#### DOI: 10.5846/stxb202003260700

陈晓辉,曾晓莹,赵超超,邱荣祖,张兰怡,侯秀英,胡喜生.基于遥感生态指数的道路网络生态效应分析——以福州市为例.生态学报,2021,41 (12):4732-4745.

Chen X H, Zeng X Y, Zhao C C, Qiu R Z, Zhang L Y, Hou X Y, Hu X S.The ecological effect of road network based on remote sensing ecological index: a case study of Fuzhou City, Fujian Province. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(12):4732-4745.

# 基于遥感生态指数的道路网络生态效应分析

——以福州市为例

## 陈晓辉,曾晓莹,赵超超,邱荣祖,张兰怡,侯秀英,胡喜生\*

福建农林大学交通与土木工程学院,福州 350002

摘要:以 2000 年和 2016 年两期 Landsat 影像为基础数据源,借助遥感生态指数(RSEI)对福州市生态环境进行评价,在此基础 上,从道路缓冲区、城乡梯度带、剖面线三种不同取样方法定量探讨 RSEI 对路网的响应机制;再以 500 m×500 m、1000 m×1000 m、1500 m×1500 m、2000 m×2000 m、2500 m×2500 m、3000 m×3000 m 不同尺度的网格划分空间单元,运用全局空间自相关、地理 加权回归分析等方法分析了道路核密度(KDE)和 RSEI 及其之间关系的空间异质性。结果表明:从 2000 年到 2016 年,福州市 生态环境好的区域面积增幅大于生态环境差的区域面积,生态环境质量向好的方向发展。各类型道路缓冲区的 RSEI 变化规律 都是呈从 0 m 到 3000 m 逐渐上升的趋势,其中国道、省道、县道、乡镇道路影响的阈值分别在 900、900、450、750 m 左右。在城乡 梯度分析中,RSEI 曲线的变化规律都是随着与行政中心距离的增大而增大,到达一定阈值后趋于平缓,甚至还有小幅度的下 降,区级的影响阈值在 20 km 左右,县级的影响阈值在 12 km 左右;而 KDE 曲线的变化规律与 RSEI 相反,其变化阈值与 RSEI 正好对应。剖面线所经过的行政中心处,其 RSEI 为低值,KDE 为高值,西北方向的内陆地区 RSEI 高于东南方向的沿海地区。 在多尺度的地理加权回归分析中,1500 m×1500 m 和 2000 m×2000 m 这两个网格单元采样下的空间集聚性较强,空间异质性明 显,总体上来看,RSEI 与 KDE 呈现负相关关系,且相关关系存在空间分异,负回归系数主要分布在研究区的中心区域。研究结 果可为福州市生态建设和路网规划提供参考依据。

关键词:遥感生态指数;生态环境;路网密度;空间自相关;地理加权回归

# The ecological effect of road network based on remote sensing ecological index: a case study of Fuzhou City, Fujian Province

CHEN Xiaohui, ZENG Xiaoying, ZHAO Chaochao, QIU Rongzu, ZHANG Lanyi, HOU Xiuying, HU Xisheng<sup>\*</sup> College of Transportation and Civil Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

**Abstract**: Based on the Landsat images in 2000 and 2016, the remote sensing ecological index (RSEI) is employed to estimate the eco-environment state of Fuzhou City, then the response mechanism of the RSEI to the road network is quantitatively explored using three different sampling strategies, including road buffer zone, urban-rural gradient zone, and section line. Moreover, the spatial heterogeneity of road kernel density (KDE), RSEI and their relationships are analyzed using globally spatial autocorrelation analysis and geographically weighted regression analysis, respectively, in different spatial scales of sample units, including 500 m×500 m, 1000 m×1000 m, 1500 m×1500 m, 2000 m×2000 m, 2500 m×2500 m, and 3000 m×3000 m. The results show that the areas in fine state of eco-environment are greater than those in poor status, indicating an improvement of the eco-environment quality from 2000 to 2016 in the study area. The RSEIs in various

**基金项目**:国家自然科学基金项目(31971639);福建省自然科学基金项目(2019J01406);中国博士后科学基金项目(2017M610390);福建省交通 运输科技市场主导性重点科技项目(201823)

收稿日期:2020-03-26; 网络出版日期:2021-04-21

\* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: xshu@ fafu.edu.cn

http://www.ecologica.cn

types of road buffers are steadily increasing from 0 m to 3000 m distances to roads. Among which the influence thresholds of the national road, provincial road, county road and township road are about 900 m, 900 m, 450 m and 750 m, respectively. In urban-rural gradient analysis, the curve of RSEI increases with the increasing distances from the administrative center, and it tends to be gentle after reaching a certain threshold, which is around 20 km in the districtlevel, and 12 km in the county-level, respectively. However, the trend of KDE is exactly opposite of the RSEI's, but with the similar thresholds. Along the section line, the RSEI is relatively low, while the KDE is relatively high in the administrative center; and the RSEI of the inland area in the northwest is higher than that of the coastal area in the southeast. Spatial autocorrelation analysis shows that the RSEI and the KDE have a higher spatial aggregation effect at the two sampling units of 1500 m×1500 m and 2000 m×2000 m than that of the other sampling units, therefore, 1500 m×1500 m and 2000 m×2000 m are then employed as spatial analysis units to explore the spatial variations in the relationships between RSEI and KDE using geographically weighted regression (GWR) model. The GWR outcomes overall indicate a negative correlation between RSEI and KDE, but also identify the spatial paradigms in their divergent correlations, with the negative associations mainly distributing in the central area of the study area. Our study can provide scientific basis for the ecological civilization construction and sustainable development of road network for the study area.

