该区域的生态环境质量略微下降。“H-L”和“L-H”离散区在 2003~2009 年间微弱增加, 至 2015 年“H-L”离散区呈微弱下降之势, “L-H”离散区保持不变, 且未出现明显的集中分布。2003~2015 年间, “L-L”集聚区呈增加态势, 但 2009~2015 年间增速相较 2003~2009 年间有所减缓(见表 6), 该区主要位于溧城镇及居民点密集区, 生境质量较低, 加强印证了城镇扩张对生境的威胁, 未来需加强落实该区域的生态保育工作。溧阳市生境质量 LISA 集聚分布态势与近年来城镇扩张的核心区域和辐射方向较为一致。

#### 4.3. 土地利用变化与生境质量权衡关系

用地理加权回归模型(GWR)在空间上定量刻画溧阳市生境质量演变与土地利用变化的交互关系, 探讨其时空分异(见图 8)。处理得到数据的模型拟合优度  $R^2$  为 0.625, 说明模型的拟合结果较优。GWR 模

型的运算结果中溧阳市各个地类对生境质量影响都有特定的回归系数，各地类回归系数在空间上呈现出影响效应的显著差异(见表 7)。

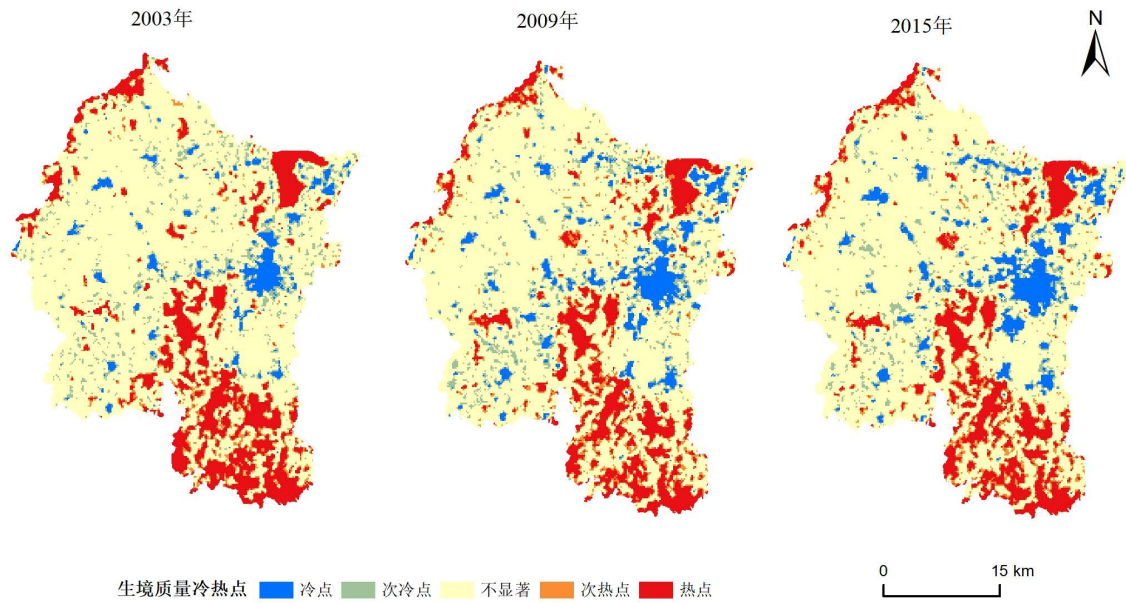


Figure 5. Distribution of habitat quality hotspots in Liyang  
