

引用格式: Xu He, Hou Xiyong, Li Dong, *et al.* Analyzing Spatio-temporal Characteristics of Main Artificial Features in the Yellow River Delta based on RS and GIS[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2022, 37(3): 751-762. [徐鹤, 侯西勇, 李东, 等. 基于RS和GIS的黄河三角洲主要人工地物时空特征分析[J]. 遥感技术与应用, 2022, 37(3): 751-762.]
DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2022.3.0751

基于RS和GIS的黄河三角洲主要人工地物 时空特征分析

徐鹤^{1,2,3,4}, 侯西勇^{1,3,4}, 李东^{1,3,4}, 韩美⁵, 刘玉斌^{1,2,3,4},
王晓利^{1,3,4}, 樊超^{1,2,3,4}

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 山东 烟台 264003;

4. 山东省海岸带环境过程重点实验室, 山东 烟台 264003;

5. 山东师范大学 地理与环境学院, 山东 济南 250358)

摘要: 油井、风机和道路是黄河三角洲区域的主要人工地物, 明确其时空特征对保障黄河三角洲的生态安全具有重要意义。利用 Landsat、SPOT、高分二号等中、高分辨率卫星影像, 提取并建立 2000 年和 2015 年黄河三角洲主要人工地物分布数据集, 使用核密度法、平均最近邻法、加权分析法、克里金插值法和空间自相关分析法分析 2000~2015 年黄河三角洲人工地物的时空特征。结果表明: ① 2015 年风机空间分布具有不均衡性, 呈现两大核心区为主、3 个小集聚区为辅的空间分布格局, 总体呈西北—东南走向, 空间集聚特征明显; ② 2000 年和 2015 年油井空间分布具有不均衡性且存在时间变异特征, 2000 年油井呈现两大核心区为主, 团块成片分布为辅的空间分布格局, 2015 年油井呈现三大核心区为主、核心区周围油井呈鞍状分布的空间格局特征; ③ 2000~2015 年黄河三角洲路网密度不断提高, 空间集聚特征明显, 路网密度高值主要分布在黄河三角洲中部地区, 并呈现向西部和南部扩散趋势。总的来说, 黄河三角洲地区人工地物数量大、分布范围广、增长速度快, 对自然保护区的生态安全造成了巨大威胁。通过识别和分析黄河三角洲人工地物及其时空特征, 可为该地区湿地生态系统保护提供科学依据和决策参考。

关键词: RS; GIS; 黄河三角洲; 人工地物; 时空特征

中图分类号: TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2022)03-0751-12

1 引言

黄河三角洲是我国三大河口三角洲之一, 因其广阔的湿地生态系统和丰富的自然资源, 在涵养水源、保持水土、促进陆海物质交换、维护生物多样性等方面发挥着重要作用^[1-3], 成为众多濒危野生动

物, 如黑嘴鸥 (*Larus saundersi*)^[4-5]、丹顶鹤 (*Grus japonensis*)^[6]、东方白鹳 (*Ciconia boyciana*)^[7] 等赖以生存的家园和迁飞路线中的重要“中转站”^[8], 具有很高的生态服务价值。21 世纪以来, 随着社会经济的发展, 黄河三角洲地区被确定为黄河三角洲高效

收稿日期: 2021-03-09; 修订日期: 2022-05-16

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA19060205), 山东省自然科学基金资助项目(ZR2020QD090), 国家自然科学基金项目(41901133), 山东省海岸带环境过程重点实验室开放基金项目(2019SDHADKFJJ04)。

作者简介: 徐鹤(1997—), 男, 山东泰安人, 博士研究生, 主要从事气候变化和海岸带综合风险评估研究。E-mail: hxu@yic.ac.cn

通讯作者: 侯西勇(1975—), 男, 山东泰安人, 研究员, 主要从事海岸带土地利用变化与海岸线变化遥感监测、脆弱性评价及综合管理研究。E-mail: xyhou@yic.ac.cn

生态经济区的核心建设区和山东半岛蓝色经济区的产业集聚区^[9],由于油田、风电以及道路等人工地物不断建设造成的化学污染^[10]、湿地破坏^[11]、上升气流紊乱^[12-13]和风扇噪音^[14]使得该地区的生态环境和鸟类迁徙面临严重的破坏和干扰。研究表明,2000年以来黄河三角洲地区经济开发持续加快^[15],湿地面积在不断减少^[11, 15],鸬鹚类水鸟数量呈明显的下降趋势^[16],生态服务价值在不断减小^[3],黄河三角洲面临着社会经济、资源禀赋、生态环境等多重矛盾^[17]。

2019年9月,习近平总书记在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上明确表示,黄河三角洲是我国温带最完整的湿地生态系统,需统筹推进该地区保护工作,促进河流生态系统健康发展,提高生物多样性。2021年10月,习近平总书记视察黄河三角洲地区进一步强调,黄河三角洲自然保护区生态地位十分重要,要扎实推进黄河流域生态保护和高质量发展。近年来,国内外学者针对黄河三角洲的生态保护、可持续发展、生态安全等问题进行了大量的研究^[18-21],但是缺少针对具体人工地物的时空特征的分析研究。鉴于此,本研究利用中、高分辨率卫星影像和网络爬虫技术提取并建立黄河三角洲地区主要人工地物(油井、风机和道路)空间分布数据库,并使用空间分析方法揭示其格局—过程特征,明晰其发展变化规律及其影响,以期为黄河三角洲能源资源合理的开发利用、生态环境及野生动物保护、构建海岸带保护与持续利用新模式提供科学依据和决策参考。

2 研究区概况与数据来源

2.1 研究区概况

黄河三角洲(36°55′~38°16′ N, 118°70′~119°23′ E)位于山东省北部的黄河入海口,西北邻京津冀、北靠渤海湾、东南临莱州湾,为暖温带半湿润地区,属于雨热同期的温带季风气候,四季较为分明,风能丰富(年有效风能>200 W/m²),是环渤海经济圈的重要组成部分和山东对接京津冀的门户地区,区位优势明显,境内的胜利油田是我国第二大油田,战略地位突出。黄河三角洲国家级自然保护区内鸟类共有19目、64科、367种,国家一级保护鸟类有丹顶鹤、东方白鹳等12种,国家二级保护鸟类有大天鹅、灰鹤等51种,是享誉世界的“鸟类国际机场”^[6]。

研究区范围为东营市、无棣县、沾化区和寿光市所辖范围的全部,其浅海水域以6 m等水深线为界。2014年沾化县被撤销,设立沾化区,2016年垦利县被撤销,设立垦利区,两者行政范围并无改变,为方便比较,本研究统一使用最新的行政区划名称进行表述。

2.2 数据来源与处理

利用多时相高、中分辨率卫星影像,包括GF-2、SPOT卫星和Landsat系列等(表1),辅以Google Earth的影像数据,通过目视解译和网络爬虫技术,提取和建立2000年和2015年黄河三角洲油井、风机和道路3种人工地物的空间分布数据集。

表1 目视解译所使用的卫星数据

Table 1 Satellite data used for visual interpretation

卫星	采集时间	全色分辨率/m
Landsat 5	2001/3/10~7/16	30
Landsat 7	2000/6/10~2001/6/6	15
Landsat 8	2015/10/2	15
SPOT 1	2000/3/16	10
SPOT 2	2000/8/26	10
GF 2	2015/5/26~10/16	0.8