Key Words: remote sensing ecological index; eco-environment; road network density; spatial autocorrelation; geographically weighted regression

道路网络作为社会经济发展的产物,同时也对道路周边的生态环境带来一系列负面的影响。道路网络贯 穿于各类景观,分布范围之广和发展速度之快,是其他建设工程不能比拟的,道路所产生的生态效应越来越受 到重视<sup>[1]</sup>。关于道路的生态影响,最初主要集中研究路旁植被的变化和对小型野生动物活动造成的影响<sup>[2]</sup>, 进入 20 世纪 90 年代,随着地理信息系统和遥感技术的发展,学者们开始关注道路网对景观格局<sup>[3]</sup>、土地利 用<sup>[4-5]</sup>、生态风险<sup>[6-7]</sup>等的影响分析,研究方法侧重于缓冲区分析、情景分析、叠加分析、构建景观指数等。如 毕恺艺等<sup>[3]</sup>采用缓冲区分析和情景分析方法,分别计算类型层次和景观层次的景观指数分析中国-中南半岛 经济走廊道路网络对景观格局的影响;赵芳等<sup>[4]</sup>采用缓冲区分析、叠加分析以及景观格局分析方法,研究道 路与两侧土地利用和景观格局的关系;张兆苓等<sup>[6]</sup>通过基于景观格局和过程的景观生态风险指数计算,分析 道路网络扩展影响下的景观生态风险规律。在众多道路指标中,路网密度是研究最广泛的一个,是衡量一定 区域内道路数量与路网建设水平的重要指标<sup>[8]</sup>。传统的计算方法是在一定区域内,道路网的总里程与该区 域面积的比值;而基于 AreGIS 软件的空间分析工具,核密度估算(Kernel Density Estimation,KDE)通过选择一 个核函数进行计算,为道路密度的研究提供方便。如毕恺艺等<sup>[7]</sup>以中国-中南半岛经济走廊为例,表明道路网 络和景观生态风险存在一定的相关性,随着道路网络密度的增加,景观生态风险呈现上升趋势;莫文波等<sup>[9]</sup> 采用 KDE 研究北京市道路网络的时空变化,并探讨道路网络的扩展对城市景观生态风险的影响。已有的研 究较多采用定性的方法分析道路网络对生态环境的影响,而较少定量探究道路网络对生态环境的响应阈值。

生态环境质量作为生态系统结构、功能和要素在一定时间和空间上的综合表征,一直是当今社会最受关注的热点之一<sup>[10]</sup>。随着我国科技力量的提高,卫星遥感已经成为动态监测生态环境要素和评估生态环境变化有效的技术手段<sup>[11]</sup>。基于遥感技术的发展,通过构建反应生态系统不同方面的不同指数,可以表征生态系统的质量,如应用植被指数(Normalized Difference Vegetation Index,NDVI)评价植被的覆盖度<sup>[12]</sup>,应用不透水面和地表温度(Land Surface Temperature,LST)评估城市生态的热岛效应等<sup>[13-14]</sup>,但是这些单一指数仅能较好地解释生态系统某一方面的生态特征,而生态系统是受多方面因素影响的。特别是复杂类型的生态系统,比如湿地、山区、高原、干旱地区等,仅使用单一的生态指数是无法全面准确反映生态系统,难以评价其生态变化的。为了能够全面的描述和评价研究区的生态质量,徐涵秋基于遥感技术提出的一种耦合了自然生态环境中绿度、热度、干度和湿度评价指标的新型遥感综合指数(Remote Sensing Ecological Index,RSEI),相比国家环境保护部于 2006 年颁发了《生态环境状况评价技术规范》,推出的生态环境状况指数(Ecological Index,EI)<sup>[15]</sup>。

该指数弥补了 EI 人为主观权重设定、指标难获取性、结果无法进行可视化的不足,能对区域生态环境状况进 行客观定量评价,同时也能对生态环境的演变进行时空分析以及可视化显示<sup>[16]</sup>。该指数在城市主城区<sup>[17]</sup>、 水土流失<sup>[18]</sup>和干旱区<sup>[19]</sup>的生态效应评估已有应用,且取得很好的成效。查阅已有的文献发现,现有相关研 究主要侧重基于遥感生态指数的生态环境监测和变化分析<sup>[18,20]</sup>、遥感生态指数的驱动力机制分析<sup>[10,17]</sup>、遥感 生态指数的模拟和预测分析<sup>[21-22]</sup>,而较少分析遥感生态指数的空间分异特征,且多采用简单的回归模型,无 法很好的解释空间数据的非平稳性和依赖性。

因此,针对当前研究中存在的不足,本研究以福州市为研究对象,基于 2000 年和 2016 年的 Landsat 遥感 影像和路网数据,运用缓冲区分析和剖面线分析相结合的方法,分析 2000—2016 年福州市的生态质量及其变 化,探讨不同道路类型对 RSEI 的变化规律及城乡梯度之间路网密度和生态环境之间的变化关系;从不同尺 度划分空间单元,运用全局空间自相关、地理加权回归分析等方法定量分析了 RSEI 的空间异质性。以期为 福州市城市建设和生态保护协调发展提供参考依据。

#### 1 研究区域

#### 1.1 研究区概况

福州市位于台湾海峡西岸,闽江下游,地理范围为 25°20′—26°38′N、118°18′—119°59′E,是福建省的省 会,也是福建省最大的地级市(图1)。现辖6个区和7个县(2017年,长乐撤市设区),147个城镇组成,占地 面积超过 12153km<sup>2</sup>。该地区属于亚热带季风气候,年平均气温约 20.75℃。研究区内年降水量为 796.5—1913.6 mm,变化较大,其中约 33%发生在汛期(5月和6月)。据报道,在过去的 20 年里,该地区的景观发生 了巨大的变化,变得更加破碎和退化<sup>[23]</sup>。因此,对城市生态质量时空格局的研究可以为其他快速发展的城市 提供借鉴。



图 1 研究区区位图 Fig.1 Location of the study area

#### 2 研究方法

2.1 数据来源及预处理

在本研究中, Landsat 图像是在 2000 年 05 月 04 日(ETM+) 和 2016 年 06 月 25 日(OLL/TIRS) 从 USGS

(https://glovis.usgs)获得的。历时 16 年,图像为 1B 级,在分析之前系统地对其进行了辐射定标、几何校正和 配准。辐射校正采用 Chander 等<sup>[24]</sup>的模型和参数将原始影像的灰度值转换为传感器处反射率,以减少不同 年份的影像在地形、光照和大气等方面的差异;不同时相影像之间的配准采用二次多项式和最邻近象元法,配 准的均方根误差小于 0.5 个象元<sup>[25]</sup>。此外,基于修正的归一化水体指数对水斑块进行掩膜<sup>[26]</sup>,以减少水域对 结果的影响。近期的路网数据从 OpenStreetMap (https://www.openstreetmap.org/)下载,包含公路和城市 道路。