图 5. 溧阳生境质量热点分布

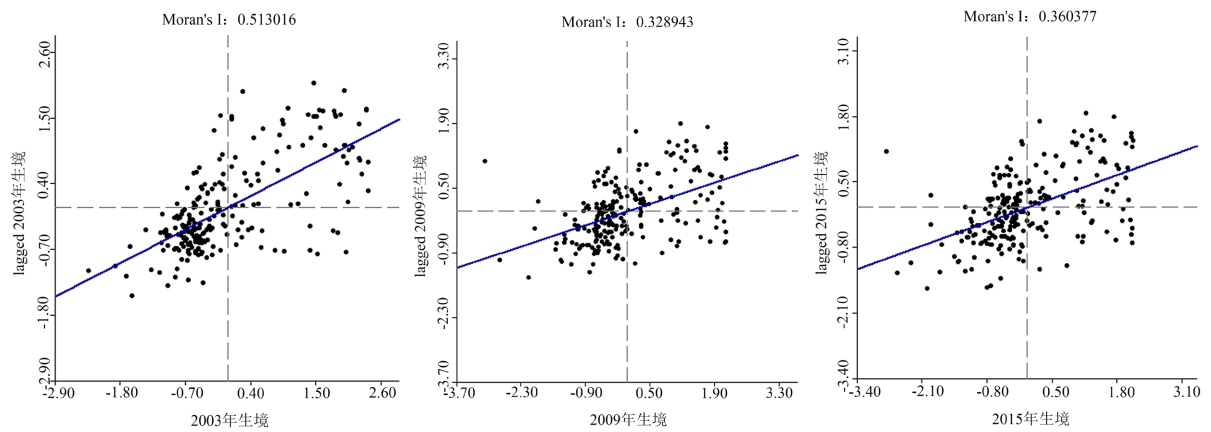
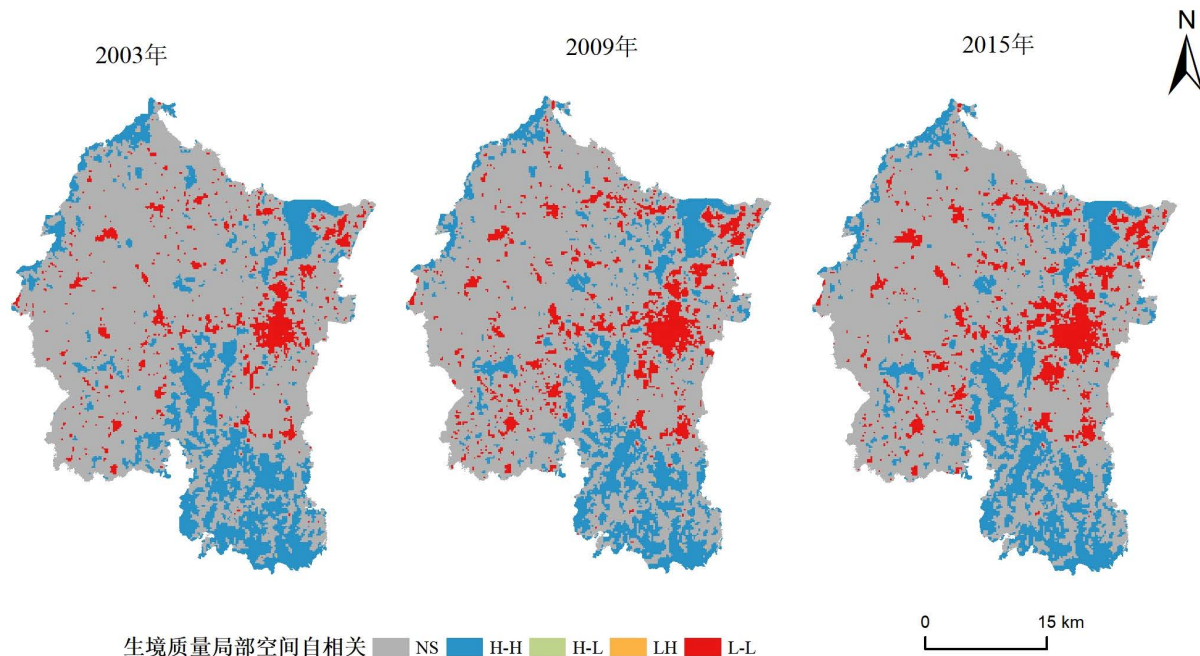


Figure 6. Global spatial autocorrelation  
图 6. 全局空间自相关

Table 6. The relation area of each agglomeration  
表 6. 各集聚关系面积情况

年份	H-H		H-L		L-H		L-L		NS	
	面积 km <sup>2</sup>	比例%	面积 km <sup>2</sup>	比例%	面积 km <sup>2</sup>	比例%	面积 km <sup>2</sup>	比例%	面积 km <sup>2</sup>	比例%
2003	296.54	19.32	0.08	0.01	0.28	0.02	95.06	6.19	1142.53	74.46
2009	275.44	17.95	0.18	0.01	0.42	0.03	144.17	9.40	1114.31	72.62
2015	275.31	17.94	0.13	0.01	0.42	0.03	149.24	9.73	1109.40	72.30