得益于2005年2月通过的《中华人民共和国可再生能源法》,我国风力发电进入大规模发展阶段^[22],但在此之前,黄河三角洲区域风电数量少、规模小,故本研究仅对2015年的风力发电设备进行数据提取,而油井分布数据的提取年份为2000年和2015年。油井和风机空间分布提取和过程为:将研究区域按照3 km×3 km大小的方格构建渔网并编号(0~3409);利用渔网分割多源卫星影像,在每个方格内分别进行2类地物的信息提取;在提取过程中,将比例尺固定在1:10 000进行目视检索,确定风机、油井后,将比例尺放大至1:4 000进行目视解译和属性标记;油井按照面状要素建立空间分布数据,风机按照点状要素建立空间分布数据。

黄河三角洲区域道路的提取过程:基于2015年的Landsat 8、GF2等中、高分辨率卫星影像进行目视解译,提取出道路空间分布数据;利用网络爬虫工具对国内主流地图导航网站进行数据爬取,提取出2015年高等级道路的属性数据(高速、国道和省道分层存储),并对卫星影像目视解译结果进行修订,补充道路等级信息。在2015年道路数据提取及分级的基础上,对照2000年Landsat 7卫星影像进行反推,同时结合山东省地图出版社出版的东营

市、潍坊市和滨州市早期年份的交通旅游地图,完成2000年道路数据的提取和分级。其中,高等级道路包括高速、国道和省道3种类型,低等级道路包括县道、乡道和一般道路。

研究共提取得到2000年11666个油井面状图斑数据、895.42 km的高等级道路数据和5841.17 km的低等级道路数据;2015年20044个油井面状图斑数据、994个风机点状分布数据、1746.20 km的高等级道路数据和25643.80 km的低等级道路数据。

3 研究方法

风机和油井采用核密度估计法和平均最近邻法分析其时空特征,道路采用加权分析法、克里金插值法和空间自相关分析法分析其时空特征。

3.1 核密度估计法

核密度估计法(Kernel Density Estimation)通过计算单位面积内地物的数量和密度,得到核密度值,进而估算其周围区域地物的数量和密度,达到识别地物空间分布的“距离—衰减”特征的目的。在二维空间中,核密度函数(Density)的计算如下^[23-26]:

$$\text{Density} = \frac{1}{(\text{radius})^2} \sum_{i=1}^n \left[\frac{3}{\pi} d \left(1 - \left(\frac{\text{dist}_i}{\text{radius}} \right)^2 \right)^2 \right] \quad (1)$$

其中: radius 为搜索半径; dist_i 为点 i 和 (x, y) 预测位置之间的距离,且 $\text{dist}_i < \text{radius}$ 。 i 为输入点; d 为核密度函数系数。计算后用Jenks自然间断分类法识别分布密度。

3.2 平均最近邻法

平均最近邻距离是表示地理空间中同类型点状事物之间相互近邻程度大小的地理指标,用于判断地物的空间分布集聚或分散的程度。平均最近邻指数 R 定义为^[23, 27-28]:

$$R = \frac{\bar{r}_1}{r_0} = 2\bar{r}_1\sqrt{D} \quad (2)$$

$$\bar{r}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} \quad (3)$$

$$r_0 = \frac{1}{2\sqrt{\frac{n}{A}}} = \frac{1}{2\sqrt{D}} \quad (4)$$

其中: \bar{r}_1 为同类型地物最近邻实际距离的平均值; r_0 为最近邻距离的期望值; d_i 表示最近邻实际距离; n 为同类型地物的实际数量; A 为研究区面积; D 为地物密度。

当 $R < 1$ 时,表示地物集聚分布;当 $R > 1$ 时,表示地物分散分布;当实际值等于期望值,即当 $\bar{r}_1 = r_0$ 时,地物随机分布。其标准差 Z 可以表示为:

$$Z = \frac{(\bar{r}_1 - r_0) \sqrt{\frac{n^2}{A}}}{0.26136} \quad (5)$$

其中: Z 值过低表示地物强烈集聚,过高则代表强烈分散。 P 值作为显著性指标与 Z 值具有对应关系, P 值的0.1、0.05、0.01分别对应 Z 的临界数值1.65、1.96、2.58。当 $P < 0.01$ 时,表明地物具有强烈的集聚(分散)分布; $0.01 < P < 0.05$ 时,地物为较强集聚(分散)分布; $0.05 < P < 0.1$ 时,地物为一般性集聚(分散)分布; $P > 0.1$ 时,显著性较差,为随机分布。

3.3 加权分析法

道路密度加权分析的计算公式如下:

$$D_j^w = \frac{\sum_{i=1}^n l_i^a w_i}{S_j} \quad (6)$$

其中: D_j^w 为研究单元 j 的道路加权密度(km/km^2); l_i^a 为研究单元 j 内等级为 a 的道路 i 的长度, w_i 为其权重; n 为研究单元 i 内的道路数量; S_j 为区域 j 的面积。道路加权密度能够更真实地反映研究单元间的密度分布状况^[29]。高、低等级的道路分别赋予0.6和0.4的道路权重系数。

3.4 克里金插值法

克里金(Kriging)插值法假设样本之间的距离或方向反映了一种空间相关性,可以用来预测和解释表面的趋势变化^[30]。其一般表示方式为:

$$\hat{Z}(S_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(S_i) \quad (7)$$

其中: S_0 为预测位置; $Z(S_i)$ 为第 i 个位置处的测量值; λ_i 为第 i 个位置处的测量值处的未知权重; n 为测量值数。

使用规则格网作为研究区域单元,为提高插值的准确性,将格网细化至 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$,道路密度值存储于格网中心点,为能准确表达道路密度的空间形态,使用克里金插值法生成空间分布趋势面,用于分析道路密度分布的空间变化趋势。

3.5 空间自相关分析

空间自相关分析分为全局空间自相关和局部空间自相关^[31-32],全局空间自相关的测度指标主要是莫兰指数(Global Moran's I),计算公式如下:

$$I = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} Z_i Z_j}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Z_i^2} \quad (8)$$

其中: Z_i 是要素 i 的属性与其平均值的偏差 $(x_i - \bar{x})$,

W_{ij} 是要素*i*和*j*之间的空间权重, n 等于要素总数。 I 取值范围为 $-1\sim 1$,当 $I>0$ 时,表示正相关,即某区域与其临近区域的相似性大于差异性,说明相似的观测值趋于空间集聚;反之,表示相邻区域趋于空间离散,即存在显著差异;当 I 为零时,说明观测值不存在相关性,随机分布。

全局空间自相关分析并不能判断空间数据是高值聚集还是低值聚集,需要通过局部空间自相关分析进一步度量每个区域与周边地区之间的局部空间关联和空间差异程度^[33]。因此,进一步应用局部空间自相关分析法。其公式为:

$$I_i = \frac{(x_i - \bar{X})(n-1)}{\sum_{j=1, j \neq i}^n (x_j - \bar{X})^2} \sum_{j=1, j \neq i}^n w_{ij} (x_j - \bar{X}) \quad (9)$$

其中: x_i 为要素*i*的属性值; x_j 为要素*j*的属性值; \bar{X} 为关联属性值的平均值; w_{ij} 代表要素*i*和*j*的空间权重。当 I_i 为正,说明空间域*i*与具有同样高或低属性值的空间域邻近,即是聚类空间域的一部分;当 I_i 为负时,表示空间域*i*与具有包含不同值的空间域邻近,即该空间域为异常值。

局部*G*指数是Ord等^[34]在1995年提出的一种基

于距离权重矩阵的局部空间自相关指标,能够探测高值或低值要素在空间上发生聚类的位置,计算公式为:

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} x_j - \bar{x} \sum_{j=1}^n w_{ij}}{\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n x_j^2}{n} - (\bar{x})^2} \cdot \sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n w_{ij}^2 - (\sum_{j=1}^n w_{ij})^2}{n-1}}} \quad (10)$$

其中: x_j 是要素*j*的属性值; w_{ij} 为空间单元*i*和*j*之间的距离权重; n 为要素总数。显著的正 G_i^* 表示地物密度的高值簇区(热点),显著的负 G_i^* 表示为地物密度的低值簇区(冷点),其余为不显著区域。

4 结果与分析

4.1 风机、油井和道路提取结果

2015年风机提取结果如图1(a)所示。可见风机的分布较为集中,主要分布在距海不远的海岸带区域;从行政区划角度而言,主要分布在河口区,其次是寿光市、沾化区、广饶县,在垦利区、无棣县等区域也有少量分布。

2000年、2015年油井提取结果如图1(b)和图1(c)所示。油井的分布极为广泛和密集,主要分布在黄

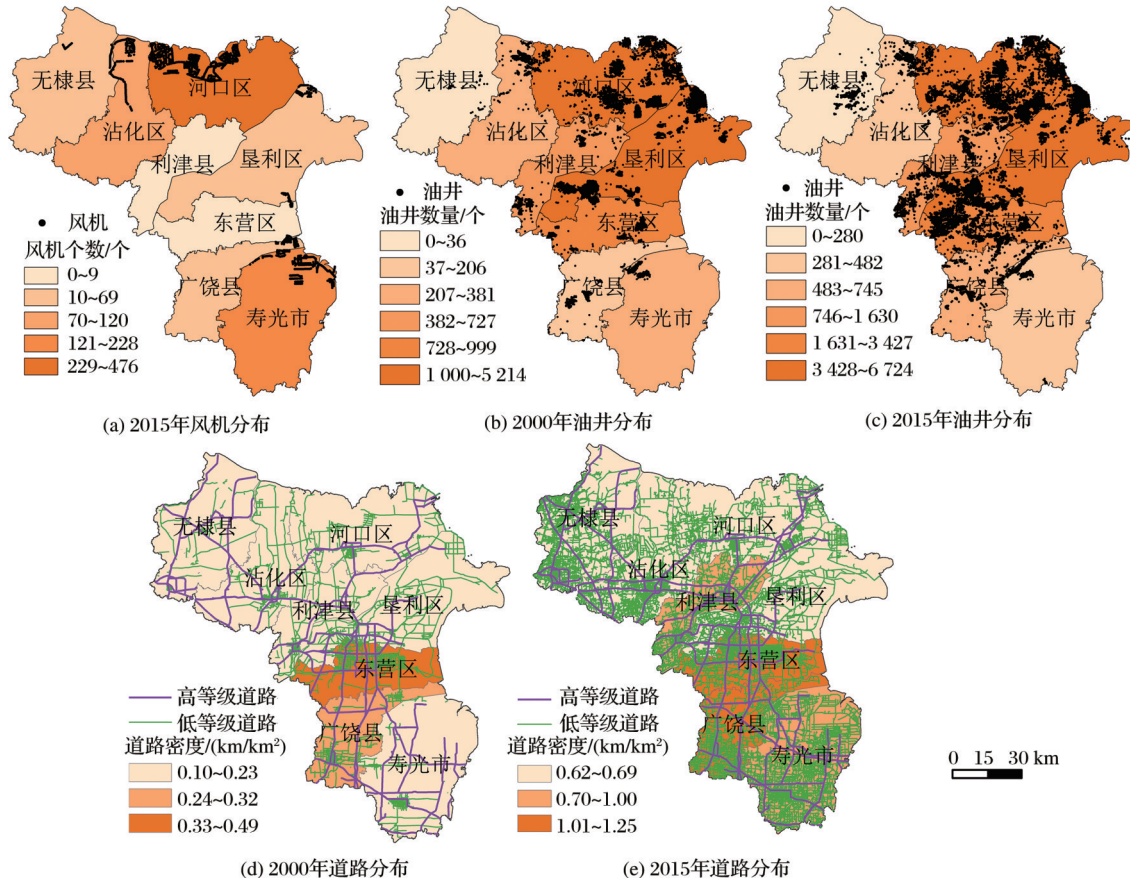


图1 黄河三角洲风机、油井和道路空间分布图

Fig.1 Spatial distribution of wind turbines, oil wells, and roads in the Yellow River Delta

河三角洲中部和东北部沿海地区;以东营区、垦利区和河口区的分布数量最为显著。

2000年、2015年道路提取结果以及在县市区层面分等级加权计算的道路密度如图1(d)和图1(e)所示。可以发现2000~2015年黄河三角洲道路基础设施建设规模迅速扩大,各县市区道路密度提升明显,尤其是西部和南部县市区道路密度增长幅度较大。

统计县(市、区)级别行政区内油井和风机的数量以及分等级加权计算道路密度,结果如表2所示。油井数量方面,无论是2000年还是2015年,均是以河口区和垦利区最为突出,其次是东营区;风机数量方面,以河口区为最多,其次是寿光市;道路密度方面,2000年和2015年均以东营区最为突出,其次是广饶县,基本与当地的经济水平相对应。

表2 风机、油井和道路分布特征统计表

Table 2 Statistical table of distribution characteristics of wind turbines, oil wells, and roads

行政区划	面积/km ²	2000年油井	2000年道路密度	2015年油井	2015年风机	2015年道路密度
		数量/个	/(km/km ²)	数量/个	数量/个	/(km/km ²)
无棣县	1 982.74	36	0.10	280	34	0.69
沾化区	1 726.62	381	0.20	482	120	0.68
东营区	1 142.27	999	0.49	3 427	9	1.25
广饶县	1 158.27	206	0.32	745	58	1.16
河口区	2 058.18	3 775	0.15	6 724	476	0.68
垦利区	2 201.13	5 214	0.23	6 320	69	0.62
利津县	1 056.81	727	0.19	1 630	0	0.90
寿光市	2 269.68	328	0.16	436	228	1.00

4.2 风机分布特征

通过对2015年风机提取结果进行搜索半径为13 km的核密度分析,经自然间断分类法(Jenks)和分级色彩设置(Graduated Colors)处理后进行空间可视化表现,得到2015年风机的空间分布格局和热点区域(图2)。

风机的分布极为不均。数量上,各行政区差距较大,其中河口区数量最多(476个),其次为寿光市(228个),而利津县为0个(图1(a)、表2)。空间分布上,通过核密度分析,风机主要分布在黄河三角洲东部和北部临海地带且具有两大核心区和三个小集聚区的空间分布格局:第一个是沾化区北部至河口区北部沿海的狭长地带,最大核密度达到0.79个/km²,风机数量占总量的59.96%,分布面积较大;第二个是广饶县东部至寿光市东北部沿海的团块状地带,最大核密度达到0.58个/km²,风机数量占总量的28.77%,分布面积较小;在无棣县西北部、垦利区北部、东营区东北部有小规模的风机集聚(图2)。这可以从一定程度上反映该地区盛行风向的分布情况。

4.3 油井分布特征

利用2000年、2015年的油井提取结果进行搜索半径为13 km的核密度分析,并将分析结果自然间断分类后利用分级色彩设置进行空间可视化,可以看出黄河三角洲油井的时空分布格局及分布热点

