

# 2009~2024年黄河三角洲盐碱地生态系统时空演变研究

张恩悦, 吴爽\*, 罗家兴, 李浩, 付青书, 付家和

山东农业工程学院国土资源与测绘工程学院, 山东 济南

收稿日期: 2026年5月11日; 录用日期: 2026年6月16日; 发布日期: 2026年6月30日

## 摘要

本文以黄河三角洲典型区域山东省东营市垦利区为研究区, 基于2009、2015、2020、2024年4期Landsat系列卫星遥感数据, 经辐射定标、大气校正等预处理后, 构建归一化植被指数(NDVI)与归一化盐度差异指数(NDSI)并开展等级划分, 联合野外实地调查与土壤采样验证, 通过双指数耦合分析系统揭示黄河三角洲盐碱地生态系统时空演变规律。结果表明: 2009~2024年, 垦利区植被覆盖度呈显著上升态势, 低、较低植被覆盖区持续缩减, 中、高植被覆盖区大幅扩张, 区域生态质量稳步改善, 植被中高覆盖区(NDVI  $\geq 0.4$ )面积相对2009年增长27.24 km<sup>2</sup>; 土壤盐渍化程度(NDSI)整体下降, 高盐渍化区域面积显著收缩, 极重度盐渍化区(NDSI  $\geq 0.3$ )面积相对2009年缩减约35.43 km<sup>2</sup>, 生态系统向健康、稳定方向演进; 2024年NDVI因春季干旱与寒潮等气候异常出现短期波动, 剔除气候干扰后植被覆盖整体仍呈上升趋势。研究证实, 国家与地方生态保护政策、耐盐碱作物推广、高效农业技术应用及科研技术支撑, 对黄河三角洲盐碱地治理与生态修复具有显著成效, 可为黄河三角洲生态保护修复、盐碱地综合利用与区域可持续发展提供科学依据与数据支撑。

## 关键词

垦利区, 土壤盐渍化, 遥感监测, NDVI, NDSI, 时空演变

## Study on the Spatio-Temporal Evolution of the Saline-Alkaline Ecosystem in the Yellow River Delta from 2009 to 2024

Enyue Zhang, Shuang Wu\*, Jiaying Luo, Hao Li, Qingshu Fu, Jiahe Fu

College of Land Resources and Surveying Engineering, Shandong Agriculture and Engineering University, Jinan Shandong

\*通讯作者。

文章引用: 张恩悦, 吴爽, 罗家兴, 李浩, 付青书, 付家和. 2009~2024年黄河三角洲盐碱地生态系统时空演变研究[J]. 城镇化与集约用地, 2026, 14(2): 149-158. DOI: 10.12677/ulu.2026.142015

## Abstract

This study focuses on Kenli District, Dongying City, Shandong Province—a typical area of the Yellow River Delta. Based on four periods of Landsat satellite remote sensing data from 2009, 2015, 2020, and 2024, after preprocessing including radiometric calibration and atmospheric correction, normalized difference vegetation index (NDVI) and normalized difference salinity index (NDSI) were constructed and classified into levels. Combined with field surveys and soil sampling validation, a dual-index coupling analysis system was used to reveal the spatiotemporal evolution patterns of saline-alkali ecosystems in the Yellow River Delta. Results show that from 2009 to 2024, vegetation cover in Kenli District significantly increased, with low and low-to-moderate coverage areas continuously shrinking while moderate and high coverage zones expanded substantially, indicating steady improvement in regional ecological quality. The area of moderately to highly vegetated regions ( $NDVI \geq 0.4$ ) increased by 27.24 km<sup>2</sup> compared to 2009. Soil salinization levels (NDSI) generally declined, with severely salt-affected areas notably contracting—extremely severe salinized zones ( $NDSI \geq 0.3$ ) decreased by approximately 35.43 km<sup>2</sup> relative to 2009, reflecting an overall shift toward healthier and more stable ecosystems. In 2024, NDVI showed short-term fluctuations due to climatic anomalies such as spring droughts and cold waves; however, after removing climate-induced disturbances, vegetation cover still demonstrated an upward trend. The study confirms that national and local ecological conservation policies, promotion of salt-tolerant crops, application of efficient agricultural technologies, and scientific research support have achieved significant results in managing saline-alkali lands and restoring ecosystems in the Yellow River Delta. These findings provide scientific basis and data support for ecological protection and restoration, comprehensive utilization of saline-alkali land, and sustainable regional development in the Yellow River Delta.