**Figure 7.** LISA agglomeration map of habitat quality in Liyang city  
**图 7.** 溧阳市生境质量 LISA 集聚图

**Table 7.** GWR model parameter estimation and test results  
**表 7.** GWR 模型参数估计及检验结果

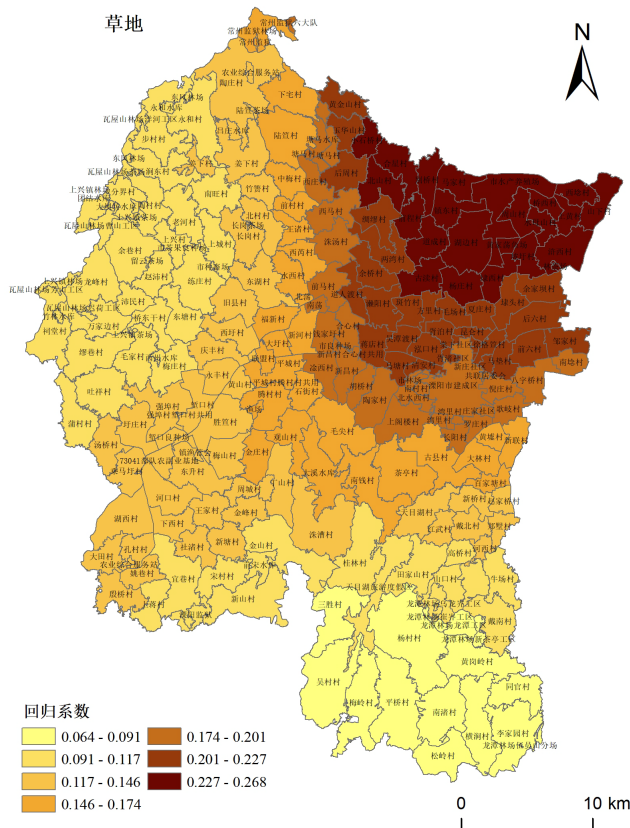
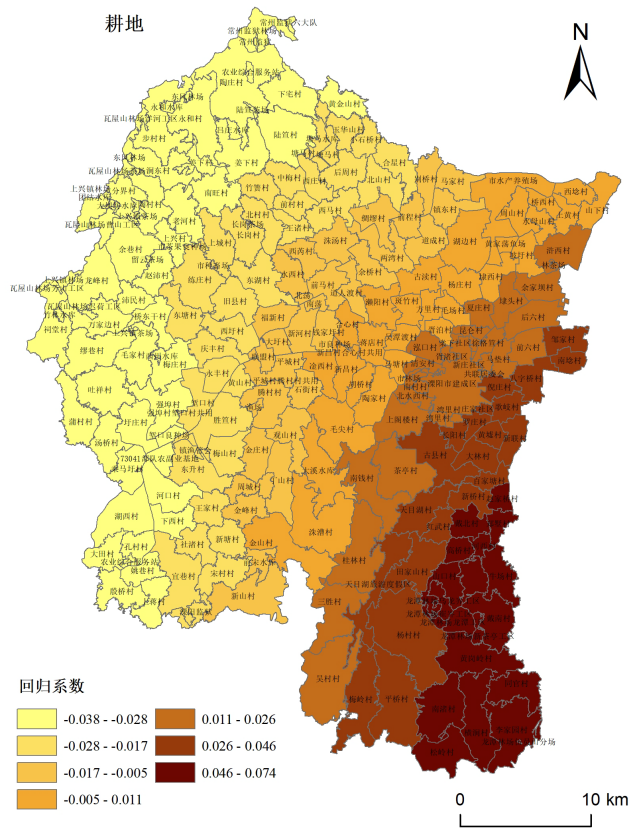
时间	Bandwidth	Residual Squares	Effective Number	Sigma	AICc	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Adjusted
2009~2015	13059.868	0.096	21.047	0.021	-1129.182	0.625	0.590