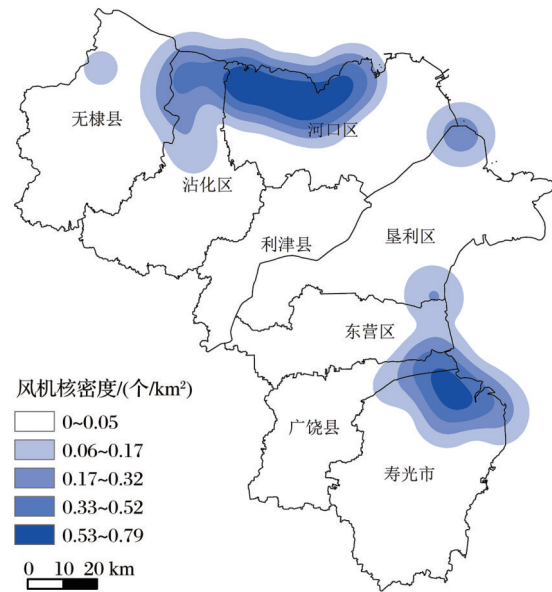


图2 2015年黄河三角洲风机核密度图

Fig. 2 Wind turbine core density map in the Yellow River Delta in 2015

区(图3)。

如图1(b)和表2所示,2000年油井在数量上各行政区之间差异较大,垦利区最多(5 214个),其次是河口区(3 775个),无棣县最少(36个);如图3(a)所示,在空间分布上呈现两大核心为主、团块成片的分布特征。第一核心位于垦利区北部沿海地区,最大核密度达到13.62个/km²,第二核心位于垦利

区西南部,最大核密度达到了 9.89 个/ km^2 ,面积小于第一核心;而在沾化区北部、河口区东部大部分区域、纵贯垦利区南部至寿光市北部的条带状区域等,呈现团块连接成片的分布特征,最大核密度达到 6.40 个/ km^2 。2015年油井仍呈现分布不均的特征,但在数量和空间分布范围上均大于2000年,所有行政区内油井数量均呈现增长态势,共增长 $8\,378$ 个,其中河口区增幅最大,达 $2\,949$ 个,且总量达到 $6\,724$ 个,无棣县的油井最少(280 个)(图1(c)、表2)。在空间分布上,呈现三大核心连片分布的空间分布特征,分别位于垦利区北部沿海地区、河口区东南部以及垦利区东南部和东营区西北部的交界地带,其最大核密度均达到 14.02 个/ km^2 ,而核心区周围的油井数量呈鞍状连接成片,高低核密度面积均明

显扩大,广饶县和利津县尤为明显(图3(b))。

通过平均最近邻法计算2000年和2015年油井的分布特征(表3),结果表明,2000年油井平均密度为 0.71 个/ km^2 ,平均邻近距离为 189.66 m, R 值得分为 0.32 小于 1 ,且 Z 值得分为 -140.95 小于 -2.58 ,在 0.01 显著性水平下通过检验,表明2000年油井分布具有强烈的空间集聚特征;2015年油井平均密度为 1.21 个/ km^2 ,平均邻近距离为 191.93 m, R 值得分为 0.42 小于 1 ,且 Z 值得分为 -156.35 小于 -2.58 ,在 0.01 显著性水平下通过检验,表明2015年油井分布具有强烈的空间集聚特征。纵向比较2000年和2015年相关参数,2000年的平均邻近距离和 R 值均小于2015年,说明2000年黄河三角洲油井分布集聚特征更为明显,而2015年油井的平均密度更高。

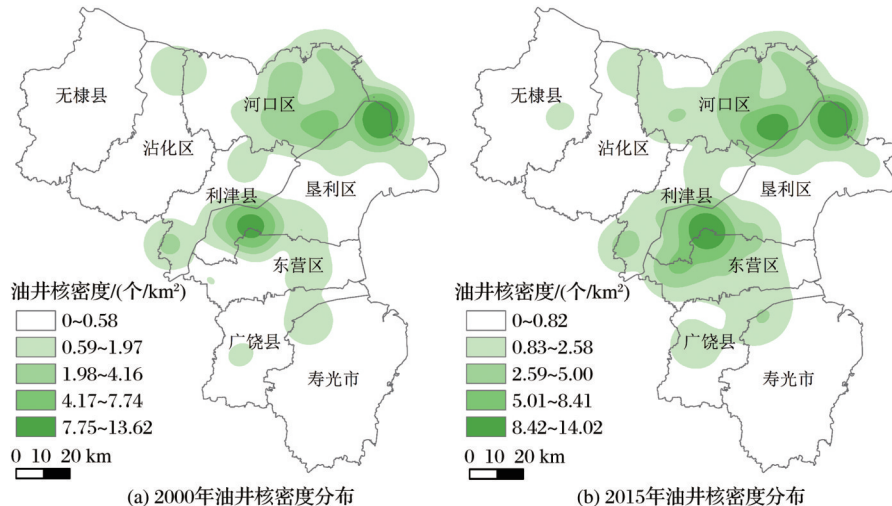


图3 2000年和2015年黄河三角洲油井核密度图

Fig.3 Oil well core density map in the Yellow River Delta in 2000 and 2015

表3 2000年和2015年黄河三角洲油井平均最近邻分析汇总表

Table 3 Statistical table of average nearest neighbor analysis for oil wells in the Yellow River Delta in 2000 and 2015

年份	平均密度/(个/ km^2)	平均观测距离/m	预期平均距离/m	最邻近比率/ R	Z 得分	P 值
2000	0.71	189.66	594.35	0.32	-140.95	0.00
2015	1.21	191.93	454.98	0.42	-156.35	0.00

4.4 道路分布特征

经加权分析法计算并可视化得到2000年和2015年道路密度空间分布图(图1(d)、图1(e))。在县(市、区)级别行政区层面道路分布及变化特征如下:2000年,道路密度普遍不高;东营区密度较大,最大密度约 0.49 km/km^2 ,属于道路高密度区;广饶县次之,最大密度约 0.32 km/km^2 ,属于道路中密度区;无棣县、河口区、沾化区、利津县、垦利区和寿光市属于道路低密度区,最大密度约 0.23 km/km^2 。

2015年道路密度普遍显著提高;东营区和广饶县密度较大,最大密度达到 1.25 km/km^2 ,属于道路高密度区;利津县和寿光市道路密度次之,最大密度约 1.0 km/km^2 ,属于道路中密度区;无棣县、沾化区、河口区和垦利区道路密度最低,最大密度达到 0.69 km/km^2 ,属于道路低密度区。总体来看,2000~2015年黄河三角洲各行政区道路密度均有不同程度提高,其中,东营区一直为道路高密度区,广饶县道路密度自中密度区上升为高密度区,利津

县和寿光市自低密度区上升为中密度区,广饶县和寿光市道路密度提升幅度最大,垦利区提升幅度最小,道路密度变化一定程度上反映城市经济社会的发展情况,说明寿光市和广饶县城市经济发展速度较快。从宏观角度看,道路密度的中高值地区主要分布在黄河三角洲中南部,低值主要分布在沿海地区,说明黄河三角洲人口分布和道路建设受到距海远近的影响。

将道路分布数据进行克里金插值后得到道路密度空间趋势图(图4),总体来看,道路密度高值主要分布在黄河三角洲中部地区,特别是东营区北部、利津县西南部和垦利区南部,主要原因是此处位于“十字”路口处,北至东营港、东至莱州湾、南至

