

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2024.03.023

马东岭, 刘卫星, 张春红. 基于谷歌地球引擎和分形理论的黄河三角洲土地利用空间结构研究. 土壤, 2024, 56(3): 655–665.

基于谷歌地球引擎和分形理论的黄河三角洲土地利用空间结构研究^①

马东岭¹, 刘卫星¹, 张春红²

(1 山东建筑大学测绘地理信息学院, 济南 250101; 2 山东建筑大学建筑城规学院, 济南 250101)

摘要: 基于谷歌地球引擎(Google earth engine, GEE), 以 Landsat-5(TM)、Landsat-7(ETM)和 Landsat-8(OLI)数据为遥感数据源, 采用随机森林分类方法对黄河三角洲生态功能保护区 1985—2020 年的土地利用类型进行了划分, 在此基础上利用分形理论方法计算了土地利用分形维数和稳定性指数, 并分两个阶段对研究区土地利用空间结构的复杂度和稳定性进行了定量分析。结果表明: ①1985—2020 年, 研究区的耕地面积逐渐减少; 草地面积相对稳定; 水体面积逐渐扩大, 2015—2020 年增长率最高; 裸地面积的变化较为波动, 先增加后又逐渐下降; 建筑物面积呈指数增长。②研究区土地利用空间结构的分形维数总体上呈降低趋势, 表明土地利用复杂度降低。③研究区土地利用空间结构的稳定性指数总体上呈升高趋势, 表明土地利用空间结构趋向稳定。总体上, 黄河三角洲生态功能保护区随着环境保护政策的实施, 土地利用空间结构逐渐得到改善, 水、草等自然资源逐渐丰富。

关键词: 谷歌地球引擎; 分形理论; 空间结构; 时空变化; 黄河三角洲

中图分类号: F301.24 **文献标志码:** A

Study on Land Use Spatial Structure Based on Google Earth Engine and Fractal Theory: A Case Study of Ecological Function Reserve in Yellow River Delta

MA Dongling¹, LIU Weixing¹, ZHANG Chunhong²

(1 School of Surveying and Geo-Informatics, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China; 2 School of Architectural and Urban Planning, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

Abstract: Based on Google Earth Engine (GEE), Landsat-5 (TM), Landsat-7 (ETM) and Landsat-8 (OLI) data were used as remote sensing data sources to classify land use types from 1985 to 2020 with the random forest classification method. The fractal theory method was used to calculate land use fractal dimension and stability index, and the complexity and stability of the spatial structure of land use types were quantitatively analyzed in two stages of 1985—2005 and 2005—2020. The results showed that: 1) From 1985 to 2020, cultivated land gradually decreased, grassland changed little, water gradually expanded, with the highest growth rate in 2015—2020, bare land changed more irregularly, increasing first and then gradually decreasing, and buildings grew exponentially. 2) Fractal dimension of the spatial structure of land use types generally showed a decreasing trend, indicating a decrease in its complexity. 3) Stability index of the spatial structure of land use types tended to increase in general, indicating it tended to be stable. In conclusion, with the implementation of environmental protection policies, the spatial structure of land use types in the study area has been gradually improved, and natural resources such as water and grassland have been gradually enriched.

Key words: Google Earth Engine; Fractal theory; Spatial structure; Spatio-temporal variation; Yellow River Delta

土地利用空间结构是指土地利用类型在地理空间上的分布和组织形式, 人类活动包括农业、城市化和工业化等对生态系统的结构和功能以及生态系统

服务的提供均产生巨大影响^[1]。土地利用空间结构研究对于更好地理解土地利用格局和变化趋势、指导土地规划、促进可持续发展等具有重要的意义。

①基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2020MD025)和山东建筑大学博士科研基金项目(X21079Z)资助。

作者简介: 马东岭(1980—), 女, 山东济南人, 博士, 副教授, 主要从事摄影测量与遥感影像处理等方面的研究。E-mail: mdling2003@sdjzu.edu.cn

目前土地利用空间结构的定量计算包括土地利用分类统计、分形维数及稳定性指数的计算^[2]。在土地利用分类统计方面,传统的遥感监测技术手段在处理土地利用分类问题时存在效率低下、预处理流程冗长及消耗存储等弊端。随着云存储和云计算技术的快速发展,谷歌地球引擎(Google earth engine, GEE)平台的出现为海量遥感数据的下载和处理提供了一种新的技术手段。GEE 处理速度更快、数据集更丰富、分布式计算能力更强、可编程性更强、共享性更佳,为遥感工作者提供了极大的便利^[3]。已有学者基于 GEE 平台对土地利用分类进行了相关研究,如 Tassi 等^[4]基于 GEE 和 Landsat-8 影像绘制了 2018—2020 年意大利 Maiella 国家公园的土地利用/土地覆盖地图,发现基于对象的方法比基于像素的方法表现更好,添加纹理信息并不能改善后者;Yao 等^[5]在 GEE 平台上利用 1990—2020 年土地覆盖变化分析了中国新疆维吾尔自治区遥感生态指数的空间分布,发现其具有较高的效率,便于对生态环境质量进行快速、高频、宏观的监测;冯权尧等^[6]基于 GEE 云平台利用 Sentinel-1 SAR 和 Sentinel-2 影像的光谱、纹理和极化特征研究了 2021 年黄淮海平原冬小麦的空间分布信息,对比了决策树、朴素贝叶斯、支持向量机和随机森林算法的分类结果,发现随机森林是 4 种机器学习算法中识别精度最高的分类器。上述研究证实了 GEE 平台在土地利用信息提取中的有效性。

在土地利用分类的基础上,利用分形理论计算分形维数及稳定性指数是土地利用空间结构研究的核心内容,其通过研究具有自相似结构的物体和空间,为地理学领域的土地利用空间结构研究提供了新的思路和方法。国内外学者基于分形理论对土地利用空间结构进行了大量研究,如 Fernandez-Martinez 和 Sánchez-Granero^[7]对分形维数的豪斯多夫理论进行了适当的离散化,建立了新的模型,进而计算了广义分形空间上子集的分形维数;Purevtseren 等^[8]运用分形几何学的数学程序和地理信息系统(GIS)的城市分析描述了乌兰巴托市的土地使用情况,并使用面积和周长的指数关系衡量了城市的蔓延情况。部分学者从流域和城市的视角进行了研究,例如,李斌斌等^[9]建立了流域像元尺度的栅格结构数字植被模型,并逐个计算得到各子流域植被格局分形维数;张荣天^[10]利用分形理论和 GIS 空间分析方法,探讨了镇江市土地利用空间结构特征;Yu 等^[11]利用 GIS 数据研究了伦敦地区在城市和街区范围内的构成和配置异质性,揭示了土地覆盖和邻里类型的主要长度尺度以及

具有最大信息增益的分辨率;吴涟敏等^[12]在 RS、GIS 和统计分析工具的支持下,运用分形理论研究时间序列上土地利用类型形态的复杂度与结构的稳定度,分析了土地利用空间格局的变化,从而阐述了不同土地利用类型的空间分布规律。