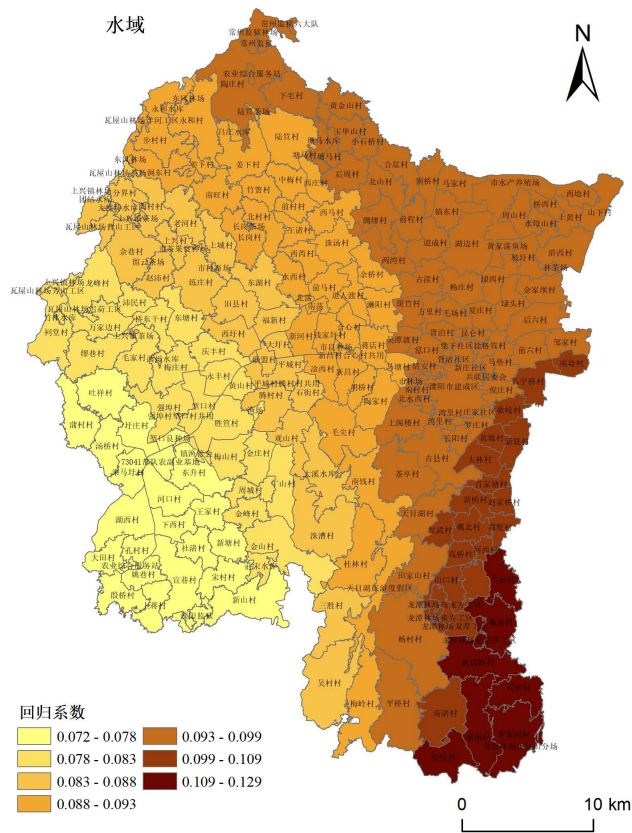
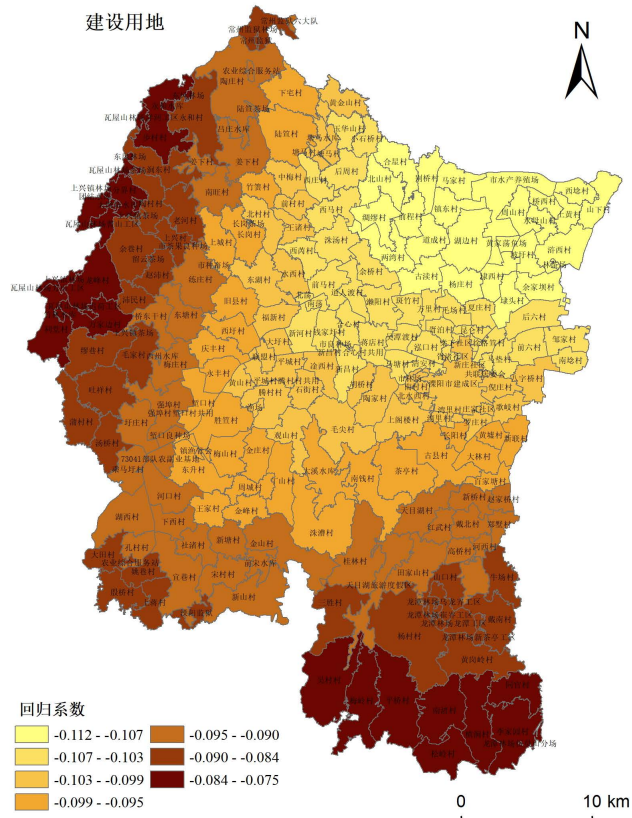
生境质量对耕地变化的响应趋势大致呈“由东南向西北递减”的空间差异，耕地与生境质量变化主要呈现正负相关效应并存的关系。在二者关系呈正相关效应的区域，表明耕地变化与生境质量变化是协同关系，耕地扩增有利于提高生境质量水平，呈负相关效应的区域，表明耕地变化与生境质量变化是权衡关系，耕地减退会加速降低生境质量水平；生境质量对林地和草地变化的响应在空间格局上较为一致，呈“由东向西递减”之势，都存在较高的正相关效应，表明林地和草地变化与生境质量变化是协同关系。扩增林地和草地面积，可切实提高植被覆盖率，给生境质量带来较大提升，林地和草地与生境质量变化的影响效应由东向西逐减，相关系数较大区域主要分布在东北部的上黄镇、埭头镇和别桥镇；溧阳市生境质量对水域变化的响应在空间上大致呈“东南高西南低”之势，也具有较高的正相关效应，表明水域变化与生境质量变化是协同关系，水域面积扩增对植被恢复有较好的促进作用，可推进实现该区域水源涵养能力的提升，从而改善生境质量。溧阳市生境质量与建设用地变化在空间上主要呈现负相关效应，表明耕地变化与生境质量变化是权衡关系，更加印证建设用地的扩张给提高生境质量水平会造成较大负面影响，我们需合理管控“三生”用地结构，扩增林地、草地和水体等生态用地。