潍坊市、西至滨州市,且为东营市的主要区县,人口密集,城市发展迅速,人员物资交流运输频繁,道路交通需求量较高。具体来看,2000年除中部地区的明显高值外,在沾化区东南部、广饶县南部和寿光市南部地区存在小区域的高值分布,结合卫星影像发现这些地点为城市或乡村居民点。2015年道路密度普遍提高,尤其是利津县和东营区道路密度进一步提升,河口区东部和南部出现明显的道路密度高值区,主要是东营港的不断发展和东营港疏港高速建设促进了该地区道路密度的提高,此外,滨州市的无棣县和潍坊市的寿光市凭借地理位置优势,靠近多条省内、省际交通干线,如滨德高速、青银高速和长深高速,其道路密度得到明显提升。

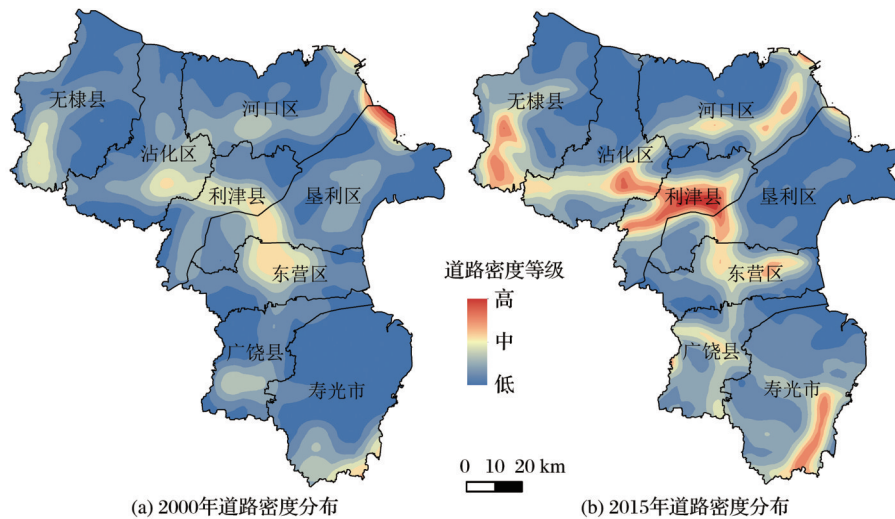


图4 2000年、2015年黄河三角洲道路密度空间趋势图

Fig.4 Spatial trend of road density in the Yellow River Delta in 2000 and 2015

基于空间插值的道路密度空间特征分析反映了黄河三角洲道路分布的总体特征,但是对内部区域差异程度需要更加深入的探讨,因此使用ArcGIS的全局空间自相关分析(Global Moran's I)对 $5\text{ km} \times 5\text{ km}$ 的规则格网数据集的道路加权密度值进行全局空间相关分析,空间关系准则选择使用多边形一阶邻接关系。

2000年道路密度的全局Moran's I 约为0.43, Z 得分约为21.04, P 值趋近于0,在0.01显著性水平下通过检验;2015年道路密度的全局Moran's I 约为0.56, Z 得分为27.14, P 值趋近于0,在0.01显著性水平下通过检验。可见2个年份都具有较高的空间集聚性,均具有正的空间自相关,说明黄河三角洲道路加权密度具有显著的空间集聚特征,且2015年道路密度的空间集聚性要高于2000年,在一定程度上

说明了2000~2015年城市和经济水平得到明显的提高。

通过ArcGIS的聚类和异常值分析(Anselin Local Moran's I)工具对各网格单元的道路加权密度进行局部空间相关分析,得到聚类/异常值类型空间分布图(图5)。

2000年在连接沾化区东南部至东营区中北部的团块状区域内,以及无棣县南部、河口区南部、垦利区北部、广饶县南部和寿光市南部的分散区域内呈现出高高(HH)聚类区,除此以外,大部分地区观测到的空间模式反映零假设(CSR)所表示的理论上的随机模式,呈现非显著聚类特征;2015年高高(HH)聚类和低低(LL)聚类分布范围明显扩大,高高聚类主要分布在黄河三角洲中部、西部和南部地区,低低聚类主要分布在北部沿海和东部沿海地

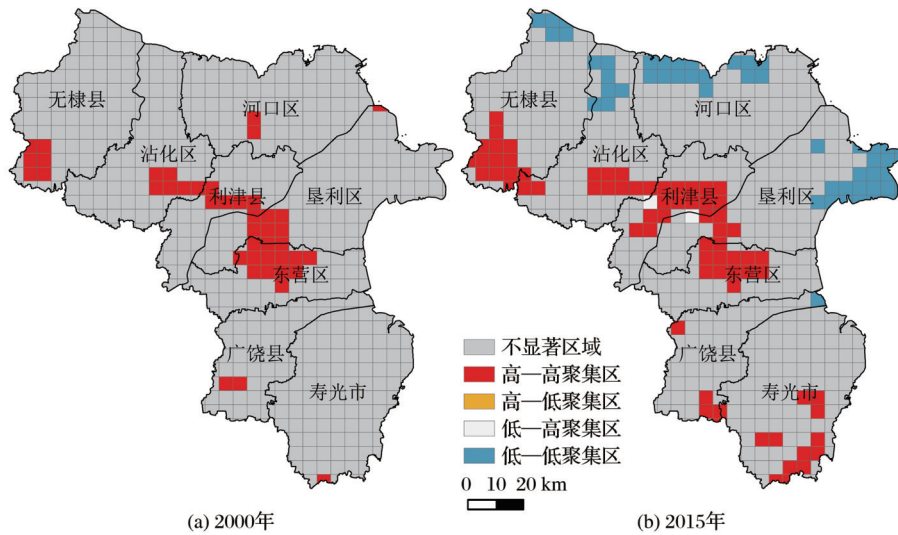


图5 2000年、2015年道路密度 Anselin Local Moran's I 分析图

Fig. 5 Anselin Local Moran's I analysis diagram of road density in 2000 and 2015

区,说明2000~2015年道路密度高高聚类区呈现出由中部地区向西部和南部方向延伸扩散趋势,而北部和东部沿海地区则呈现低值集聚状态,这在一定程度上体现了黄河三角洲经济和城市的发展趋势,即内陆腹地交通便利,发展较快,而部分沿海地区则受自然保护区设立、自然条件较差和人口密度较低等原因的限制而发展较慢。此外,2000年垦利区东北部沿海地区出现一个面积较小的高高集聚区,结合此地特殊的历史背景和能源利用开发方式,分析发现此处为胜利油田油井的主要密集分布区,是国家能源生产的主要地区之一,2000年胜利油田重组改制为胜利石油管理局和胜利油田有限公司,开采石油的工程项目增多,这进一步促进了道路

等基础设施的建设和道路密度的提高。

尽管聚类和异常值分析能大致测算出聚集区域的中心,但辨别高低值聚集位置仍然存在不可忽视的误差,而G指数分析能较准确地探测出高值和低值聚集区域范围。因此,通过热点分析(Getis-Ord G_i^*)揭示黄河三角洲的道路加权密度高值(热点)和低值(冷点)的空间聚类特征,如图6所示。

可见,冷热点分析得到的结果与 Anselin Local Moran's I 得到的高高聚类、低低聚类结果在空间上耦合,但是细节更为详细准确。如2000年冷点分布面积较少,热点分布面积较大且集中,说明2000年黄河三角洲地区以高等级道路建设为主,低等级道路建设相对较少,高等级道路主要集中在人员密集