黄河三角洲是我国主要江河三角洲中最具重大保护价值的生态区域,其开发建设一直得到国内外广泛关注和支持^[13]。然而,在黄河三角洲地区,由于历史原因、经济发展不平衡等因素,土地利用结构存在明显的不均衡现象,导致土地资源的不合理配置,造成不同类型的土地利用之间可能存在竞争和冲突,势必通过科学合理的规划和管理才能实现土地利用的协调和可持续发展^[14]。因此,分析黄河三角洲生态功能保护区的土地利用空间结构变化具有重要意义。目前尽管有部分研究利用分形理论对城市空间结构及演变进行了分析,然则从生态功能保护区的视角对土地利用和分形理论两个领域交叉点的学术研究却较少,尤其是对黄河三角洲生态功能保护区的研究更是缺乏。另外,目前的研究时间尺度集中在 20 年以内,研究方法绝大多数采用的是传统的土地利用分类方法。

因此,本研究以黄河三角洲国家级生态功能保护区为例,采用随机森林分类方法对该区 1985—2020 年的土地利用类型进行划分,在此基础上利用分形理论方法计算土地利用分形维数和稳定性指数,分两个阶段定量讨论研究区近 35 年土地利用空间结构的复杂性和稳定性并分析其成因,以促进研究区土地资源的可持续利用,更好地理解人类活动和自然环境之间的相互作用,为土地管理、城市规划、生态保护等提供重要的理论和实践指导。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

黄河三角洲是指黄河河口处形成的三角形河口平原,位于中国华北平原的东南部,如图 1 所示。黄河三角洲生态功能保护区的地理坐标范围为 37°27'30"N ~ 38°37'30"N, 118°24'E ~ 119°09'E,可大致以东营市黄河入海口为中心,向东至黄河出海口、胶东湾,向北至黄河主干,向西至东营市区、垦利区,形成了一个广阔而独特的地理区域。该地区的总面积约 1.15 万 km²,主要由三角洲前缘平原和黄河临海滩涂两部分组成^[15],地形较为平坦,土层深厚,土壤肥沃,水系复杂,生态系统丰富多样。保护区致力于改善湿地生态环境,保障水资源,保护和繁衍当地

的濒危物种，促进土地的可持续利用，以及促进区域生态系统的健康发展^[16]。该地区拥有成百上千的港

口和码头，是我国重要的贸易和通信中心之一，对全国的经济的发展起着重要的支持和推动作用^[17]。

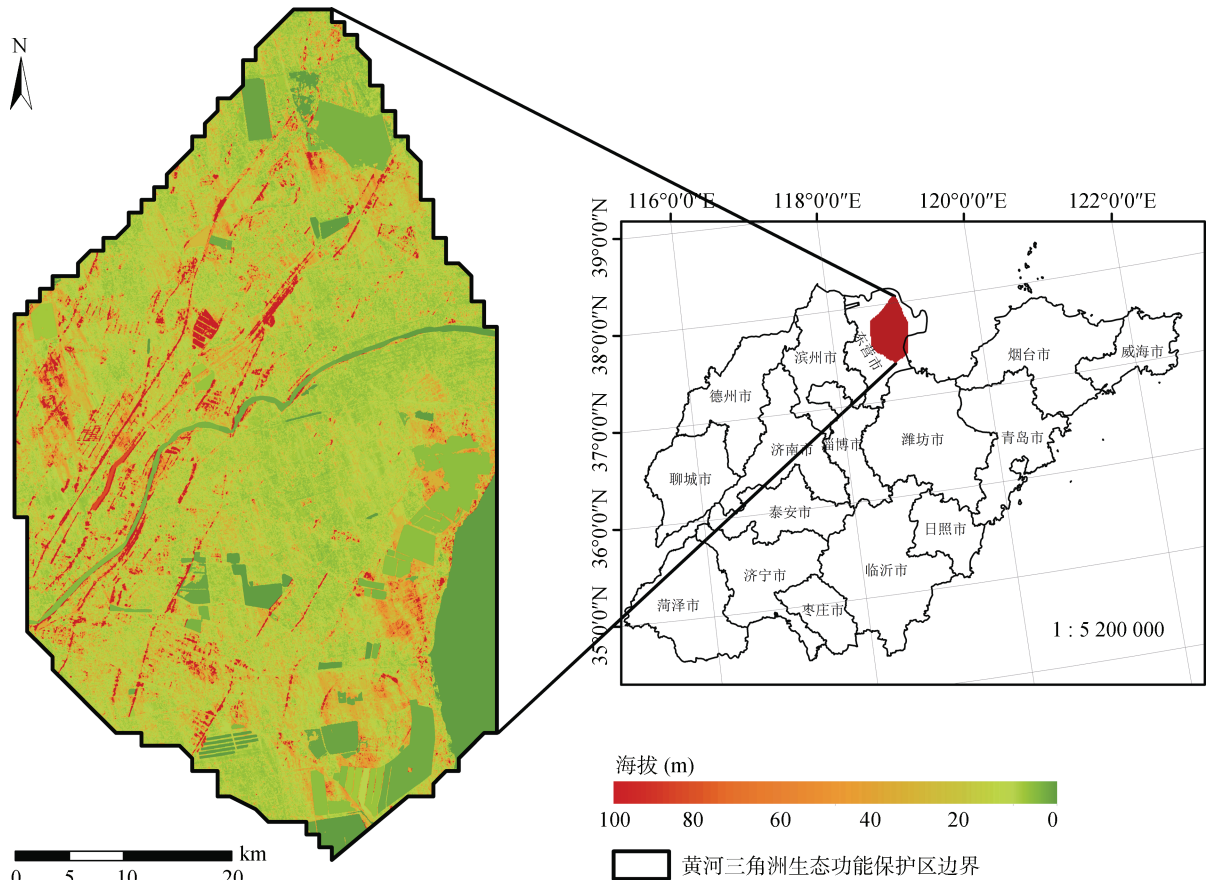


图 1 黄河三角洲生态功能保护区区位示意图

Fig. 1 Location of Ecological Function Reserve in Yellow River Delta

1.2 数据来源

本研究选取 1985—2020 年的原始遥感影像来自美国地质调查局(<https://www.usgs.gov/>)，传感器包括 Landsat-5 MSS/TM、Landsat-7 ETM+、Landsat-8 OLI/TIRS，由罗切斯特理工学院(RIT)和美国国家航空航天局(NASA)喷气推进实验室(JPL)采用单通道算法创建，T1 等级数据具有良好的辐射特征，并且在不同

的 Landsat 传感器之间进行了相互校准，并被认为适合于时间序列分析。DEM 数据来自 NASA(<https://lpdaac.usgs.gov/>)发布的 NASADEM，其是对 STRM 数据的再处理，通过纳入 ASTER GDEM、ICESat GLAS 和 PRISM 数据集的辅助数据，最重要的处理改进涉及通过改进相位解包和使用 ICESat GLAS 数据进行控制来减少空隙，提高了精度。具体数据如表 1 所示。

表 1 数据集来源及参数

Table 1 Sources and parameters of dataset used

数据集	GEE ID	数据提供方	时间段/年	空间分辨率(m)
Landsat-5 地表反射率数据	LANDSAT/LT05/C02/T1_L2	USGS/RIT/JPL	1984—2011	30
Landsat-7 地表反射率数据	LANDSAT/LE07/C02/T1_L2	USGS/RIT/JPL	2012	30
Landsat-8 地表反射率数据	LANDSAT/LC08/C02/T1_L2	USGS/RIT/JPL	2013—2020	30
NASADEM	NASA/NASADEM_HGT/001	NASA/USGS/JPL-Caltech	2000	30