### 2.2 遥感生态指数(RSEI)

基于 ENVI 软件平台分别提取研究区 2000 年、2016 年两期遥感影像的绿度、湿度、热度、干度四项生态指标,采用主成分分析法 (Principal Components Analysis, PCA) 构建 RSEI 指数。IBI、SI、NDVI、LST、LSM、MNDWI 的详细计算过程如参考文献<sup>[26-27]</sup>。

2.3 核密度分析(KDE)

核密度分析是利用 AreGIS 计算移动窗口中的点密度或者线密度<sup>[28]</sup>,假设 $x_1$  ……  $x_n$  是根据函数f获取的 独立且相对分散的采样点,则 f(x) 代表点 x 在公式 f 中的值,其公式如下:

$$f_n(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n k\left(\frac{x - x_i}{h}\right) \tag{1}$$

式中, k(x) 代表核密度分析功能; h为带宽;  $x - x_i$ 代表  $x = x_i$ 之间的距离; n 代表采样点的总数目。

其中,核函数采用的是 ArcGIS 软件自带的高斯核函数进行估算,在所有参数中, h 的选取对计算结果的 影响最大,当h 值较大时,密度曲线光滑,反映的结果模糊抽象;当h 值较小时,密度曲线更为突变,能详细揭 示密度的分布特征。在本研究中,采用 ArcGIS 软件的默认带宽进行估计,在 4500 m 的默认带宽上,可以清晰 分辨路网的密度中心和核心边界;其像元大小设置与 RSEI 栅格图的大小一致,均为 30 m。

#### 2.4 缓冲区分析

缓冲区分析已经成为辨析人类干扰造成生态系统变化格局分析的主要方法之一。在 ArcGIS 软件的支持下,筛选出国道、省道、县道、乡镇道路四种类型的道路作为线状研究对象,分别以 150 m 为间隔,共划分为 20 个多环缓冲带,定量分析道路影响域内的生态变化阈值;从 Google Earth 中定位福州市各个县区的经纬度坐标,并在 ArcGIS 创建各点要素作为行政中心,以合并为整体的所有区县、所有区、所有县的行政中心为圆心向外扩散,构建 30 个 1 km 环状缓冲区,作为点状研究对象,分析城乡之间的梯度变化特征,其结果通过以表格显示分区统计工具导出。

#### 2.5 剖面线分析

剖面图可以表示沿表面上某条线前进时,自然要素或者社会要素的变化情况,剖面线是剖面图所经过区域的范围指示<sup>[29]</sup>。本研究利用 ArcGIS 的剖面工具(3D Profile),根据各区县行政中心的位置分布,沿西北-东南(NW-SE)、西南-东北(SW-NE)、南-北(S-N)3个方向设置剖面线,分析各方向 RSEI 和 KDE 的时空变化关系。

2.6 空间自相关分析

采用全局空间自相关模型分析福州市生态环境质量的空间聚集性。结果通过计算 Moran's I 指数, Z 得分, P 值得分确定其是否具有显著性, 其公式如下:

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

$$S_0 = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} w_{i,j}$$
(3)

式中,  $x_i$  和  $x_i$  分别为要素 i 和 j 的属性值;  $\bar{x}$  为 n 个样本属性的平均值;  $w_{ii}$  是空间权重矩阵;  $S_0$  是所有空间权

重的聚合。

Moran's / 指数的值通常介于-1和1之间,若 Moran's / 值大于零,表明空间自相关程度较高,呈现聚类特征,反之表示其空间自相关程度较低,呈现离散特征,若为零则表示不相关,呈现随机特征<sup>[30]</sup>。

#### 2.7 地理加权回归分析

相比于最小二乘回归分析(OLS 模型),GWR 模型将样点数据的空间特性纳入到了回归参数之中,使变 量间的关系可以随着空间位置的变化而不同,克服了空间数据的非平稳性和依赖性<sup>[31]</sup>,是考虑变量空间异质 性的局部线性回归模型。其公式如下:

$$Y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum \beta_k(u_i, v_i) X_{ik} + \varepsilon_i$$
(4)

式中,  $Y_i$  为第 *i* 个单元格的 RSEI 值;  $(u_i, v_i)$  为该单元格的中心地理坐标;  $\beta_k(u_i, v_i)$  为第 *i* 个单元格的回归 系数;  $\varepsilon_i$  为随机误差项。

在空间权重矩阵的确定中,选择高斯函数作为空间权重函数;GWR 模型对于带宽的选择非常敏感,为避免带宽过大或者过小对模型拟合精度的影响,基于 ArcGIS 软件,选择赤池信息量准则(Akaile information criterion,AIC)法确定最优带宽,当模型的 AIC 值最小时,即可确定最优带宽和 GWR 模型。

#### 3 结果与分析

#### 3.1 福州市生态环境时空变化动态

根据 RSEI 的主成分分析结果<sup>[32]</sup>,福州市两景影像的第一主成分(PC1)的贡献率均达到 98%以上,其中 2000 年为 98.41%,2016 年为 98.72%,说明它已经集中了四个分指标的大部分特征,即 RSEI 能够作为全面、 客观评价区域生态环境质量的指标。