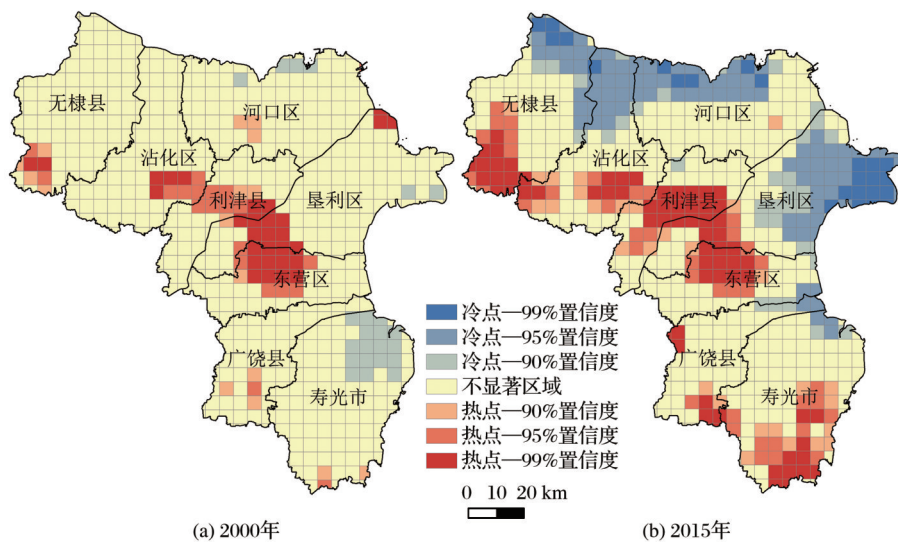


图6 2000年、2015年道路密度冷热点分布图

Fig. 6 Cold and hot spot distribution of road density in 2000 and 2015

的居住区和部分资源开发地区。2015年无棣县北部、沾化区北部和河口区北部的沿海地区以及垦利区东部沿海地区的冷点分布最为显著,寿光市南部和无棣县南部地区热点分布面积增长幅度较大,这说明垦利区东部和河口区等北部沿海地区存在较大面积的等级较低的道路集聚,寿光市和无棣县高等级道路建设发展迅速,如高速、国道等。

5 讨论与结论

5.1 讨论

5.1.1 政策因素影响人工地物的发展

黄河三角洲地区人工地物发展受政策影响较大。该地区风能资源丰富,但开发较晚,特别是在开发初期数量较少,规模较小^[35]。2005年后,在《中华人民共和国可再生能源法》、《黄河三角洲高效生态经济区发展规划》等国家政策的支持下,大唐、华电、华能等国内风电产业企业开始在黄河三角洲地区布局,风电数量和规模逐步攀升。2009年,黄河三角洲地区的东营市仅有6家风力发电企业且其中只有3家建设完成,滨州市沾化区的国华瑞丰建成25台风力机组并开始发电。2010年,黄河三角洲已经规划了河口、利津、黄河口和黄河以南4个风电场,大唐电力安装完成33台风机,其中23台风机已经开始发电^[14]。2015年,黄河三角洲地区已有994台风机建设完成,实现大规模风力发电。截至2021年底,东营市已实现风电装机108.81万千瓦,并积极推动海上风电、海上光伏的发展,计划将风电、光伏发电及配套产业打造成东营新的经济增长点^[36]。

黄河三角洲的石油资源丰富且勘探开发时间较早,1961年我国在该地区发现胜利油田,自此开始勘探开发^[37],相较于2000年,2015年油井数量增多8378口,且增加的油井主要分布在东营市的河口区、垦利区和东营区,有力地保障了我国的能源安全,并极大促进了东营市国民生产总值和人均GDP的提高,两者分别从2000年的398.75亿元和2.33万元上升至2015年的2396.81亿元和11.39万元。此外,道路建设也呈现显著的空间差异,反映出经济和城乡基础设施建设在2000~2015年间呈现总体进步和内部差异明显的特征。

5.1.2 人工地物建设的负面影响与未来发展趋势

人工地物建设对黄河三角洲生态系统,特别是湿地生态系统和野生鸟类保护造成巨大威胁。油田开发区域和山东黄河三角洲国家级自然保护区

存在577 km²的重叠^[38],2015年有1418座油田、33座风机分布在山东黄河三角洲国家级自然保护区,至2017年,保护区内有油田生产设施2481处,其中核心区、缓冲区共有300处,实验区有2181处^[39]。油田建设易造成石油污染,破坏湿地;风机转动造成的噪声污染和气流紊乱,影响鸟类飞行安全;道路建设破坏野生动物生境与生物多样性。

近年来,山东省、东营市、滨州市等相继推出一系列政策措施,为黄河三角洲湿地保护“舍油让道”,2016年12月胜利油田启动了分类整改工作,制定了《胜利油田山东黄河三角洲国家级自然保护区核心区和缓冲区内滩海油田开发工程关停退出方案》(2018~2023年),2017年将该退出方案由6年压缩至3年,有序退出生产设施,并实施生态修复^[39]。尽管如此,黄河三角洲特别是自然保护区域内油井、风机和道路等人工地物在历史时期造成的负面影响仍在显现,短时期仍无法消除,仍需进一步研究。在“碳达峰”、“碳中和”目标的指引下,黄河三角洲凭借其广阔的滨海湿地将发挥减碳、储碳、固碳的重要作用,这需要统筹传统化石能源与绿色新能源开发的相关关系,既要保障国家能源安全又要保护黄河三角洲地区的生态功能,并不断提升当地人民生活福祉,努力实现生产空间、生态空间和生活空间的优化配置。

5.2 结论

本研究基于多时相、多类型的中、高分辨率卫星影像,对黄河三角洲的油井、风机和道路进行识别提取,并分析其时空特征,得到如下主要结论:

2015年黄河三角洲风机空间分布具有不均衡性,呈现两大核心区为主、3个小集聚区为辅的空间分布格局,分布方向明确呈西北—东南走向,空间集聚特征明显。

2000和2015年油井空间分布也具有不均衡性且存在时间变异特征,2000年油井呈现两大核心区为主、团块成片分布为辅的空间分布格局,2015年油井呈现三大核心区为主、核心区周围油井呈鞍状分布的空间格局特征;两者均为东北—西南走向分布,且均具有显著的空间集聚特征,2000年油井分布具有范围小、方向性更强、集聚特征更显著的特点,2015年油井分布有分布范围大、方向性较弱、集聚特征较弱的点。

2000~2015年黄河三角洲路网密度不断提高,呈现出明显的空间集聚特征,且2015年的集聚特征

更加明显。2000年路网密度的明显高值主要集中在黄三角中部地区,但是其高一高聚类区域和热点区域以及低—低聚类区域和冷点区域的面积均相对较小,高等级道路主要集中于中部地区,其余地区的道路等级较低且比较分散;2015年的路网密度高值由中部地区向西部和南部延伸扩散,且高一高聚类和热点区域以及低—低聚类和冷点区域的面积明显扩大,此时高等级的道路主要集中于内陆地区,沿海地区主要为等级较低的道路,但分布较为集中。

参考文献(References):