1.3 研究方法

1.3.1 基于 GEE 的土地利用分类 在确定土地利用类型的种类和分类编码情况时，需要保证划分后的

土地类型是相互独立且标准化的，针对黄河三角洲生态功能保护区缺乏林地的实际，参考自然资源部发布的最新标准 GB/T 21010—2017《土地利用现状分类》^[18]，

将该区域一级地类设置设为 5 类: 耕地、草地、水体、裸地、建筑物(不透水面)。

在 GEE 平台上, 利用随机森林算法进行土地利用分类, 其流程主要包括以下 5 个步骤: 数据获取、

数据处理、随机森林模型训练、分类结果生成以及结果评估。在 GEE 中, 可以使用随机森林分类器 API 对影像进行分类, 该 API 提供了一种灵活且高效的分类器实现方式, 分类框架如图 2 所示。

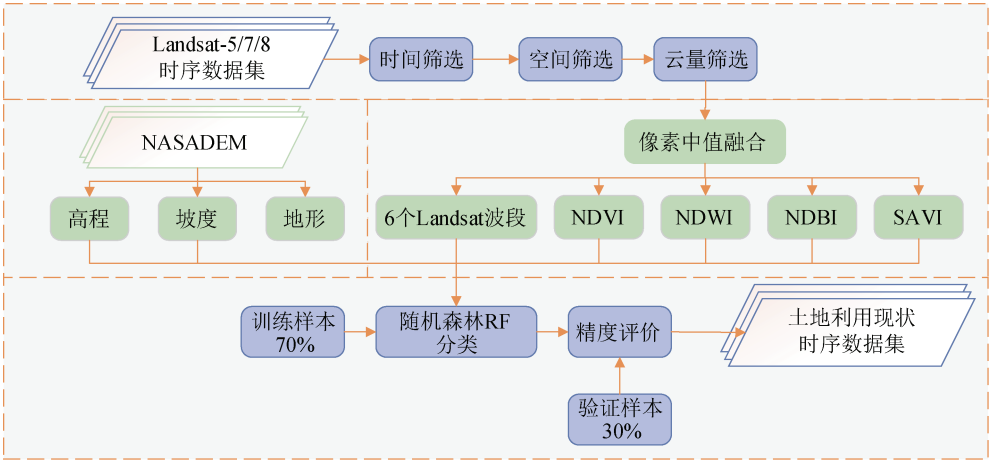


图 2 基于随机森林算法的土地利用分类框架
Fig. 2 Framework of land use classification based on random forest algorithm

本研究经云量筛选(覆盖率<10%)后, 选择每年 5—9 月作为影像选择的时间窗口。在目标年时间窗口中, 筛选、去除云层和修复 Landsat 数据, 并使用中位数合成方法合成研究区域的年度影像。除了 Landsat 本身的 6 个波段(蓝、绿、红、近红外、短波红外 1、短波红外 2), 高程、坡度、NASADEM 地形多样性数据和 4 个遥感指数(归一化建筑指数 NDBI、归一化水体指数 NDWI、土壤调节植被指数 SAVI 和归一化植被指数 NDVI)被加入年度分类的特征集中。为进一步优化分类结果, 本研究对每一年进行了 10 次分类, 并将它们的众数合成。然后, 在时间序列的分类结果中, 使用众数时间滑动窗口(5 年)进一步调整数据集的时间一致性。滑动窗口会将焦点年度的土地类别标签更新为时间窗口内所有类别标签的众数值。通过这些有效的分类和优化策略, 最终, 本研究生成了一套连续的黄河三角洲生态功能保护区空间分辨率为 30 m 的年度土地利用/覆被数据集。

在精度评价方面, 本研究选取 Kappa 系数和总体精度(Overall accuracy, OA)作为评价指标^[19]。总体精度是指被正确分类的总像元数与像元总数的比值, 像元总数等于所有地类分类后的像元总和, 被正确分类的像元为混淆矩阵的对角线对应的数值, 计算公式为:

$$OA = \frac{\sum_{i=1}^n P_{ii}}{S} \quad (1)$$

式中: n 为行列数; P_{ij} 为第 i 行、第 j 列的元素; S

为元素总和。

从公式(1)可以看出, 总体精度的计算仅依靠混淆矩阵的对角线元素, 无法全面衡量分类器的性能, 因此, 需要引入一种利用混淆矩阵所有元素来评价分类器性能的指标, 即 Kappa 系数, 计算公式为:

$$Kappa = \frac{S \cdot \sum_{i=1}^n P_{ii} - \sum_{i=1}^n (P_{i+} + P_{+j})}{S^2 - \sum_{i=1}^n (P_{i+} + P_{+j})} \quad (2)$$

式中: n 为行列数; P_{ij} 为第 i 行、第 j 列的元素; P_{i+} 为行求和; P_{+j} 为列求和; S 为所有元素的和。Kappa 系数的取值位于 $-1 \sim 1$, 通常大于 0, 其大小与分类器性能的对对应关系如表 2 所示。

表 2 Kappa 系数与分类质量的对应关系
Table 2 Correspondence of Kappa coefficient to classification quality

Kappa 系数	分类器性能
Kappa<0	极差
0≤Kappa<0.2	差
0.2≤Kappa<0.4	一般
0.4≤Kappa<0.6	好
0.6≤Kappa<0.8	很好
0.8≤Kappa<1	极好

1.3.2 土地利用转移矩阵计算 土地利用转移矩阵是指一种用于描述土地利用变化和演变的数学模型, 作为 CA-MarKov 模型预测分析的前期基础^[20],

通过对空间分布的土地利用类型进行调查与监测,可以得到不同时期的土地利用现状图。然后,通过对比不同时期的土地利用现状图,可以获得不同时期之间的土地利用变化。转移矩阵是一个 $n \times n$ 正方形矩阵,每一个元素 P_{ij} 即代表土地利用类型 i 向土地利用类型 j 转移的面积。本文选择 Origin 2022 绘制得到土地利用转移图。

1.3.3 分形维数和稳定性指数统计 分形维数是一个对于复杂几何体的量度,它的意义在于测量表征物体的复杂性^[21]。分形维数可以被理解为是对于一个离散集合(如曲线或图案)中所有点的密度的量度。具体地讲,分形维数是可用于度量镶嵌形状的可度量参数,这个可度量参数被称作分形维数。分形维数概念最早由 Mandelbrot 和 Van Ness^[22]在 1967 年提出,其首先基于柯赛和定理中弗拉克图形的概念,提出了分形维数,其本质就是用分形维数计算具有自相似性质的复杂几何形状的维数。自相似性是指物体在不同大小的比例下,其形态和结构仍然相似。本研究,将分形维数作为土地利用结构特征的一种定量指标,通过每一地类使用一种封闭的多边形斑块,并对其核心面积和边界曲折进行定量的描述^[23]。