为了定量化和可视化分析福州市的遥感生态指数,将 2000 年和 2016 年 RSEI 值以 0.2 为间隔,划分为五 个等级,0—0.2、0.2—0.4、0.4—0.6、0.6—0.8 和 0.8—1.0 分别对应差、较差、中等、较好和好。观察两年 RSEI 的时空变化图,可以发现 2000 年福州市生态环境差和较差的区域主要集中在市中心和沿海区域一带,其他大 部分区域均为较好等级以上。与 2000 年相比,2016 年市中心区域生态环境差的区域范围有所扩大,表明建 设用地已经侵占了生态用地,导致该区域的生态环境质量下降,在福清市的沿海区域,生态环境差的等级范围 有所缩小,其他区县边缘因实行植树造林使得生态环境好的区域面积明显扩大<sup>[32]</sup>。统计各等级生态质量的 面积占比,从 2000 年到 2016 年,生态环境好的区域面积大幅增加,等级差的区域面积也有所增加,等级中等 和较差的区域下降明显,而处于较好的区域几乎保持稳定。

#### 3.2 福州市公路路域生态环境变化动态

#### 3.2.1 不同类型道路路网的生态坏境时空梯度变化规律

现有的研究较多将公路按照功能性等级划分为高速公路、一级、二级、三级、四级公路,研究路域景观生态指数的变化情况<sup>[7,33]</sup>。本研究基于福州市的路网数据,将公路按照行政级别等级划分为国道、省道、县道、乡镇道路,按照每150 m为一个间隔,构建20个缓冲区进行分析。当对生态环境强度的度量,RSEI平均值是最常采用的指标。统计结果表明(图2),沿着20个缓冲带,各类型道路的RSEI表现出相似的梯度变化特征,RSEI都是从0 m到3000 m逐渐上升的趋势,在900 m之前变化较大,900 m之后趋于平缓。从时间年份看,除了国道是2000年的RSEI大于2016年,乡镇道路和县道都是2016年的RSEI大于2000年,而省道以750 m为分界点,750 m之前2000年的RSEI大于2016年,750 m之后则相反;各等级道路的RSEI大致为县道>乡镇道路>省道>国道。道路核密度值呈现与RSEI相反的变化趋势,随着缓冲区的增大,路网密度逐渐下降,其变化的阈值也与RSEI相对应;各等级道路的KDE大致为国道>省道>乡镇道路>县道,与RSEI的变化规律完全相反。总体上来说,道路等级越高,生态环境质量越差,说明高等级道路的建设对生态环境的破坏更加严重。

由于各类型道路的总长和生态等级所占比例的不同,为分析福州市生态环境与各类型道路间的相关性, 统计 RSEI 各等级内不同类型道路的长度百分比(图 3)。在 2000 年,4 种类型的道路在生态环境差、较差等





级内的长度比例相当,而县道和乡镇道路在较好、好等 级内明显较高;在2016年,国道和省道在生态环境差、 较差等级内均居前两位,而在较好和好等级内占比均低 于县道和乡镇道路;在生态环境中等等级下,两年中各 类型道路的长度占比均是:国道>省道>乡镇道路>县 道。总体来说,在路域的研究范围内,道路等级越高,其 对生态环境的影响越大,路域内的生态环境越差。

# 3.2.2 不同类型道路典型路段的生态环境时空变化 规律

为了深入探究不同类型公路路域生态环境时空变 化规律,分别从国道、省道、县道、乡镇道路选取不同数 量的典型路段作为研究对象。典型路段的选取原则按 照生态环境变化程度明显和路网的均匀分布性,保证所 选取的典型路段均匀分布在福州市的各个方位,同时保 证缓冲区都能落在福州市的边界内。由于公路网中各 等级道路的数量各不相同,所选取的典型路段数量也不





同,其中国道的典型路段选择了3条,省道的典型路段选择了7条、县道的典型路段选择了12条,乡镇道路的 典型路段选择了5条。同样构建缓冲区分析,各类型道路典型路段的变化情况如下图所示(图4)。从选择的 典型路段中,大部分的省道、县道和乡镇道路的2016年的RSEI值比2000年的高,国道的2000年的RSEI值 比2016年的高;而且各类型道路距离道路越近,其RSEI值越低。国道影响的阈值大概在900m左右,省道 900m左右,县道450m左右,乡镇道路750m左右。过了一定阈值之后,都会有不同幅度的上下波动。





#### 3.3 城乡梯度路网的生态环境时空变化规律

城镇化进程是中国 21 世纪初经济发展重要的驱动力,随着城镇化进程的推进,区域经济、环境等各类自然呈现明显的城乡空间分布差异,城乡梯度差异分析逐步成为一种比较常用的空间差异定量分析方法。研究区包括 6 区 6 县(无平潭县,长乐县后改长乐区),各区县对周边区域具有一定的辐射功能。因研究区包含多个城市中心,仅对单个行政中心进行缓冲区分析无法有效反映多中心的叠加效应<sup>[34]</sup>。基于此,分别以合并后的福州市各区县级行政中心为圆心向外扩散,构建 30 个 1 km 环状缓冲区,统计缓冲区内的 RSEI 和 KDE,探讨城乡之间 KDE 与 RSEI 之间的关系(图 5)。总体来看,2000 年和 2016 年 RSEI 曲线的变化规律都是随着与行政中心距离的增大而增大,到达一定阈值后趋于平缓,甚至还有小幅度的下降,且 2000 年的 RSEI 大于2016年;而 KDE 曲线的变化规律与 RSEI 刚好相反。从所有区县的缓冲区分析结果来看,RSEI 增大到距离行政中心 9 km

后出现小幅的下降(图 5),到 12 km 后,又开始上升,达到 20 km 后又逐渐下降,KDE 曲线的转折点刚好与 RSEI 的转折点相对应;值得注意的是,所有县的 RSEI 曲线从 12 km 到 27 km 这段距离内处于下降的趋势,27 m 过后又上升(图 5),原因是各县的边缘区域实行植树造林计划,使得生态环境质量出现好转;而 KDE 在这 段距离范围内是先上升后下降。综上所述,福州市的城乡生态环境质量在 16 年间出现一定程度的下降,距离 城市中心越近的地区具有较高的路网密度和较低的生态环境质量,在距离城市中心较远的农村地区,因路网 相对稀疏分散,植被覆盖面广,生态环境质量高于城市。影响整个福州市的 RSEI 阈值大概在 12 km 左右,区 级的 RSEI 阈值大概在 20 km 左右,县级的 RSEI 阈值大概在 12 km 左右;而影响 KDE 的阈值与 RSEI 正好 对应。