## Keywords

Kenli District, Soil Salinization, Remote Sensing Monitoring, NDVI, NDSI, Spatiotemporal Evolution

Copyright © 2026 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

黄河三角洲处于黄河入海口沿岸地区，地理位置重要、生态环境特殊[1]，因此，黄河三角洲生态环境特别是盐渍化程度评估与治理一直是众多学者的研究重点。黄河三角洲无论是生态保护还是农业开发，都有战略意义。

针对黄河三角洲生态情况估测，本文主要研究对黄河三角洲生态影响最大的盐渍化程度(盐度)和表征整体生态环境质量的植被指数(绿度)评估 2011、2015、2020、2024 春季盐渍高峰期(4月)的生态情况，旨在通过揭示近期黄河三角洲地区生态环境的演变规律，为该地区的生态保护与治理提供科学依据。

### 1.1. 国内外研究现状

盐碱地作为全球广泛分布的脆弱生态系统，其生态演变与治理修复一直是土地资源、生态环境、农业科学领域的研究热点。张胜男(2024)提出融合作物类型和随机森林普通克里金(RFOK)的土壤盐分反演方法，旨在提高土壤盐渍化遥感监测的准确性[2]。刘祖汀针对土壤盐碱改良对地下水环境的影响，研究

了土壤盐碱改良背景下地下水环境的时空演变规律及影响因素与灌溉对地下水离子特征的影响。在此基础上,运用 Visual Modflow 模型建立了研究区的地下水数值模型与地下水预测模型,预测了研究区未来地下水位及不同灌溉水平对研究区地下水位的影响[3]。Li Xiaojie (2022)等基于 1989~2019 年 Landsat 长时序遥感数据,采用像元二分模型与地统计学方法,对吉林省西部盐碱地时空演变特征及其驱动因素进行了系统分析。该研究揭示了该区域 30 年盐碱地扩张与收缩的阶段性规律,并量化了气候因素(降水、蒸发)与人为因素(人口增长、农业开发)的相对贡献度,为内陆盐碱地长时序监测提供了方法参考[4]。

研究多聚焦于干旱半干旱区盐碱地遥感反演、土壤盐渍化驱动机制与生态修复技术研发,依托高分辨率卫星[5]、无人机与地面传感网络,构建了多尺度、高精度的盐渍化监测体系,在长时序生态演变分析与模型模拟方面形成成熟技术框架,但针对黄河三角洲这种河海交汇、海陆交互、新生陆地快速演替的特殊盐碱地生态系统,针对性研究较少,区域适配性不足。围绕黄河三角洲盐碱地开展的探索仍存在三大突出不足:

1) 时间序列偏短:多为单年份或 2~3 年短时序分析,无法完整反映近 15 年生态政策密集落地、治理技术快速迭代下的长期连续演变特征。

2) 监测维度单一:普遍采用 NDVI 或 NDSI 单一指数独立反演,缺少植被绿度与土壤盐度的耦合关联分析,难以揭示植被改善和盐渍化降低的互馈机制。

3) 结果验证不足:多数研究依赖纯遥感反演,缺乏同步野外土壤采样与实地验证,遥感反演精度与结果可靠性受限。

总体而言,现有研究尚未形成针对黄河三角洲 2009~2024 年完整时间窗口、双指数协同监测、遥感反演与地面实测相结合的系统研究体系,研究缺口明显,难以精准支撑新时代黄河三角洲生态保护与盐碱地综合利用的战略需求,亟需开展长时序、多指标、强验证的综合研究以填补空白。

## 1.2. 研究意义与创新性

本研究立足黄河三角洲生态保护国家战略,以垦利区为典型代表,开展 2009~2024 年盐碱地生态系统时空演变研究,核心创新与优势体现在以下方面:

1) 时间序列完整且关键节点明确

选取 2009、2015、2020、2024 年 4 个关键时间节点,四个节点等间隔分布(间隔 5~6 年),既保证时间序列连续性,又避免数据冗余,兼顾政策周期、数据可用性,更贴合区域生态治理成效评估的实际需求。

2) 双指数监测方法更具科学性

创新采用 NDVI (植被覆盖) + NDSI (土壤盐渍化)双指数协同分析,同时量化植被生长状况与土壤盐度变化,建立“植被改善驱动降盐、盐度降低保障植被生长”的互馈关联,比单一指数监测更全面、更系统,能真实反映盐碱地生态系统核心变化逻辑。

3) 遥感与地面实测结合,精度更高

将 Landsat 系列卫星遥感数据与 2024 年春季盐渍高峰期同步野外调查、土壤采样相结合,经数据剔除与验证后保留 41 个有效样点,覆盖全等级盐渍化土壤,有效提升遥感反演准确度,克服纯遥感解译误差大、验证不足的缺陷,结果更具可信度。