Mandelbrot 和 Van Ness^[22]通过分析分形几何体结构形态构建了以下模型:

$$[S(r)]^{1/D} \sim [V(r)]^{1/3} \quad (3)$$

式中: $V(r)$ 代表体积; $S(r)$ 代表面积; r 代表度量尺度; D 代表分形维数。

董连科^[24]在公式(3)的基础上提出了适用于计算 n 维欧氏空间的分形维数公式:

$$[S(r)]^{1/D_{n-1}} = kr^{(n-1-D_{n-1})/D_{n-1}} [V(r)]^{1/n} \quad (4)$$

式中: 当 $n=2$ 时,即可研究二维空间中分形维数和周长与面积的关系。

对公式(4)两边同时取对数,得到双对数回归模型:

$$\ln[A(r)] = \frac{2}{D} \ln[P(r)] + C \quad (5)$$

式中: D 代表土地利用结构的分形维数,即分维值; $A(r)$ 代表图斑的面积; $P(r)$ 代表图斑的周长; r 代表空间测定尺寸; C 为常数。

本研究采用双对数回归分析的方法,利用 R 语言将各土地利用类型斑块的周长和面积数据建立公式(5)所示的回归模型,通过回归系数计算分形维数 D 。 D 的取值范围为[1, 2],其大小可以反映研究区土地利用结构的稳定程度和复杂强度, D 值越大,复杂

度越高,图斑的形状越无规律。 D 值越接近 1.5,稳定性越低,类似于分子运动越强烈,由此可以构建土地利用稳定性指数 M :

$$M = |1.5 - D| \quad (6)$$

式中: M 的取值范围为[0, 0.5], M 值越大表明土地利用类型越脱离随机状态,稳定性越高, M 值越小则相反。 M 值的变化可以反映研究区土地利用空间结构的变化趋势,故可用来预测未来的土地利用结构。

2 结果与分析

2.1 土地利用状况及精度评价

如表 3 所示,在精度评价方面,选择 70% 的样本进行训练, 30% 的样本用于精度检验。经统计,历年的土地利用分类总体精度均在 85% 以上, Kappa 系数均在 0.8 以上,经目视判读,低覆盖度的草本植物因光谱特征与收获后的农田相似,使得耕地容易被误分类为草地。基于不同的特征进行随机森林分类的 Kappa 系数均大于 0.8, OA 均在 80% 以上,说明分类器性能极好,其中分类方案 3 的精度最好, Kappa 系数为 0.83, OA 为 87%,故选择此方案进行土地利用分类。

表 3 不同特征组合下随机森林分类精度评价
Table 3 Accuracy assessment of random forest classification under different feature combinations

分类方案	组合特征	OA(%)	Kappa
1	波段特征+遥感指数	83	0.80
2	波段特征+地形因子	84	0.82
3	波段特征+遥感指数+地形因子	87	0.83

本研究选取黄河三角洲生态功能保护区 1985—2020 年 5—8 月的遥感影像进行土地利用分类。为了更好地突出植被, QA 波段标记了 Landsat 影像云及其阴影的信息,用于去云处理。土地利用分类结果如图 3 所示。由图 3 可以看出,土地利用分类结果基本符合黄河三角洲生态功能保护区的实际,建筑物主要分布在南部东营市区、西南部垦利区以及北部的仙河镇;河流为中部穿过的黄河,较大的水库主要有:广南水库、广北水库、永镇水库、孤河水库、孤东水库、孤北水库等;耕地沿黄河两岸大致呈对称分布,这与引黄河水进行灌溉密不可分;裸地绝大部分分布在北部神仙沟地区以及保护区东南部,沿着莱州湾,北至大汶流海堡,南抵南海铺,呈月牙形状分布。

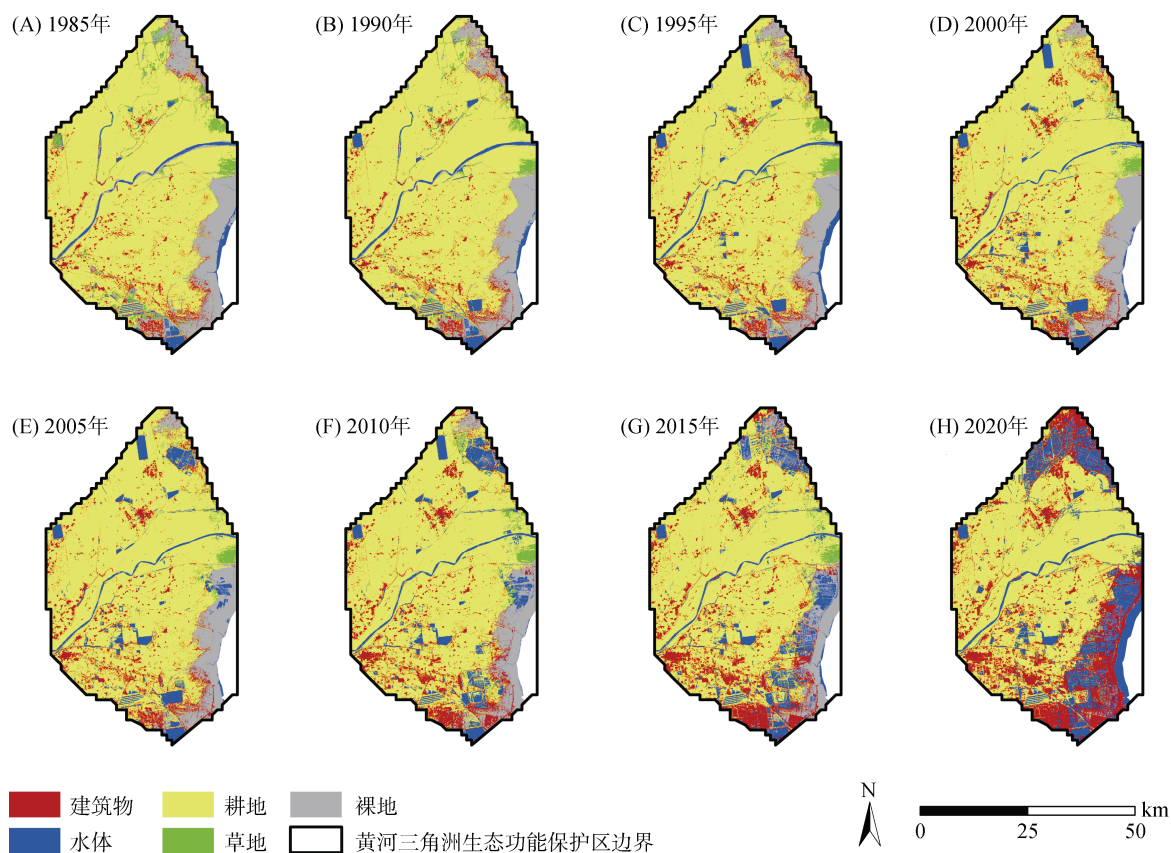


图 3 1985—2020 年研究区土地利用分类结果

Fig. 3 Results of land use classification from 1985 to 2020 in study area

如图 4 和表 4 所示,黄河三角洲地势平坦,土地肥沃,适宜农业生产,因此,农业占据了这一地区绝大部分的土地利用面积。河口三角洲地区的水系非常发达,河流纵横交错。这一特征既为农田提供了灌溉水源,也为当地生态系统的形成提供了便利。35 年来,水体面积逐步扩大,2015—2020 年增长率达 60%。2008—2015 年,山东连续推行黄河三角洲湿地和刁口河生态补水项目,持续补水 3.8 亿 m^3 ,推动了湿地植被的顺向演变,鸟类栖息地面积逐渐恢复。2018—2019 年,河道外生态式引水 5.26 亿 m^3 ,着重保护黄河三角洲湿地,保障了滨州重盐碱地区的生态补水。2005 年之前,耕地面积无显著变化,维持在 1 750 km^2 ; 2005—2020 年,耕地面积急剧下降,减少了约 300 km^2 。草地面积降低速率缓慢,约占总面积的 2.9%。建筑物面积大致呈指数增长,主要集中在东营市区和莱州湾地区。裸地面积在 2015—2020 年骤降 150 km^2 ,表明黄河三角洲实行生态保护的成果显著,这与当地 2017 年实施创新驱动发展战略、新旧动能转换和深化体制改革政策密不可分^[25]。