图 5 城乡梯度分析图及不同缓冲区 RSEI 与 KDE 的变化关系

Fig.5 Analysis of urban and rural gradients and the relationship between RSEI and KDE in different buffers

为了更直观地观察研究区的 RSEI 和 KDE 在城乡之间的变化趋势,本文采用横穿各区县行政中心的剖面

41 卷

面线能够横跨各县区的行政中心,设置的剖面线大致沿 NW-SE 方向(闽清县-闽侯县-市中心-马尾区-长乐 区)、SW-NE方向(永泰县-仓山区-市中心-晋安区-连江县)、S-N方向(福清市-马尾区-连江县-罗源县)(图 6)。结果表明:三个方向的剖面线每经过行政中心处,其 RSEI 均比周围低,从曲线的变化趋势看,西北方向 的生态环境优于东南方向,西南方向的生态环境优于东北方向,城市的北部优于南部,东南、东北、南部方向恰 好是东部沿海地区,经济比较发达,生态质量更差;另一个原因是大片的河流会减少植被对温度的积极影响和 增加建设用地对湿度的消极影响,从而使沿海地区的 RSEI 呈低值<sup>[35]</sup>。观察横穿行政中心的 KDE 剖面图(图 7),可以发现,福州市城市中心的道路核密度达到最高值,距离福州市较近的区县达到次高值,远离市中心的 则为低值,以 NW-SE 方向和 S-N 方向的剖面线为例,沿着 NW-SE 方向剖面线,依次在闽清县、闽侯县、市区中 心、长乐区形成4个波峰,市区中心的峰值最大,闽清县的最小;沿着 S-N 方向剖面线,横穿的四个县区的行政 中心的 KDE 也处于峰值状态,福清市的峰值最高。对比剖面图各方向的 KDE 与 RSEI 可以发现, RSEI 与 KDE 成反比,即道路核密度越大,RSEI 越小,生态环境质量越差,与上文中城乡梯度间 RSEI 和 KDE 之间的关 系基本吻合,说明道路密度与生态环境质量成负相关关系,道路建设对生态环境起抑制作用。



图 6 RSEI 的剖面变化 Fig.6 Profile change of RSEI

#### 3.4 道路网络空间扩展与生态变化之间的定量关系

生态环境质量的时空变化与路网密度的时空变呈现相反的趋势,为了定量揭示二者之间的关系,结合前 面的研究对象,以点、线、面不同层面的 RSEI 为因变量,KDE 为自变量对两者进行一元线性回归分析。从表 1 可以看出,3 个层面上的 RSEI 与 KDE 呈现出极显著的负相关关系,其中以所有行政中心、六区、六县为圆心 的回归拟合度均在 0.8 以上。表明路网密度越大,生态环境质量越差。

受到地域差异的限制,不同的研究尺度在同一研究区 域或者不同研究区域会存在一定程度的空间自相关性和 空间异质性<sup>[1]</sup>。为避免不同空间单元尺度对研究结果造 成影响,本文按照 500 m×500 m、1000 m×1000 m、1500 m× 1500 m、2000 m×2000 m、2500 m×2500 m、3000 m×3000 m 这 6 种单元网格分别计算研究区生态环境的空间相关性, 从表 2 可以看出:所有尺度下在 1%显著性水平下,都通过 显著性检验,其中在 500 m×500 m、1000 m×1000 m、 2000 m×2000 m 的 Moran's *I* 均较高,表明福州市生态质量 空间格局并非呈现完全的随机分布,而是呈现高度的空间 聚散特征,即生态质量邻近的区域相对集聚。

地理加权回归模型(GWR)在考虑变量空间异质性具 有很好的优势,不同于最小二乘回归模型(OLS 模型), GWR 模型考虑的是两个变量在不同位置的相互异质性。 在空间自相关的基础上,以 2000 年 RSEI、2016 年 RSEI、 ΔRSEI(2016 年与 2000 年的 RSEI 差值)为因变量,以 KDE 为自变量,对比 GWR 模型和 OLS 模型,研究不同尺度下的 空间差异情况。对比两种模型的参数估计情况(表 3),从 模型的精度看,三组 OLS 模型中调整后的 *R*<sup>2</sup>的系数非常 小,变化范围分别为 0—0.016、-0.001—0.068、0—0.012,6 个尺度中最大仅能解释福州市生态环境质量不到 7% 的拟



Fig.7 Profile change of KDE

合精度;而 GWR 模型能解释拟合精度最低达 47%,最高可达 65%,远大于 OLS 的模拟效果;这很大程度是由于 OLS 模型假定是以平稳的空间变化为前提,但现实空间数据具有非平稳特征,导致回归估计

	Table 1         Linear regression parameters of RSEI and KDE											
			2000 年	2016 年 RSEI-KDE								
参数类型 Parameter types		回归系数 Regression coefficient	截距 Intercept	调整后的 R <sup>2</sup> Adjusted R <sup>2</sup>	相关系数 Correlation coefficient	回归系数 Regression coefficient	截距 Intercept	调整后的 R <sup>2</sup> Adjusted R <sup>2</sup>	相关系数 Correlation coefficient			
点 Point	所有区县	-0.038 ***	0.760	0.977	-0.989	-0.068 ***	0.751	0.959	-0.980			
	所有区	-0.032 ***	0.770	0.897	-0.949	-0.048 ***	0.720	0.813	-0.905			
	所有县	-0.080 ***	0.787	0.864	-0.932	-0.137 ***	0.790	0.945	-0.973			
线 Line	国道	-0.104 ***	0.786	0.714	-0.854	-0.138 ***	0.800	0.650	-0.818			
	省道	-0.167 ***	0.786	0.538	-0.750	-0.260 ***	0.877	0.400	-0.657			
	县道	-0.205 ***	0.780	0.635	-0.809	-0.236 ***	0.816	0.508	-0.731			
	乡镇道路	-0.170 ***	0.754	0.745	-0.871	-0.207 ***	0.802	0.477	-0.710			
面 Face	西北-东南方向	-0.025 ***	0.730	0.219	-0.468	-0.038 ***	0.649	0.222	-0.471			
	西北-东南方向	-0.034 ***	0.785	0.418	-0.646	-0.051 ***	0.771	0.526	-0.726			
	南-北方向	-0.057 ***	0.773	0.246	-0.496	-0.102 ***	0.759	0.359	-0.599			