## 5. 结论与讨论

### 5.1. 结论

本文基于 InVEST 和 GWR 模型，对 2003~2015 年江苏省溧阳市土地利用类型的变迁、生境质量的时空分异及演变特征进行了评估，从空间上定量刻画了各地类变化对生境质量的影响，得到的结论如下：





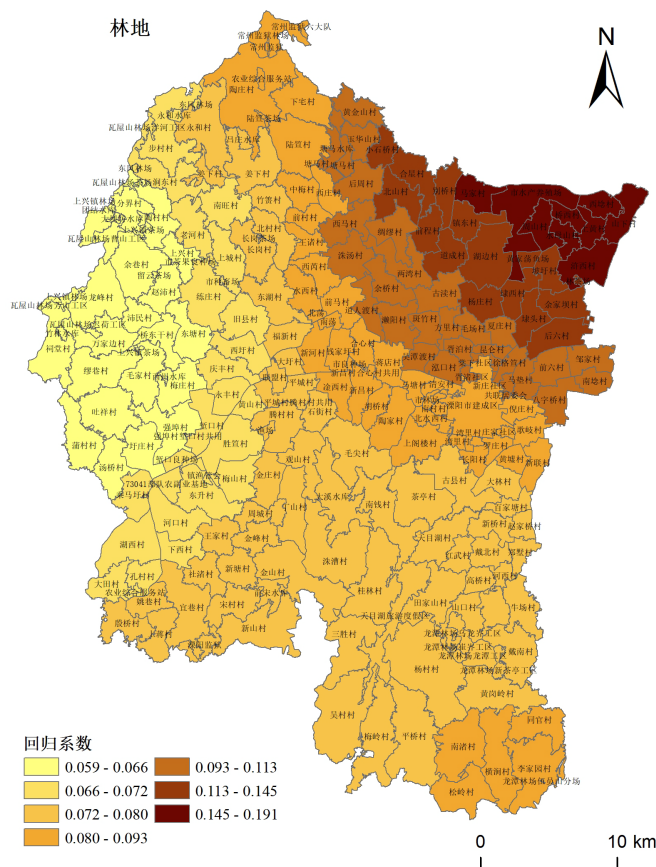


Figure 8. Spatial distribution of regression coefficients of GWR model  
图 8. GWR 模型回归系数空间分布

1) 2003~2009 年间, 溧阳市土地利用的转移主要发生在耕地、林地、建设用地和水域之间, 相互间的转入和转出面积比例较大。耕地和草地面积呈缩减之势, 建设用地、林地和水域面积呈增长趋势, 其中建设用地增幅最大。2009~2015 年整体转移数量和速度明显减缓, 且主要以耕地和建设用地的相互转移为主, 水域流向耕地的面积远远高于其转入面积。

2) 从时间尺度来看, 2003~2009 年溧阳市的生境质量逐渐提升, 2009~2015 年趋于稳定; 从空间尺度上看, 溧阳市的生境质量具有明显的空间异质性和空间集聚现性, 高水平 and 较低水平区域占比较大。生境质量空间冷热点分布呈现出“南部和边缘区热、中部冷”的格局。热点区域主要位于南部和溧阳边缘区, 该区域同时是生境质量“H-H”集聚区, 生境质量指数较高; 冷点主要分布于居民点密集的中部平原区, 同时也是生境质量在空间分布上的“L-L”集聚区, 以溧城镇为主, 该区域生境质量较低。

3) 地理加权回归模型(GWR)显示, 各地类的回归系数在空间上呈现出影响效应的显著差异, 生境质量对耕地变化的响应大致呈“由东南向西北递减”的趋势, 二者正负相关效应并存, 呈正相关效应的区域呈协同关系, 呈负相关效应的区域呈权衡关系; 生境质量对林地、草地和水域变化的响应具有较高的正相关效应, 呈协同关系, 面积的增加可提升生境质量水平; 生境质量与建设用地变化在空间上呈负相关效应, 呈权衡关系, 其面积扩张会对生境造成严重干扰。