2.2 土地利用转移分析

某些现象可能在长时间范围内经历多个阶段性

的变化和发展,具有一定的非线性性质,忽略其中的变化和演变过程,将长时序研究分成两个阶段可以更好地捕捉变化的轨迹和模式,有助于理解现象或事件

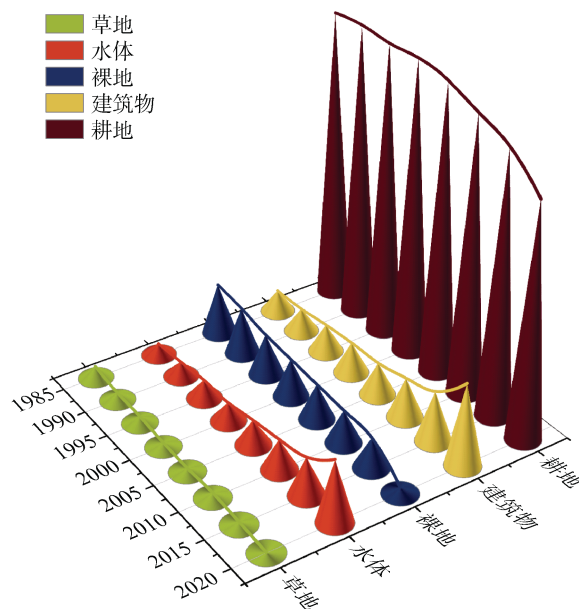


图 4 1985—2020 年研究区土地利用面积变化

Fig. 4 Area changes of land use types in study area from 1985 to 2020

的发展趋势和变化机制。为了便于分析，本文以 15 年为间隔，将 1985—2020 年分成两个阶段：1985—2005 年为第一阶段，2005—2020 年为第二阶段。两个阶段的土地利用类型转移如图 5 所示。

表 4 1985、2005、2020 年研究区土地利用状况
Table 4 Status of land use types of study area in 1985, 2005 and 2020

土地利用类型	年份	斑块数	斑块周长(km)	斑块面积(hm ²)	平均斑块面积(hm ²)	面积占比(%)
耕地	1985	973 4	8335.7	179 180.45	18.41	74.40
	2005	10 981	10 315.59	178 563.23	16.26	74.15
	2020	21 024	11 137.57	145 160.35	6.90	60.28
草地	1985	9 629	2 955.28	7 608.25	0.79	3.16
	2005	4 039	932.05	2 290.81	0.57	0.95
	2020	1 176	225.23	275.5	0.23	0.11
水体	1985	1 309	900.36	7 499.2	5.73	3.11
	2005	3 471	2 042.04	16 206.31	4.67	6.73
	2020	7 711	5 857.44	39 411.69	5.11	16.37
裸地	1985	8 560	4 491.24	3 241.9	3.79	13.46
	2005	7 241	2 994.93	22 910.56	3.16	9.51
	2020	15 646	3 164.54	3 902.9	0.25	1.62
建筑物	1985	28 284	7 171.54	14 121.85	0.50	5.86
	2005	28 678	8 436.73	20 845.01	0.73	8.66
	2020	20 867	11 211.94	52 066.31	2.50	21.62
合计	1985	57 516	23 854.12	240 821.65	4.19	100.00
	2005	54 410	24 721.34	240 815.92	4.43	100.00
	2020	66 424	31 596.72	240 816.75	3.63	100.00

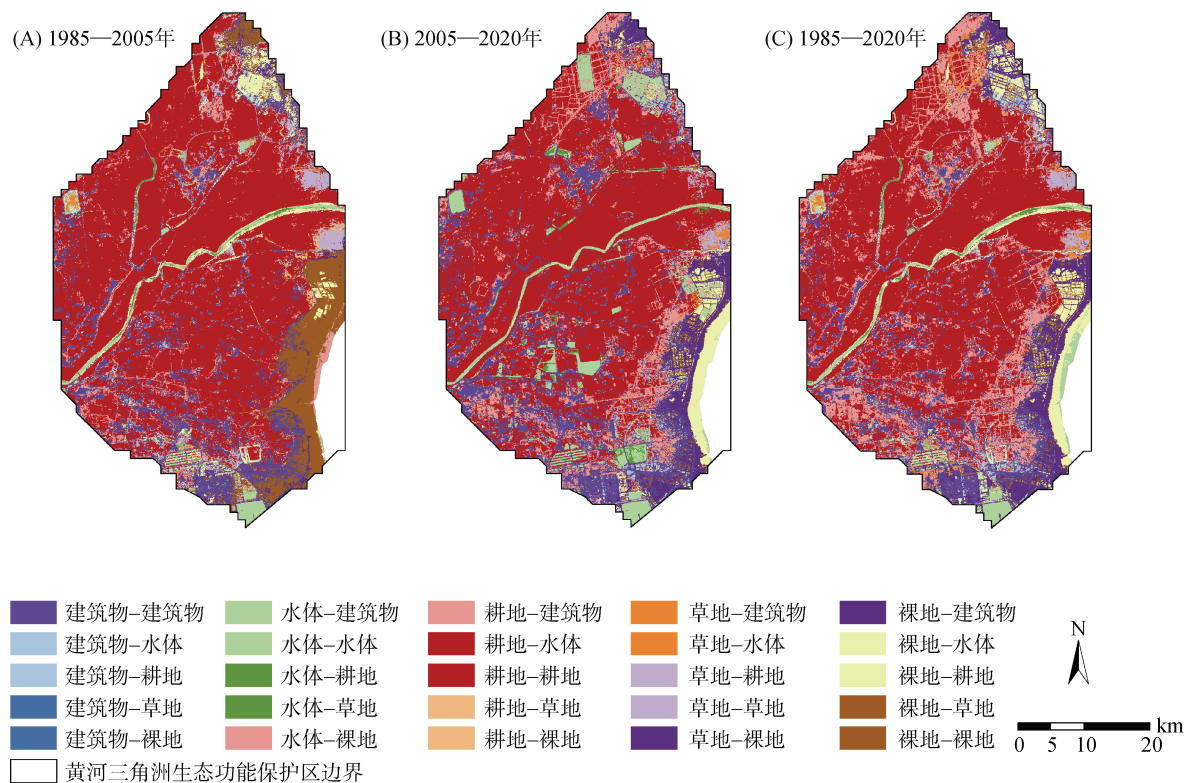


图 5 1985—2020 年研究区土地利用类型转移情况
Fig. 5 Transfer among land use types from 1985 to 2020 in study area