- [1] Chen Liding, Fu Bojie. Analysis of human activity on landscape in Yellow River Delta: A case study of Donying Region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, 16(4): 337-344. [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, 16(4): 337-344.]
- [2] Xu Xuegong, Lin Huiping, Fu Zaiyi, *et al.* Regional ecological risk assessment of wetland in the Huanghe River Delta [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2001, 37(1): 111-120. [许学工, 林辉平, 付在毅, 等. 黄河三角洲湿地生态风险评价[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2001, 37(1): 111-120.]
- [3] Liu Yubin, Wang Xiaoli, Hou Xiyong, *et al.* Land use pattern and evaluation of ecosystem service values of Yellow River Delta for 4 periods and in 2025 under simulation scenarios [J]. *Wetland Science*, 2020, 18(4): 424-436. [刘玉斌, 王晓利, 侯西勇, 等. 四个时期和模拟情景下2025年黄河三角洲的土地利用格局和生态系统服务价值评估[J]. *湿地科学*, 2020, 18(4): 424-436.]
- [4] Yu Yang. Changes of breeding grounds of Saunders's gulls in the Yellow River Delta [J]. *Journal of Shandong Forestry Science and Technology*, 2014, 44(4): 89-91. [于洋. 黄河三角洲黑嘴鸥繁殖地变迁[J]. *山东林业科技*, 2014, 44(4): 89-91.]
- [5] Xu H, Li D, Hou X, *et al.* Home range and habitat disturbance identification for a vulnerable shorebird species (*Larus Saundersi*) in the Yellow River Delta, China [J]. *Journal of Coastal Research*, 2021, 37(4): 737-748. DOI: 10.2112/JCOASTRES-D-20-00091.1.
- [6] Shandong Yellow River Delta National Nature Reserve Administration. Detailed Plan of Yellow River Delta National Nature Reserve in Shandong Province (2014-2020) [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2016. [山东黄河三角洲国家级自然保护区管理局. 山东黄河三角洲国家级自然保护区详细规划(2014-2020年)[M]. 北京: 中国林业出版社, 2016.]
- [7] Zhu Shuyu, Wang Weihua, Wang Yuzhen, *et al.* Wetland restoration and biodiversity conservation in the Yellow River Delta nature reserve [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2011, 33(S2): 1-5. [朱书玉, 王伟华, 王玉珍, 等. 黄河三角洲自然保护区湿地恢复与生物多样性保护[J]. *北京林业大学学报*, 2011, 33(增刊2): 1-5.]
- [8] Bai Q, Chen J, Chen Z, *et al.* Identification of coastal wetlands of international importance for waterbirds: A review of China coastal waterbird surveys 2005-2013 [J]. *Avian Research*, 2015, 6(1): 1-16. DOI: 10.1186/s40657-015-0021-2.
- [9] Cheng Yu, Liu Kai, Xu Chenglong, *et al.* A comparative study of man-land system in Shandong Peninsula blue economic zone about sustainable evaluation and spatial types [J]. *Economic Geography*, 2015, 35(5): 118-125. [程钰, 刘凯, 徐成龙, 等. 山东半岛蓝色经济区人地系统可持续性评估及空间类型比较研究[J]. *经济地理*, 2015, 35(5): 118-125.]
- [10] Xie Xiaofan, Liu Yuexian, Qiu Hui, *et al.* Distribution characteristics and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in farmland soil-corn system from oil mining area of Yellow River Delta [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(3): 987-997. [解小凡, 刘月仙, 邱慧, 等. 黄河三角洲石油化工区农田土壤—玉米体系PAHS的分布特征及风险评价[J]. *生态学报*, 2021, 41(3): 987-997.]
- [11] Zhang Teng, Chang Jun, Ma Yu, *et al.* Study on the characteristics of wetland evolution and its correlation with human activities in Bohai Sea of Shandong Province [J]. *World Regional Studies*, 2021, 1-10. [张腾, 常军, 马宇, 等. 山东渤海滨海湿地演变特征及与人类活动相关性研究[J]. *世界地理研究*, 2021: 1-10.]
- [12] Ma Longlong, Li Guoqing, Wang Feifei, *et al.* Influence of wind farm on the water evapotranspiration at the North of Yellow River Delta [J]. *Geospatial Information*, 2019, 17(4): 103-106, 11. [马龙龙, 李国庆, 王菲菲, 等. 黄河三角洲北部风电场对水体蒸散发的影响[J]. *地理空间信息*, 2019, 17(4): 103-106, 11.]
- [13] Marques A T, Santos C D, Hanssen F, *et al.* Wind turbines cause functional habitat loss for migratory soaring birds [J]. *Journal of Animal Ecology*, 2020, 89(1): 93-103. DOI: 10.1111/1365-2656.12961.
- [14] Liu Qingzhi, Fan Yanlei. Development of wind power in the Yellow River Delta [J]. *Energy Conservation & Environmental Protection*, 2011(1): 50-52. [刘清志, 范延磊. 黄河三角洲风电的发展[J]. *节能与环保*, 2011(1): 50-52.]
- [15] Song Baiyuan, Hou Xiyong, Liu Yubin. Land-use change characteristics and scenario analysis in the Yellow River Delta and Laizhou Bay coastal zone [J]. *Marine Sciences*, 2019, 43(10): 24-34. [宋百媛, 侯西勇, 刘玉斌. 黄河三角洲—莱州湾海岸带土地利用变化特征及多情景分析[J]. *海洋科学*, 2019, 43(10): 24-34.]
- [16] Studds C E, Kendall B E, Murray N J, *et al.* Rapid population decline in migratory shorebirds relying on Yellow Sea tidal mudflats as stopover sites [J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 1-7. DOI: 10.1038/ncomms14895.
- [17] Deng Xiangzheng, Zhang Fan, Liu Gang. Research on coupling mechanism of ecological conservation and sustainable development in the Yellow River Delta [J]. *Yellow River*, 2020,