表 1 RSEI 与 KDE 的一元线性回归参数

\*\*\* 表示极显著相关(P<0.01);RSEI:遥感生态指数 Remote Sensing Ecological Index;KDE:道路核密度 Kernel Density Estimation

的解释精度降低了。AIC 作为统计模型拟合优度的相对估计量,在三组模型中,GWR 模型的 AIC 的绝对值大于 OLS 模型 AIC 的绝对值。另外对比两个模型的残差平方和和残差 Moran's *I* 可知,3 组模型的 6 个尺度中,

Table 2

GWR 模型均低于 OLS 模型,表明 GWR 模型的残差呈现随机分布的状态。综上所述,地理加权回归模型相比 于传统最小二乘回归模型,具有较高的拟合精度,在处理空间数据方面更具优势,能够克服空间数据的非平 稳性。

	Table 2	Table of git	bai spain	ii autocorrelati	on parameter	is at unit.	chi scares			
研究尺度		2000 年 RSEI	2016 年 RSEI			KDE				
Research scale	Moran's I	Ζ	Р	Moran's I	Ζ	Р	Moran's I	Ζ	Р	_
500 m×500 m	0.506	153.017	0	0.596	180.306	0	0.989	299.206	0	
1000 m×1000 m	0.516	77.176	0	0.548	81.948	0	0.972	145.561	0	
1500 m×1500 m	0.487	49.171	0	0.481	48.538	0	0.944	95.404	0	
2000 m×2000 m	0.548	42.101	0	0.525	40.334	0	0.878	67.755	0	
2500 m×2500 m	0.393	34.742	0	0.392	34.665	0	0.820	72.980	0	
3000 m×3000 m	0.384	26.952	0	0.368	25.811	0	0.812	57.546	0	

表 2 各尺度下全局空间自相关参数表 Table of global spatial autocorrelation parameters at different scales

基于 ArcGIS 软件,对 3 组模型的回归系数进行空间显示,其中在 1500 m×1500 m 和 2000 m×2000 m 两个 尺度下的拟合精度较高,因此选择这两个尺度反映福州市生态环境质量与路网密度之间的关系。从图 8 可以 看出,总体上,RSEI 和 KDE 呈现负相关关系,且相关性存在空间分异。在 1500 m×1500 m 尺度下(图 8), RSEI 与 KDE 的负回归系数分布在研究区中心的大部分区域,表明随着 KDE 的增加,RSEI 逐渐减少,对比 2000 年和 2016 年回归系数的空间变化,负高值主要位于永泰、闽清、闽侯、连江等县,且 2000 年分布的区域 大于 2016 年;2000 m×2000 m 尺度下(图 8)的 RSEI 和 KDE 的空间分布关系与 1500 m×1500 m 尺度相似;在 ΔRSEI 的回归系数空间分布图中(图 8),两个尺度下的负回归系数主要也是分布在研究区的中心区域,相比 于 2000 年和 2016 年的 RSEI 的分布情况,空间分异性更加明显。

	Table 3         Parameter estimation results of GWR and OLS													
			2000 年 R	SEI-KDE			2016年 R	SEI-KDE			ΔRS	EI-KDE		
研究尺 Researc	度/km h scale	调整的 R <sup>2</sup> Adjusted R <sup>2</sup>	AIC	残差平方 Residual square	残差 莫兰指数 Residual Moran's I	调整的 R <sup>2</sup> Adjusted R <sup>2</sup>	AIC	残差平方 Residual square	残差 莫兰指数 Residual Moran's I	调整的 R <sup>2</sup> Adjusted R <sup>2</sup>	AIC	残差平方 Residual square	残差 莫兰指数 Residual Moran's I	
GWR	$0.5^{2}$	0.541	-67486.868	640.339	0.201	0.526	-50512.911	917.977	0.249	0.466	-89560.352	400.861	0.231	
	$1.0^{2}$	0.609	-14359.266	195.944	0.085	0.571	-10691.594	264.991	0.097	0.548	-21228.809	111.323	0.078	
	1.5 <sup>2</sup>	0.649	-5738.652	91.679	-0.014	0.594	-4144.263	122.265	-0.024	0.586	-9067.861	50.256	-0.029	
	$2.0^{2}$	0.631	-2642.108	63.908	-0.019	0.590	-1944.796	79.511	-0.025	0.592	-4801.087	32.494	-0.019	
	2.5 <sup>2</sup>	0.619	-1279.287	45.886	-0.086	0.574	-877.487	55.613	-0.081	0.581	-2781.686	22.361	-0.080	
	3.0 <sup>2</sup>	0.622	-723.921	34.456	-0.056	0.570	-492.414	42.454	-0.043	0.590	-1839.643	16.271	-0.061	
OLS	0.5 <sup>2</sup>	0.016	-31977.092	1399.835	0.491	0.068	-19106.312	1839.442	0.557	0.005	-60650.112	761.804	0.493	
	$1.0^{2}$	0.001	-3401.869	537.478	0.513	0.029	-1205.673	643.966	0.526	0.000	-12024.107	264.341	0.472	
	1.5 <sup>2</sup>	0.000	-379.016	302.581	0.488	0.013	340.252	344.547	0.466	0.001	-4638.870	140.211	0.424	
	$2.0^{2}$	0.002	253.342	202.075	0.549	0.006	606.972	225.750	0.520	0.004	-2232.583	92.744	0.487	
	2.5 <sup>2</sup>	0.005	440.880	150.818	0.397	0.000	622.066	164.477	0.389	0.011	-1268.325	66.571	0.363	
	3.0 <sup>2</sup>	0.011	458.817	118.215	0.392	-0.001	549.849	125.678	0.366	0.012	-777.777	51.465	0.348	