为定量研究黄河三角洲生态功能保护区各个时期土地利用的定量转移情况,分别构建 1985—2005

年、2005—2020 年和 1985—2020 年的转移矩阵,研究区土地利用定量转移关系如图 6 所示。

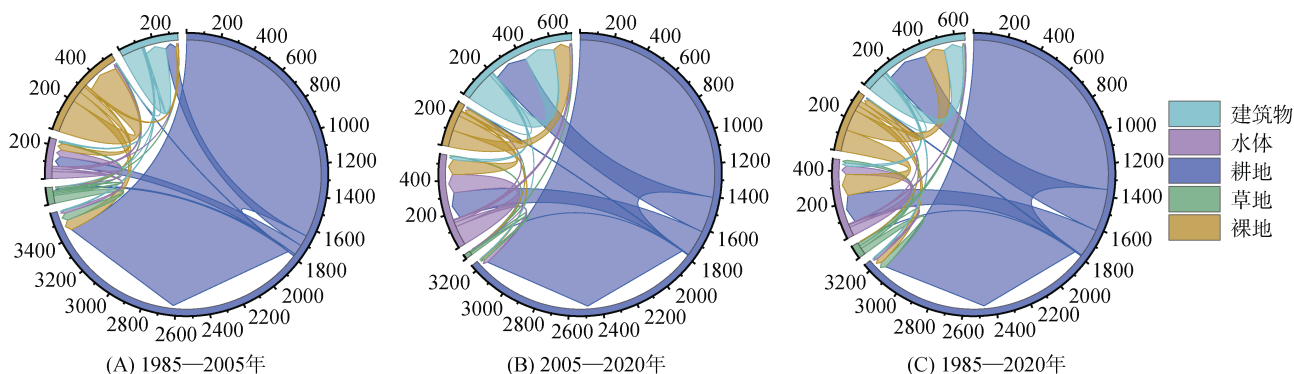


图 6 三个时期研究区土地利用转移矩阵(km²)

Fig. 6 Transfer matrix of land use types in three periods in study area

由图 5 和图 6 可知,第一阶段:1985 年,黄河三角洲生态功能保护区的耕地占据了绝对的优势地位,占全部土地利用面积的 66.5%。同时,裸地也占了相当一部分比例,约 18.3%,而草地面积约占 10.2%,水体和建筑物面积分别为 4.1% 和 0.9%。综合来看,农业生产和城市建设在当时占据了绝对主导地位。2005 年,耕地、草地以及水体和建筑物面积均有所增加,而裸地的面积则有所减少,水体和建筑物 50% 左右由耕地转化而来,耕地面积增加的部分主要来自裸地和草地。第二阶段:2020 年,研究区耕地面积相比 2005 年有所减少,主要转移成水体和建筑物。而草地和水体的面积增加较为明显,分别增加了 1.5 倍和 2.7 倍。建筑物面积也继续快速增长,从 2005 年的 208.45 km² 增加到了 520.66 km²。裸地面积则降至 39.03 km²,与 1985 年相比,降幅达到了 87.96%。上述变化说明城市化和经济发展的推进对土地利用的影响逐渐显现。这一结论与王永丽等^[26]的研究结论一致。

2.3 分形维数和稳定性指数时空变化

利用 GIS 计算 1985、2005、2020 年各地类图斑的面积和周长,利用 R 语言建立双对数回归模型,将面积和周长取自然对数,分别作为 Y 轴和 X 轴,将散点拟合关于面积-周长的线性函数,得到判断系数 R^2 和斜率 $2/D$,进而得到分形维数 D 的数值,如表 5 所示。从表 5 中可以看出,各地类及总体的 R^2 检验值均大于 0.96,说明拟合效果较好,表明研究区各用地类型的面积-周长显著线性相关,分形维数具有代表意义。研究区各地类总体分形维数和稳定性指数在第一和第二阶段的变化趋势相同,分形维数均呈现降-增趋势,稳定性指数均呈现增-降趋势,且变化率均有明显降低。

对于耕地,如表 5 所示,1985 年,研究区的总分形维数为 1.216,而耕地的分形维数为 1.223,略高于总体水平;稳定性指数为 0.277,低于总体水平,表明相对于其他土地利用类型,耕地形态较为简单,但不够稳定。2005 年,从总体分形维数 1.182 开始,耕地的分形维数下降至 1.206,稳定性指数上升至 0.294,从而实现了稳定性方面的提高。至 2020 年,虽然耕地的分形维数略有上升(1.207),但稳定性指数也略有下降(0.293),表明在当前的土地政策下,研究区的耕地可能出现了一些相对不稳定的情况。究其原因,20 世纪 80 年代末至 90 年代初,我国政府逐步实行了一系列耕地保护政策,以鼓励开垦荒地和草地,用于增加耕地供给^[27]。这一政策的影响是,相比之前的情况,1985 年耕地的分形维数略高,而稳定性指数较低,而 2005 年稳定性指数的提高可能与政府进一步加强耕地保护有关^[28]。

对于草地,1985 年,草地的分形维数为 1.229,略高于总体分形维数,而稳定性指数为 0.271,略低于总体稳定性指数(表 5),表明草地的形态相对较为复杂,较不稳定。2005 年,草地的分形维数下降至 1.168,稳定性指数上升至 0.332,形态变得更简单,稳定性更高。至 2020 年,草地的分形维数又上升至 1.230,但其稳定性指数下降至 0.270,表明草地变得更为复杂,稳定性下降。究其原因,2000 年以后,中国的城市化进程加速,推动城市建设和新型城镇化等政策不断推进。城市化的进程导致了大量的草地消失,草地面积受到了很大程度的压缩。而对草地的保护在一定程度上又取决于草原法的修订、地方政府和政府部门具体的政策和实践^[27]。这种政策的影响可能导致了 2020 年草地变得更为复杂,不够稳定。

表 5 1985、2005、2020 年各地类的分形维数和稳定性指数
Table 5 Fractal dimension and stability index for each land use type in 1985, 2005 and 2020