- 42(9):117-122.[邓祥征,张帆,刘刚.黄河三角洲生态保护与可持续发展研究[J].人民黄河,2020,42(9):117-122.]
- [18] Zhai Jun, Jin Diandian, Chen Yan, *et al.* Ecological changes, problems and countermeasures in the high efficiency eco-economic zone of the Yellow River Delta[J]. Resources Science, 2020, 42(3): 517-526.[翟俊,金点点,陈妍,等.黄河三角洲高效生态经济区生态变化、问题与对策[J].资源科学,2020,42(3):517-526.]
- [19] Dong Zhanfeng, Qu Aiyu, Ji Yunqing. On ecological environment protection of lower reaches of Yellow River with high-quality development strategy [J]. Science & Technology Review, 2020, 38(14): 109-115.[董战峰, 璩爱玉, 冀云卿. 高质量发展战略下黄河下游生态环境保护[J]. 科技导报, 2020, 38(14): 109-115.]
- [20] Han Guangxuan, Song Weimin, Li Peiguang, *et al.* Long-term ecological research support protection of coastal wetland ecosystems[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(2): 218-228.[韩广轩, 宋维民, 李培广, 等. 长期生态学研究为滨海湿地保护提供科技支撑[J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(2): 218-228.]
- [21] Xu Xuegong, Liang Ze, Zhou Xin. Land and sea coordination for sustainable development in the Yellow River Delta[J]. Resources Science, 2020, 42(3): 424-432.[许学工, 梁泽, 周鑫. 黄河三角洲陆海统筹可持续发展探讨[J]. 资源科学, 2020, 42(3): 424-432.]
- [22] Xue Huifeng, Wang Haining. Review of implementation of renewable energy law and outlook [J]. Sino-Global Energy, 2010, 15(3): 33-36.[薛惠锋, 王海宁.《中华人民共和国可再生能源法》的实施回顾及展望[J]. 中外能源, 2010, 15(3): 33-36.]
- [23] Wang Yang, Yang Ren, Li Qiang, *et al.* The spatial layout features and patterns of banking industry in Gangzhou City, China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(5): 742-750.[王洋, 杨忍, 李强, 等. 广州市银行业的空间布局特征与模式[J]. 地理科学, 2016, 36(5): 742-750.]
- [24] Yu Wenhao, Ai Tinghua. The visualization and analysis of POI features under network space supported by Kernel density estimation[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(1): 82-90.[禹文豪, 艾廷华. 核密度估计法支持下的网络空间POI点可视化与分析[J]. 测绘学报, 2015, 44(1): 82-90.]
- [25] Li Xiaotong, Song Junxue, Cheng Yu. The study of spatial distribution patterns of traditional villages in Shandong Province[J]. Journal of Shandong Normal University (Natural Science Edition), 2018, 33(3): 334-343.[李晓彤, 宋俊学, 程钰. 山东省传统村落空间分布格局研究[J]. 山东师范大学学报(自然科学版), 2018, 33(3): 334-343.]
- [26] Liu Rui, Hu Weiping, Wang Hongliang, *et al.* The road network evolution of Guangzhou-Foshan metropolitan area based on Kernel density estimation[J]. Scientia Geographica Sinica, 2011, 31(1): 81-86.[刘锐, 胡伟平, 王红亮, 等. 基于核密度估计的广佛都市区路网演变分析[J]. 地理科学, 2011, 31(1): 81-86.]
- [27] Che Bingqing, Jian Xiaobin, Lu Yuqi. Study on the distribution characteristics and regional difference of commercial network in Jiangsu Province[J]. Journal of Geo-information Science, 2017, 19(8): 1060-1068.[车冰清, 简晓彬, 陆玉麒. 江苏省商业网点的空间分布特征及其区域差异因素[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(8): 1060-1068.]
- [28] Li Yang, Chen Xiaohong. Spatio-temporal evolution and spatial agglomeration of Harbin commercial center[J]. Geographical Research, 2017, 36(7): 1377-1385.[李阳, 陈晓红. 哈尔滨市商业中心时空演变与空间集聚特征研究[J]. 地理研究, 2017, 36(7): 1377-1385.]
- [29] Chen Shaopei, Fang Ming, Zhuang Dachang. Analysis of road density spatial heterogeneity and its influences for urban form of Guangzhou[J]. Geomatics World, 2019, 26(6): 37-43.[陈少沛, 房明, 庄大昌. 广州市道路密度空间分异及对城市形态影响分析[J]. 地理信息世界, 2019, 26(6): 37-43.]
- [30] Mei Zhixiong Li Xia. Spatial analysis of houses' price in Dongguan based on ESDA and KRIGING techniques[J]. Economic Geography, 2008, 28(5): 862-866.[梅志雄, 黎夏. 基于ESDA和KRIGING方法的东莞市住宅价格空间结构[J]. 经济地理, 2008, 28(5): 862-866.]
- [31] Duan Yingying, Lu Feng. Spatial autocorrelation of urban road traffic based on road network characterization [J]. Journal of Geo-information Science, 2012, 14(6): 768-774.[段滢滢, 陆锋. 基于道路结构特征识别的城市交通状态空间自相关分析[J]. 地球信息科学学报, 2012, 14(6): 768-774.]
- [32] Griffith D A. Spatial autocorrelation: A primer[M]. Washington DC: Association of American Geographers, 1987.
- [33] Anselin L. Local indicators of spatial association—LISA [J]. Geographical analysis, 1995, 27(2): 93-115. DOI: 10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x.
- [34] Ord J K, Getis A. Local spatial autocorrelation statistics: Distributional issues and an application [J]. Geographical Analysis, 1995, 27(4): 286-306. DOI:10.1111/j.1538-4632.1995.tb00912.x.
- [35] Wang Xiuxiu. Study on the wind energy of the Yellow River Delta[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2009.[王秀秀. 黄河三角洲风能资源研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2009.]
- [36] Dazhong Daily. Dongying offshore wind power equipment manufacturing industrial park officially started construction [EB/OL]. <https://baijiahao.baidu.com/s? id=1730255700912750531&wfr=spider&for=pc>, 2022-04-16.[大众日报. 东营海上风电装备制造产业园正式开工建设[EB/OL]. <https://baijiahao.baidu.com/s? id=1730255700912750531&wfr=spider&for=pc>, 2022-04-16.]
- [37] Zhong Xiaobo. The lessons from the history of the development of the Yellow River Delta[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Social Sciences), 2014, 30(1): 35-38.[钟效博. 黄河三角洲开发的历史之鉴[J]. 中国石油大学学报(社会科学版), 2014, 30(1): 35-38.]

- [38] The Xinhua News Agency. Shengli Oil Field Makes Way for Yellow River Delta Wetland Protection[EB/OL]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1685119423648882920&.wfr=spider&.for=pc>, 2020-12-04.[新华社.胜利油田为黄河三角洲湿地保护“舍油让道”[EB/OL]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1685119423648882920&.wfr=spider&.for=pc>, 2020-12-04.]
- [39] Qilu Nets. Shandong Has Strengthened Efforts to Protect Wetlands in the Yellow River Delta, Where Rare Birds Fall in Love with the Sea[EB/OL]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1688869609389829055&.wfr=spider&.for=pc>, 2021-01-14.[齐鲁网.山东加强黄河三角洲湿地保护珍稀鸟类“恋上”入海口[EB/OL]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1688869609389829055&.wfr=spider&.for=pc>, 2021-01-14.]

Analyzing Spatio-temporal Characteristics of Main Artificial Features in the Yellow River Delta based on RS and GIS

Xu He^{1,2,3,4}, Hou Xiyong^{1,3,4}, Li Dong^{1,3,4}, Han Mei⁵, Liu Yubin^{1,2,3,4},
Wang Xiaoli^{1,3,4}, Fan Chao^{1,2,3,4}

(1. *Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China;*

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China;

4. Shandong Key Laboratory of Coastal Environmental Processes, Yantai 264003, China;

5. College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250358, China)

Abstract: Oil wells, wind turbines, and roads are the main artificial features in the Yellow River Delta (YRD). It is of great significance to clarify their spatio-temporal characteristics to ensure the ecological security of the YRD. Based on medium and high-resolution satellite images, such as Landsat, SPOT, and GF2, the main artificial features in the YRD in 2000 and 2015 were extracted, and then their spatio-temporal characteristics were analyzed, using the methods of kernel density, average nearest neighbor, weighted analysis, Kriging interpolation, and spatial autocorrelation analysis. The results showed that: (1) The spatial distribution of wind turbines was uneven in 2015, showing a distribution pattern dominated by two core regions and assisted by three small agglomeration regions. The overall trend was northwest to southeast with an obvious spatial agglomeration characteristic. (2) The spatial distributions of oil wells in 2000 and 2015 were both uneven and characterized by time variation. In 2000, oil wells showed a spatial distribution pattern with two cores as a main part, supplemented by a patchy distribution of clusters. However, in 2015, oil wells showed a spatial pattern characteristic of three major core areas dominated and a saddle-shaped distribution of wells around the core areas. (3) From 2000 to 2015, the road network density had been continuously increasing, with obvious spatial agglomeration characteristics. The high road network density was mainly distributed in the central region of the YRD, and presented a spreading trend to the west and south. Overall, the wide distribution, fast growth, and the large number of artificial features in the YRD have posed a great threat to the ecological security of nature reserves. This study provides a scientific basis and decision-making reference for wetland ecosystem protection in this region by identifying and analyzing the spatio-temporal characteristics of artificial features in the YRD.

Key words: RS; GIS; Yellow River Delta(YRD); Artificial feature; Spatio-temporal characteristics