#### 表 3 GWR 与 OLS 的参数估计结果 le 3 Parameter estimation results of GWR and OL

GWR:地理加权回归模型 Geographically Weighted Regression; OLS:最小二乘回归模型 Ordinary Least Squares; AIC:赤池信息量准则 Akaile information criterion

#### 4 结论和讨论

4.1 讨论

在探索性空间数据分析的基础上,分别采用 OLS 模型和 GWR 模型探讨了福州市的路网密度与生态环境



图 8 GWR 模型回归系数的空间分布

Fig.8 Spatial distribution of regression coefficient of GWR Model

质量之间的关系。通过比较两者的模拟结果得出,GWR 模型在模拟精度和空间特征提取上具有独特的优势, 能够更好地刻画出变量之间关系的空间异质性和尺度依赖性特征。在此基础上,分别采用 1500 m×1500 m 和 2000 m×2000 m 网格贯穿全影像的采样方法,获取每幅影像的样本数分别为 5538 个和 3192 个。足够多的 样本数和贯穿全影像的采样方法可以避免少量样本和局域性地抽样所带来的结果不确定性<sup>[25]</sup>。

道路核密度分析是借助一个移动窗口对路网进行估计,虽然可以避免传统路网密度计算过程中人为主观确定边界的局限性,但核密度估算的结果受带宽大小的影响较大。本研究基于 ArcGIS 软件自带的高斯核函数进行估计,根据 Silverman 经验法则计算的默认带宽近似作为带宽的最优选择,未能探讨不同带宽设置对路网核密度估算结果的影响,这有待今后进一步研究。同时本研究只获取近期的路网截面数据刻画路网核密度

的空间分布特征,未能对历史时期的路网核密度的空间分布特征及其在研究期内的时间动态变化特征进行分 析。虽然近年来道路基础设施的建设处在一个高速发展的时期,但考虑到本研究是以整个路网为研究对象, 近年来新建的道路相对于已经较发达的整个路网而言影响不大。鉴于此,本研究采用近期的路网分布近似代 表整个研究期间的路网,忽略了路网在研究期间的变化。

在构建 RSEI 的指标选取上,绿度、热度、干度、湿度4个指标因其与人类生活紧密相关且能被人体直观感 知的特点,从众多自然因素中被挑选出来,集成的综合指数可以全面评价城市生态质量,且可以定量刻画生态 质量的优劣程度,比单一指标分析更具有优势。采用主成分分析法构建 RSEI 时,各指标权重的确定是根据 各指标对各主分量的贡献度来客观确定,而不是人为主观确定,可使得结果更加准确可靠[25]。

RSEI 作为一个综合指数,评价结果受到多方面因素的影响,本研究主要研究路网密度对生态环境的影 响,而没有对区域的气象因素、地形因素、人文因素等进行研究,后续研究中会把多年的道路数据和其他影响 因素一并考虑,以期得到更为全面客观的分析结果。

#### 4.2 结论

在城市生态环境质量评价中,基于遥感影像构建 RSEI 模型可以有效监测和分析区域生态环境变化情 况,被广泛应用和推广。研究中较多还是使用遥感生态指数来分析区域生态的时空变化,对于定量化区域内 部的生态环境质量与路网密度的关系,以及自然要素在空间分析中尺度选择的差异性很少被考虑。因此,本 文以福州市为例,基于遥感影像和路网数据,从道路缓冲区、城乡梯度带、剖面线三种不同取样方法定量探讨 RSEI 对路网的响应机制;通过划分不同尺度的空间单元,运用全局空间自相关、地理加权回归分析等方法分 析了 RSEI 和 KDE 的空间异质性,研究结果为福州市城市生态建设和路网规划提供参考依据。

结果表明:(1)采用主成分分析技术集成的 RSEI 具有一定的适用性,可较好的对福州市生态环境质量状 况及其时空变化进行监测和评价。对 RSEI 进行分级处理后,从 2000 年到 2016 年,植树造林使各县边缘生态 环境好的区域面积增加,而市区中心生态环境差的区域面积也有所增加,原因是生态用地转化为建设用地,总 体来说,福州市生态环境质量向好的方向发展;(2)各类型道路的 RSEI 表现出相似的梯度变化特征,RSEI 都 是呈从 0 m 到 3000 m 逐渐上升的趋势,国道、省道、县道、乡镇道路影响的阈值分别在 900、900、450、750 m 左 右,除了国道外,其余各类型道路在2016年的 RESI 均高于2000年;(3)在城乡梯度分析中,RSEI 曲线的变化 规律都是随着与行政中心距离的增大而增大,到达一定阈值后出现不同程度的波动,区级的影响阈值在20 km 左右,县级的影响阈值在12 km 左右,KDE 曲线的变化规律与 RSEI 相反,其变化阈值与 RSEI 正好对应; (4) 剖面线所经过的行政中心处,其RSEI为低值,KDE为高值,西北方向的内陆地区RSEI高于东南方向的沿 海地区;(5)在多尺度的地理加权回归分析中,1500 m×1500 m 和 2000 m×2000 m 这两个网格单元采样下的 空间集聚性较强,空间异质性明显,总体上来看,RSEI 与 KDE 呈现负相关关系,负回归系数主要分布在研究 区的中心区域,其中  $\Delta RSEI$  的空间分异特征更加明显。

#### 参考文献(References):

- [1] 刘世梁, 温敏霞, 崔保山, 富伟, 杨敏. 基于空间分析方法和 GIS 的区域道路网络特征分析. 山地学报, 2008, 26(4): 459-466.
- [2] 宗跃光,周尚意,彭萍,刘超,郭瑞华,陈红春.道路生态学研究进展.生态学报,2003,23(11):2396-2405.
- [3] 毕恺艺,牛铮,黄妮,寇培颖.道路网络对景观格局的影响分析——以"中国-中南半岛经济走廊"为例.遥感信息,2019,34(2): 129-134.
- [4] 赵芳, 卢涛. 道路扩展对青藏高原东缘土地利用及景观格局的影响. 生态科学, 2017, 36(4): 146-151.
- [5] 汤坤,蔡烁,邱荣祖,徐璐,胡喜生.福建省不同类型道路沿线土地利用/土地覆盖变化的时空格局.福建农林大学学报:自然科学版, 2017, 46(4): 445-452.
- [6] 张兆苓,刘世梁,赵清贺,杨珏婕.道路网络对景观生态风险的影响——以云南省红河流域为例.生态学杂志,2010,29(11): 2223-2228.
- [7] 毕恺艺,牛铮,黄妮,寇培颖.道路网络对景观生态风险的影响——以"中国-中南半岛经济走廊"为例.中国科学院大学学报,2019,36 (3): 347-353.