土地利用类型	年份	周长-面积关系式	判断系数 R^2	2/D	分形维数 D	分形维数变化 ΔD	稳定性指数 M	稳定性指数变化 ΔM
耕地	1985	$\ln Y = 1.635 \ln X - 1.157$	0.969 0	1.635	1.223		0.277	
	2005	$\ln Y = 1.658 \ln X - 1.291$	0.969 3	1.658	1.206	-0.017 0	0.294	0.017
	2020	$\ln Y = 1.657 \ln X - 1.263$	0.966 5	1.657	1.207	0.000 7	0.293	-0.001
草地	1985	$\ln Y = 1.627 \ln X - 1.112$	0.970 2	1.627	1.229		0.271	
	2005	$\ln Y = 1.712 \ln X - 1.572$	0.967 1	1.712	1.168	-0.061 0	0.332	0.061
	2020	$\ln Y = 1.626 \ln X - 1.084$	0.962 3	1.626	1.230	0.061 8	0.270	-0.062
水体	1985	$\ln Y = 1.659 \ln X - 1.295$	0.980 9	1.659	1.206		0.294	
	2005	$\ln Y = 1.704 \ln X - 1.511$	0.978 6	1.704	1.174	-0.031 8	0.326	0.032
	2020	$\ln Y = 1.674 \ln X - 1.289$	0.976 5	1.674	1.195	0.021 0	0.305	-0.021
裸地	1985	$\ln Y = 1.559 \ln X - 0.731$	0.973 1	1.559	1.283		0.217	
	2005	$\ln Y = 1.623 \ln X - 1.095$	0.967 2	1.623	1.232	-0.050 6	0.268	0.051
	2020	$\ln Y = 1.628 \ln X - 1.090$	0.962 5	1.628	1.229	-0.003 8	0.271	0.004
建筑物	1985	$\ln Y = 1.691 \ln X - 1.466$	0.970 1	1.691	1.183		0.317	
	2005	$\ln Y = 1.714 \ln X - 1.609$	0.974 5	1.714	1.167	-0.015 9	0.333	0.016
	2020	$\ln Y = 1.700 \ln X - 1.518$	0.974 1	1.700	1.176	0.009 6	0.324	-0.010
合计	1985	$\ln Y = 1.645 \ln X - 1.216$	0.970 3	1.645	1.216		0.284	
	2005	$\ln Y = 1.692 \ln X - 1.481$	0.972 7	1.692	1.182	-0.033 8	0.318	0.034
	2020	$\ln Y = 1.679 \ln X - 1.371$	0.973 3	1.679	1.191	0.009 2	0.309	-0.009

对于水体，1985 年，水体的分形维数为 1.206，略低于总体分形维数，而稳定性指数为 0.294，高于总体稳定性指数(表 5)，表明水体的形态相对简单，稳定性高。2005 年，水体的分形维数下降至 1.174，稳定性指数上升至 0.326，表明水体形态更为简单，稳定性得到了提高。至 2020 年，水体的分形维数略升至 1.195，稳定性指数又下降至 0.305，表明水体的形态复杂度略微上升，稳定性略有下降。究其原因，在过去几十年中，中国的环保政策日益完善，合理利用水资源、保护水体生态环境成为政府工作的重点^[29]。在一定程度上，环保政策和水土保持政策的实施改善了水体的形态和稳定性。

对于裸地，1985 年，裸地的分形维数为 1.283，高于总体分形维数，而稳定性指数为 0.217，远低于总体稳定性指数(表 5)，表明裸地形态非常复杂，且稳定性较差。2005 年，裸地的分形维数下降至 1.232，稳定性指数上升至 0.268，表明裸地的形态变得更为简单，稳定性得到了提高。至 2020 年，裸地的分形维数和稳定性指数分别为 1.229 和 0.271，相比 2005 年基本没有变化。究其原因，自 20 世纪 90 年代以来，我国的生态保护意识日益增强，不断加强对裸地的治理和保护。草原退化防治、退耕还林还草、荒漠化防治和水土保持四大工程的实施均为解决裸地问题

提供了帮助^[27]。

对于建筑物，表 5 数据显示，1985 年，建筑物的分形维数为 1.183，略低于总体分形维数，而稳定性指数为 0.317，高于总体稳定性指数，表明建筑物的形态相对较为简单，稳定性高。2005 年，建筑物的分形维数下降至 1.167，稳定性指数上升至 0.333，表明建筑物的形态变得更为简单，稳定性得到了提高。至 2020 年，建筑物的分形维数又上升至 1.176，但稳定性指数又下降至 0.324，表明建筑物的形态复杂化程度较 2005 年有所上升，同时稳定性也略有下降。究其原因，在 2000 年之后中国城市化进程加速推进，建设政策也发生了变化，导致建筑用地大量增加，进而导致土地的不稳定性进一步提高^[27]。与此同时，当地有关部门出台了一系列环境保护政策，这些政策有助于改善水体和草地的稳定性，但可能也会对耕地和建筑用地产生负面影响^[29]。

3 讨论

分形维数及稳定性指数的研究前提是较好的土地利用分类结果，所以对遥感影像数据源及分类方法和精度的要求很高，单期影像虽然可以满足云量低的要求，但不可避免地会存在像元异常值的问题。与其他仅使用单期影像的分类研究相比^[30]，本研究基于

GEE 平台, 利用中值合成算法去除同年份多期影像像元异常值, 提高了 1985—2020 年 Landsat-5(TM)、Landsat-7(ETM)和 Landsat-8(OLI)的长时间影像序列的质量。与其他研究仅使用影像本身的波段相比^[31], 本研究还引入了 4 种遥感指数和 3 种地形因子, 分类的总体精度由 80% 提高到 85%。

对比其他相关研究, 本研究的时间尺度较长, 能够更好地反映该地区土地利用空间结构的变化特征。1985 年, 黄河三角洲生态功能保护区的耕地占据了绝对的优势地位, 占到了全部土地利用面积的 66.5%。2005 年, 耕地、草地以及水体和建筑物面积均有所增加, 而裸地的面积则有所减少。2020 年, 耕地面积相比 2005 年有所减少, 主要转移成了水体和建筑物。综合来看, 随着城市化和经济发展的推进, 土地利用发生了一定的变化, 农业生产逐渐向城市化方向转变。这些变化反映了土地利用结构的变化趋势, 这与陈雪萍等^[32]、周建等^[33]的研究基本一致。

相比于流域尺度和城市尺度的研究视角, 本研究从生态保护区的视角结合分形理论研究了土地利用空间结构变化。研究区总体的分形维数在第一、二阶段的变化量分别是 -0.033 8 和 0.009 2, 稳定性指数的变化量分别是 0.034 和 -0.009, 表明两结果能较好地互相吻合, 说明研究区的土地利用空间结构趋于稳定, 土地利用类型之间的关联性变弱, 土地利用类型之间的替代程度变高。这与陆智博等^[17]的研究结果基本一致。

本文仅通过分形维数和稳定性指数进行分析, 并没有纳入其他景观格局指数, 因此结果可能不够精确和全面。如何综合运用各种指标来分析土地利用空间结构的变化, 以及考虑空间异质性对指数计算带来的影响, 将是本研究后续探讨的一个重要方向。在今后的研究中, 可以考虑研究土地利用变化对生态环境的影响及城市化的空间格局对土地利用类型和空间结构的影响, 既包括城市扩张对农田的压缩, 也包括城市用地的类型和结构演变。

4 结论

本研究基于 GEE 处理平台和随机森林分类方法, 解译并分析了黄河三角洲生态功能保护区 1985—2020 年的离散土地利用。利用 1 250 个样本点对 Landsat 影像进行土地利用分类处理, 结果表明, 分类精度极好, 近 35 年 5 个一级地类的总体精度达 85% 以上, Kappa 精度在 0.8 以上。1985—2020 年, 研究区耕地面积逐渐下降; 草地面积变化较小; 水体面积

扩大, 且增长率在 2015—2020 年比较明显; 裸地面积变化较为剧烈, 先增长后逐渐下降, 最高峰出现在 2005 年, 最低谷出现在 2020 年; 建筑物面积发生了显著变化, 增长率较高。从土地利用转移矩阵来看, 2020 年的耕地和水体 50% 左右的面积由 1985 年的耕地转化而来, 其中水体另一半面积主要来自裸地, 建筑物近 1/4 的面积来自裸地。