## 5.2. 讨论

土地利用是影响生境质量的主要驱动因子。溧阳市不同区域的自然条件和土地利用变化特征存在差

异,因此其生境质量的时空特征各异。根据评估结果,本研究区较低生境质量区域主要分布在溧城镇等居民点密集的中部平原区,高生境质量区域主要分布在包括天目湖镇、戴埠镇和上黄镇等的南部和溧阳边缘区。这与吴建生等学者[13]研究了 2000~2010 年京津冀地区的生境质量时空特征与本研究所得出的结果高度相似,都得出在靠近城市或主路交叉口等区域生境质量较低,而受人为干扰少的山地、高原区生境质量更优的结论。

在本研究中,利用 GWR 模型空间显式化表达溧阳市生境质量对土地利用变化的响应机制。结果显示,由于林地和草地的较高生境适宜度使其对生境质量的作用较大且二者呈正相关趋势。具有一定生境适宜性的耕地由于易被人类活动干扰,其变化与生境质量在空间主要呈负相关效应,东南部呈正相关趋势。建设用地的生境适宜度等级处于较低水平,其面积扩张会对生境造成严重干扰,溧阳市生境质量与其面积变化在空间上呈负相关效应。这项研究的结果与王惠[37]对张家口市的生境质量研究结论基本一致。生境质量的演变受各种类型土地变化的综合影响。因此,研究区应根据土地利用对生境质量的内部影响机制制定适当的保护措施。以林地和草地等生态用地为主的片区,未来应以改善生境质量为基础,重点改善其景观连通性,加强生态系统稳定性,不应单方面集中于退耕还林还草;在人口和经济密度高的地区,合理管控“三生”用地结构,避免建设用地迅速零散化的扩张,扩增林地、草地和水体等生态用地,推进人居环境整治。

本研究依然存在待商榷之处。当使用 InVEST 模型评估生境质量时,本文未考虑研究区以外的胁迫因子对生境的作用,可能会导致评估结果不精准,未来应调查收集研究区边缘的胁迫因子数据,并对比分析其与实测数据的异同,提高评估的准确度。此外,本研究进行地理加权回归模型分析时  $R^2$  为 0.625,虽表明研究尺度较为合理,但其适用性仍需进一步探讨。

## 基金项目

国家自然科学基金项目“县域土地利用格局‘三生’融合模式研究”(41671174);江苏省高校优势学科建设工程资助项目(164320H116)。

## 参考文献

- [1] Shelford, V.E. (1932) An Experimental and Observational Study of the Chinch Bug in Relation to Climate and Weather. *Champaign Illinois Natural History Survey*, **19**, 487-554. <https://doi.org/10.21900/j.inhs.v19.276>
- [2] Johnson, M.D. (2005) Habitat Quality: A Brief Review for Wildlife Biologists. *Transactions of the Western Section of the Wildlife Society*, **41**, 31-41.
- [3] 戴尔阜, 王晓莉, 朱健佳, 等. 生态系统服务权衡: 方法、模型与研究框架[J]. 地理研究, 2016, 35(6): 1005-1016.
- [4] Forman, R.T.T., Sperling, D., Bissonette, J.A., Clevenger, A.P., Cutshall, C.D., Dale, V.H., Fahrig, L., France, R.L., Goldman, C.R., Heanue, K., Jones, J., Swanson, F., Turrentine, T. and Winter, T.C. (2003) *Road Ecology: Science and Solutions*. Island Press, Washington DC.
- [5] 刘春芳, 王川, 刘立程. 三大自然区过渡带生境质量时空差异及形成机制——以榆中县为例[J]. 地理研究, 2018, 37(2): 419-432.
- [6] McKinney, M.L. (2002) Urbanization, Biodiversity, and Conservation: The Impacts of Urbanization on Native Species are Poorly Studied, but Educating a Highly Urbanized Human Population about These Impacts Can Greatly Improve Species Conservation in All Ecosystems. *BioScience*, **52**, 883-890. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2002\)052\[0883:UBAC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2002)052[0883:UBAC]2.0.CO;2)
- [7] 何莎莎, 叶露培, 朱文博, 等. 太行山淇河流域 2000-2015 年土壤侵蚀和水源供给变化研究[J]. 地理研究, 2018, 37(9): 1775-1788.
- [8] 王军, 顿耀龙. 土地利用变化对生态系统服务的影响研究综述[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(5): 798-808.
- [9] 何莎莎, 李欣, 何春龙, 等. 基于土地利用变化的扬州市广陵区景观生态风险评价[J]. 南京师大学报(自然科学版), 2019, 42(1): 139-148.