4744

#### 12 期

[8]	叶丽敏, 邱荣祖,	,林玉英,史本杰,	胡喜生.	福建省道路网密度空间分昇	帚特征. 公路	, 2018, 63(	5): 206-210.
-----	-----------	-----------	------	--------------	---------	-------------	--------------

- [9] Mo W B, Wang Y, Zhang Y X, Zhuang D F. Impacts of road network expansion on landscape ecological risk in a megacity, China: a case study of Beijing. Science of the Total Environment, 2017, 574: 1000-1011.
- [10] 朱青,国佳欣,郭熙,徐喆,丁徽,韩逸.鄱阳湖区生态环境质量的空间分异特征及其影响因素.应用生态学报,2019,30(12): 4108-4116.
- [11] Badreldin N, Goossens R. A satellite-based disturbance index algorithm for monitoring mitigation strategies effects on desertification change in an arid environment. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2015, 20(2): 263-276.
- [12] 祝聪, 彭文甫, 张丽芳, 罗瑶, 董永波, 王梅芳. 2006—2016 年岷江上游植被覆盖度时空变化及驱动力. 生态学报, 2019, 39(5): 1583-1594.
- [13] 唐菲, 徐涵秋. 城市不透水面与地表温度定量关系的遥感分析. 吉林大学学报: 地球科学版, 2013, 43(6): 1987-1996, 2017-2017.
- [14] 樊亚鹏, 徐涵秋, 李乐, 张好. 广州市城市扩展及其城市热岛效应分析. 遥感信息, 2014, 29(1): 23-29.
- [15] 国家环境保护部. 生态环境状况评价技术规范(试行). 北京: 中国环境科学出版社, 2006.
- [16] 徐涵秋. 区域生态环境变化的遥感评价指数. 中国环境科学, 2013, 33(5): 889-897.
- [17] 杭鑫, 罗晓春, 曹云, 李亚春. 基于 RSEI 模型的生态质量评估及城镇化影响——以南京市为例. 应用生态学报, 2020, 31(1): 219-229.
- [18] 张文强,孙从建,李新功.晋西南黄土高原区植被覆盖度变化及其生态效应评估.自然资源学报,2019,34(8):1748-1758.
- [19] 王丽春, 焦黎, 来风兵, 张乃明. 基于遥感生态指数的新疆玛纳斯湖湿地生态变化评价. 生态学报, 2019, 39(8): 2963-2972.
- [20] 徐涵秋. 水土流失区生态变化的遥感评估. 农业工程学报, 2013, 29(7): 91-97.
- [21] Jing Y Q, Zhang F, He Y F, Kung H T, Johnson V C, Arikena M. Assessment of spatial and temporal variation of ecological environment quality in Ebinur Lake Wetland National Nature Reserve, Xinjiang, China. Ecological Indicators, 2020, 110: 105874.
- [22] Xu H Q, Wang M Y, Shi T T, Guan H D, Fang C Y, Lin Z L. Prediction of ecological effects of potential population and impervious surface increases using a remote sensing based ecological index (RSEI). Ecological Indicators, 2018, 93: 730-740.
- [23] Hu X S, Hong W, Qiu R Z, Hong T, Chen C, Wu C Z. Geographic variations of ecosystem service intensity in Fuzhou city, China. Science of the Total Environment, 2015, 512-513: 215-226.
- [24] Chander G, Markham B L, Helder D L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(5): 893-903.
- [25] 徐涵秋. 城市遥感生态指数的创建及其应用. 生态学报, 2013, 33(24): 7853-7862.
- [26] Xu H Q. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27(14): 3025-3033.
- [27] Hu X S, Xu H Q. A new remote sensing index for assessing the spatial heterogeneity in urban ecological quality: a case from Fuzhou City, China. Ecological Indicators, 2018, 89: 11-21.
- [28] 刘锐,胡伟平,王红亮,吴驰,何劲.基于核密度估计的广佛都市区路网演变分析.地理科学,2011,31(1):81-86.
- [29] 刘永伟, 闫庆武, 黄杰, 黄珊, 蒋龙. 基于 GIS 的中国 API 指数时空分布规律研究. 生态环境学报, 2013, 22(8): 1386-1394.
- [30] 王维芳, 董薪明, 董小枫, 吕丹阳, 苏婷婷, 郑安然. 森林生物量的空间自相关性研究. 森林工程, 2018, 34(2): 35-39.
- [31] 刘彦文,刘成武,何宗宜,周霞,韩冰华,郝汉舟.基于地理加权回归模型的武汉城市圈生态用地时空演变及影响因素.应用生态学报, 2020,31(3):987-998.
- [32] Hu X S, Xu H Q. A new remote sensing index based on the pressure-state-response framework to assess regional ecological change. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(6): 5381-5393.
- [33] 刘世梁,温敏霞,崔保山,董世魁. 道路网络扩展对区域生态系统的影响——以景洪市纵向岭谷区为例. 生态学报, 2006, 26(9): 3018-3024.
- [34] 陆春锋,周生路.苏南地区土地生态评价及城乡梯度分析. 江西农业学报, 2019, 31(9):139-144.
- [35] Hu X S, Xu H Q. Spatial variability of urban climate in response to quantitative trait of land cover based on GWR model. Environmental Monitoring and Assessment, 2019, 191(3): 194.