黄河三角洲生态功能保护区 1985 年、2000 年和 2020 年土地利用的总分形维数分别为 1.216、1.182 和 1.191, 总体上呈现降低趋势, 说明研究区的土地利用空间结构复杂度降低, 图斑形状越来越规律; 稳定性指数分别为 0.284、0.318 和 0.309, 总体呈升高趋势, 说明研究区空间利用结构稳定性升高。从总体变化可以看出, 土地利用空间结构与当地政策呈正相关, 研究区生态功能愈来愈强大, 空间布局愈来愈合理。其中, 从耕地、水体和裸地的分形维数和稳定性指数可以看出, 空间结构和稳定性朝正向发展, 这与当地耕地保护、水土保持、荒漠化防治政策息息相关。然而, 草地和建筑物的空间结构和稳定性朝负面发展, 相关部门应着手把控城市化进程和加快草地保护的立法进程, 避免两者的无序扩张与收缩, 以推动植被的顺向演变。

参考文献:

- [1] 谢贤健. 基于 GIS 和分形理论的沱江流域土地利用结构动态分析[J]. 土壤, 2023, 55(2): 433–440.
- [2] 浩飞龙, 吴潇然, 关皓明, 等. 基于百度迁徙数据的东北地区城市“层级-网络”结构[J]. 地理科学, 2023, 43(2): 251–261.
- [3] 郝斌飞, 韩旭军, 马明国, 等. Google Earth Engine 在地球科学与环境科学中的应用研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2018, 33(4): 600–611.
- [4] Tassi A, Gigante D, Modica G, et al. Pixel- vs. object-based landsat 8 data classification in google earth engine using random forest: The case study of maiella National Park[J]. Remote Sensing, 2021, 13(12): 2299.
- [5] Yao K X, Halike A, Chen L M, et al. Spatiotemporal changes of eco-environmental quality based on remote sensing-based ecological index in the Hotan Oasis, Xinjiang[J]. Journal of Arid Land, 2022, 14(3): 262–283.
- [6] 冯权尧, 任燕, 姚晓闯, 等. 基于多源光学雷达数据融合的黄淮海平原冬小麦识别[J]. 农业机械学报, 2023, 54(2): 160–168.
- [7] Fernández-Martínez M, Sánchez-Granero M A. Fractal dimension for fractal structures: A Hausdorff approach[J]. Topology and Its Applications, 2012, 159(7): 1825–1837.
- [8] Purevtseren M, Tsegmid B, Indra M, et al. The fractal geometry of urban land use: The case of ulaanbaatar city, Mongolia[J]. Land, 2018, 7(2): 67.

- [9] 李斌斌, 李占斌, 李鹏. 基于 GIS 与 RS 的大理河流域植被格局分形维数时空变化特征[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 173–178.
- [10] 张荣天. 宁镇扬丘陵区土地利用空间结构的分形研究——以镇江市为例[J]. 水土保持研究, 2013, 20(3): 98–103.
- [11] Yu T F, Sützl B S, van Reeuwijk M. Urban neighbourhood classification and multi-scale heterogeneity analysis of Greater London[J]. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 2023, 50(6): 1534–1558.
- [12] 吴涟敏, 廖善刚. 基于 GIS 和分形理论的土地利用空间格局分析——以闽侯县为例[J]. 地球环境学报, 2019, 10(2): 156–165.
- [13] Dong J B, Wu Y, Jin Y, et al. Morphology differences between fractional Brownian motion and the Weierstrass-Mandelbrot function and corresponding Hurst evaluation[J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2023, 9(1): 35.
- [14] 麦丽开·艾麦提, 满苏尔·沙比提, 张雪琪, 等. 叶尔羌平原绿洲土地利用变化及土地生态安全评价研究[J]. 土壤, 2019, 51(4): 795–802.
- [15] 李珊, 杨越超, 姚媛媛, 等. 不同土地利用方式对山东滨海盐碱土理化性质的影响[J]. 土壤学报, 2022, 59(4): 1012–1024.
- [16] 陆蕴青, 向伟, 李敏, 等. 黄土塬区土地利用变化对地表蒸散的影响[J]. 土壤学报, 2023, 60(1): 89–98.
- [17] 陆智博, 宋芊, 赵健赟, 等. 黄河源区 2005—2020 年生态用地格局变化与分异趋势[J]. 水土保持通报, 2022, 42(6): 277–284.
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 土地利用现状分类: GB/T21010—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [19] Yi L N, Zhang G F. Object-oriented remote sensing imagery classification accuracy assessment based on confusion matrix[C]//2012 20th International Conference on Geoinformatics. Hong Kong, China. IEEE, 2012: 1–8.
- [20] 马银, 郑敏睿, 郑新奇, 等. 基于 CA-Markov 和 MSPA 的绿色基础设施预测与时空演变分析——以京津冀城市群为例[J]. 生态学报, 2023, 43(16): 6785–6797.
- [21] 余洁, 石云, 赵娜, 等. 土壤养分的空间变异性研究进展[J]. 山东农业科学, 2023, 55(1): 165–172.
- [22] Mandelbrot B B, Van Ness J W. Fractional Brownian motions, fractional noises and applications[J]. *SIAM Review*, 1968, 10(4): 422–437.
- [23] 蔡俊杰, 李希建, 谢洪高. 基于分形理论的上覆煤岩裂隙发育规律研究[J]. 矿业研究与开发, 2023, 43(1): 109–114.
- [24] 董连科. 分形生长动力学中的两种非线性模型[J]. 地球科学, 1993, 18(1): 95–99, 127.
- [25] 吴春生, 黄翀, 刘高焕, 等. 基于模糊层次分析法的黄河三角洲生态脆弱性评价[J]. 生态学报, 2018, 38(13): 4584–4595.
- [26] 王永丽, 于君宝, 董洪芳, 等. 黄河三角洲滨海湿地的景观格局空间演变分析[J]. 地理科学, 2012, 32(6): 717–724.
- [27] 孔梅, 曹惠明, 高兴国, 等. 黄河三角洲自然保护区国土空间变化遥感监测与评价[J]. 海洋环境科学, 2021, 40(2): 272–276.
- [28] 孙丹丹, 刘学, 杨继松, 等. 黄河三角洲农田退耕年限对土壤不同形态氧化铁含量及其分布的影响[J]. 生态学杂志, 2023, 42(10): 2359–2367.
- [29] 高瑞, 王志勇, 周晓东, 等. 利用多时相遥感监测与分析黄河三角洲湿地变化动态[J]. 测绘通报, 2021(4): 22–27.
- [30] 陈大蓉, 周旭, 胡锋, 等. 近 30 年贵阳市土地利用冲突时空变化分析[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 337–344, 356.
- [31] Zhao X Y, Xia H M, Liu B Y, et al. Spatiotemporal comparison of drought in shaanxi-gansu-ningxia from 2003 to 2020 using various drought indices in google earth engine[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(7): 1570.
- [32] 陈雪萍, 赵学勇, 王瑞雄, 等. 气候变化与土地利用/覆被变化对中国北方农牧交错带水资源影响研究进展[J]. 中国沙漠, 2022, 42(3): 170–177.
- [33] 周建, 张凤荣, 徐艳, 等. 基于降水量与土壤类型的北方农牧交错区土地利用/覆被格局及变化分析——以科尔沁左翼后旗为例[J]. 地理研究, 2017, 36(7): 1210–1222.