- [10] 刘春芳, 王川. 基于土地利用变化的黄土丘陵区生境质量时空演变特征——以榆中县为例[J]. 生态学报, 2018, 38(20): 7300-7311.
- [11] 冯舒, 孙然好, 陈利顶. 基于土地利用格局变化的北京市生境质量时空演变研究[J]. 生态学报, 2018, 38(12): 4167-4179.
- [12] 刘智方, 唐立娜, 邱全毅, 肖黎珊, 许通, 杨丽. 基于土地利用变化的福建省生境质量时空变化研究[J]. 生态学报, 2017, 37(13): 4538-4548.
- [13] 吴健生, 曹祺文, 石淑芹, 等. 基于土地利用变化的京津冀生境质量时空演变[J]. 应用生态学报, 2015, 26(11): 3457-3466.
- [14] Burel, F. and Baudry, J. (2005) Habitat Quality and Connectivity in Agricultural Landscapes: The Role of Land Use Systems at Various Scales in Time. *Ecological Indicators*, **5**, 305-313. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2005.04.002>
- [15] Miserendino, M.L., Casaux, R., Archangelsky, M., et al. (2011) Assessing Land-Use Effects on Water Quality, in Stream Habitat, Riparian Ecosystems and Biodiversity in Patagonian Northwest Streams. *Science of the Total Environment*, **409**, 612-624. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.10.034>
- [16] Polasky, S., Nelson, E., Pennington, D., et al. (2011) The Impact of Land-Use Change on Ecosystem Services, Biodiversity and Returns to Landowners: A Case Study in the State of Minnesota. *Environmental & Resource Economics*, **48**, 219-242. <https://doi.org/10.1007/s10640-010-9407-0>
- [17] Goertz, J.W. (1964) The Influence of Habitat Quality upon Density of Cotton Rat Populations. *Ecological Monographs*, **34**, 359-381. <https://doi.org/10.2307/2937068>
- [18] Engel, D.W., Thayer, G.W. and Evans, D.W. (1999) Linkages between Fishery Habitat Quality, Stressors, and Fishery Populations. *Environmental Science & Policy*, **2**, 465-475. [https://doi.org/10.1016/S1462-9011\(99\)00043-X](https://doi.org/10.1016/S1462-9011(99)00043-X)
- [19] 陈淼, 苏晓磊, 党成强, 等. 三峡水库河流生境评价指标体系构建及应用[J]. 生态学报, 2017, 37(24): 8433-8444.
- [20] 杨娟, 葛剑平, 洪军. 卧龙地区流域土地覆盖变化及其对大熊猫潜在生境的影响[J]. 生态学报, 2006, 26(6): 1975-1980.
- [21] 刘旻霞. 敦煌西湖自然保护区生物多样性特征及生境质量评价[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(3): 171-175.
- [22] 杨建强, 朱永贵, 宋文鹏, 等. 基于生境质量和生态响应的莱州湾生态环境质量评价[J]. 生态学报, 2014, 34(1): 105-114.
- [23] 刘红玉, 李兆富, 白云芳. 挠力河流域东方白鹤生境质量变化景观模拟[J]. 生态学报, 2006, 26(12): 4007-4013.
- [24] Bagstad, K.J., Villa, F., Johnson, G.W., et al. (2011) ARIES-Artificial Intelligence for Ecosystem Services: A Guide to Models and Data, Version 1.0. The ARIES Consortium, Bilbao.
- [25] 包玉斌, 刘康, 李婷, 等. 基于 InVEST 模型的土地利用变化对生境的影响——以陕西省黄河湿地自然保护区为例[J]. 干旱区研究, 2015, 32(3): 622-629.
- [26] Tallis, H., Ricketts, T., Guerry, A., et al. (2015) InVEST 3.2.0 User's Guide: Integrated Valuation of Environmental Services and Trade-Offs. The Natural Capital Project, Stanford.
- [27] Sherrouse, B.C., Semmens, D.J. and Clement, J.M. (2014) An Application of Social Values for Ecosystem Services (SoIVES) to Three National Forests in Colorado and Wyoming. *Ecological Indicators*, **36**, 68-79. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.07.008>
- [28] 张文广, 胡远满, 胡锦矗, 等. 四川省汶川县土地利用变化对森林野生动物生境的影响[J]. 生态学杂志, 2008, 27(11): 1985-1989.
- [29] Brambilla, M., Casale, F., Bergero, V., et al. (2010) Glorious Past, Uncertain Present, Bad Future? Assessing Effects of Land-Use Changes on Habitat Suitability for a Threatened Farmland Bird Species. *Biological Conservation*, **143**, 2770-2778. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2010.07.025>
- [30] Stoll, S., Frenzel, M., Burkhard, B., et al. (2015) Assessment of Ecosystem Integrity and Service Gradients across Europe Using the LTER Europe Network. *Ecological Modelling*, **295**, 75-87. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.06.019>
- [31] Wong, C.P., Bo, J., Kinzig, A.P., et al. (2015) Linking Ecosystem Characteristics to Final Ecosystem Services for Public Policy. *Ecology Letters*, **18**, 108-118. <https://doi.org/10.1111/ele.12389>
- [32] Mushet, D.M. and Neau, J.L. (2014) Modeling Effects of Conservation Grassland Losses on Amphibian Habitat. *Biological Conservation*, **174**, 93-100. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2014.04.001>
- [33] 孙传璋, 甄霖, 王超, 等. 基于 InVEST 模型的鄱阳湖湿地生物多样性情景分析[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(7): 1119-1125.
- [34] 白健, 刘健, 余坤勇, 等. 基于 InVEST-Biodiversity 模型的闽江流域生境质量变化评价[J]. 中国科技论文, 2015,

---

10(15): 1782-1788

- [35] 荣月静, 张慧, 王岩松. 基于 Logistic-CA-Aarkov 与 InVEST 模型对南京市土地利用与生物多样性功能模拟评价[J]. 水土保持研究, 2016, 23(3): 82-89.
- [36] 钟莉娜, 王军. 基于 InVEST 模型评估土地整治对生境质量的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 250-255.
- [37] 王惠, 许月卿, 刘超, 等. 基于地理加权回归的生境质量对土地利用变化的响应——以河北省张家口市为例[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2019, 55(3): 509-518.
- [38] Fotheringham, A.S., Charlton, M.E. and Brunsdon, C. (1998) Geographically Weighted Regression: A Natural Evolution of the Expansion Method for Spatial Data Analysis. *Environment & Planning A*, **30**, 1905-1927. <https://doi.org/10.1068/a301905>
- [39] Propastin, P. (2012) Modifying Geographically Weighted Regression for Estimating Aboveground Biomass in Tropical Rain-Forests by Multispectral Remote Sensing Data. *The International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **18**, 82-90. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2011.12.013>
- [40] 狄百花, 钱半吨, 杨明, 等. 1978-2017 年溧阳市降水特征分析[J]. 河南农业, 2018(32): 27-29, 35.
- [41] 刘纪远. 国家资源环境遥感宏观调查与动态监测研究[J]. 遥感学报, 1997, 1(3): 225-230.
- [42] Getis, A. and Ord, J.K. (1992) The Analysis of Spatial Association by Use of Distance Statistics. *Geographical Analysis*, **24**, 189-206. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1992.tb00261.x>
- [43] Peng, J., Pan, Y.J., Liu, Y.X., et al. (2018) Linking Ecological Degradation Risk to Identify Ecological Security Patterns in a Rapidly Urbanizing Landscape. *Habitat International*, **71**, 110-124. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2017.11.010>
- [44] 陈妍, 乔飞, 江磊. 基于 InVEST 模型的土地利用格局变化对区域尺度生境质量的影响研究——以北京为例[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2016, 52(3): 553-562.
- [45] 任涵, 张静静, 朱文博, 等. 太行山淇河流域土地利用变化对生境的影响[J]. 地理科学进展, 2018, 37(12): 1693-1704.
- [46] Ord, J.K. and Getis, A. (1995) Local Spatial Autocorrelation Statistics: Distributional Issues and an Application. *Geographical Analysis*, **27**, 286-306. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00912.x>
- [47] Moran (1950) Notes on Continuous Stochastic Phenomena. *Biometrika*, **37**, 17-23. <https://doi.org/10.1093/biomet/37.1-2.17>
- [48] Anselin, L. (1995) Local Indicators of Spatial Association—LISA. *Geographical Analysis*, **27**, 93-115. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x>
- [49] 王少剑, 高爽, 陈静. 基于 GWR 模型的中国城市雾霾污染影响因素的空间异质性研究[J]. 地理研究, 2020, 39(3): 651-668.