4) 区域针对性强,实践价值突出

已有文献针对黄河三角洲垦利区的生态监测多集中于单年份或 2~3 年短时序分析,无法反映近 15 年生态政策密集实施期的长期演变规律;多采用 NDVI 或 NDSI 单一指数独立反演,缺乏植被-土壤协同关联机制揭示。上述三方面局限导致现有研究难以精准评估生态治理成效,无法为新时代盐碱地综合利用提供长时序、多维度、高可信度的科学依据。

本研究聚焦黄河三角洲最具代表性的垦利区，构建“2009~2024 年长时序 + NDVI/NDSI 双指数 + 野外采样验证”的综合监测体系，实现该区域 15 年连续、系统、高精度的生态演变追踪。研究结果可服务于地方生态保护规划、盐碱地改良工程布局、高效农业空间配置，为黄河三角洲盐碱地生态系统长期监测、精准治理、可持续利用提供可复制的方法范式与科学支撑，实践价值突出。

## 2. 材料与方方法

### 2.1. 研究区域概况

本研究以黄河三角洲最具代表性的山东省东营市垦利区作为研究区域，地理位置为北纬 37°24'~38°10'、东经 118°15'~119°19'，总面积约为 2331 km<sup>2</sup>。该区域属于暖温带大陆性季风气候，多年平均气温 12.8℃，年均降雨量 555.9 mm，蒸发量远大于降水量，盐分易升至地表，致使土地盐渍化问题突出[4]。

土地利用以耕地、盐碱荒地、湿地和水域为主。其中，盐碱地(含轻度、中度、重度盐渍化土地)面积约占全区总面积的 60%以上，是黄河三角洲滨海盐碱地的典型代表区域。区内耕地多为中低产田，受土壤盐渍化制约，农作物产量波动较大；未利用盐碱荒地分布广泛，生态修复潜力显著；沿海湿地资源丰富，是东亚 - 澳大利西亚候鸟迁徙的重要停歇地，生态敏感性与保护价值兼具。

垦利区地处黄河现行入海口附近，是黄河三角洲国家级自然保护区的核心组成部分，也是黄河流域生态保护和高质量发展国家战略的关键实施区域。其“河 - 海 - 陆”交互作用强烈，新生陆地持续淤进，土壤盐渍化呈现明显的空间梯度特征(由沿海向内陆逐渐减轻)(图 1)。

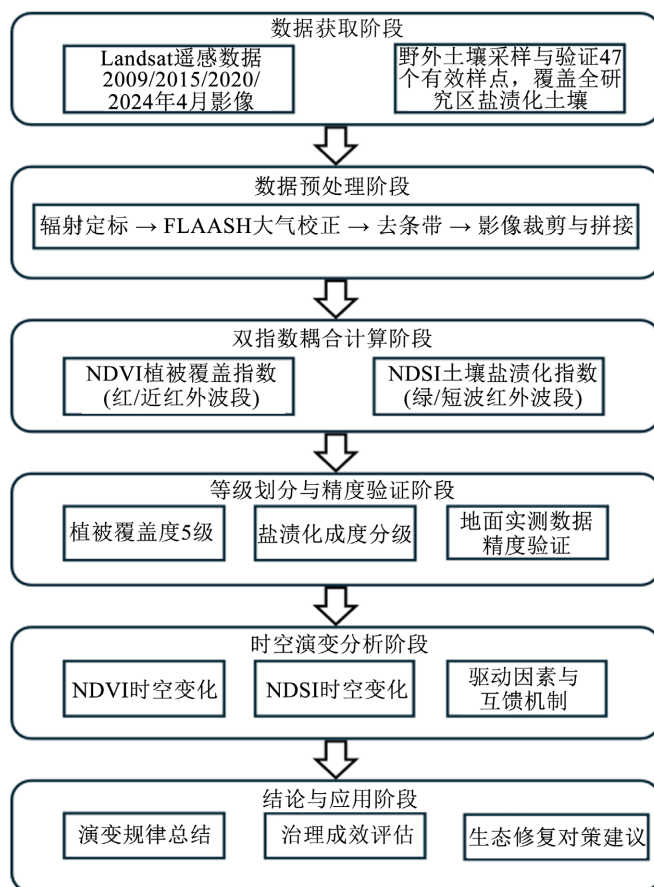


Figure 1. Technology roadmap  
图 1. 技术路线图

## 2.2. 数据处理与预处理

本研究于 2024 年 4 月 1 日进行了野外调查和土壤采样, 共采集表层土样 57 份, 这些样点覆盖全部等级的盐渍化土壤, 剔除后剩余 41 个。遥感数据来自地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>) Landsat 7、Landsat 8 和 Landsat 9 系列卫星公开数据, 具体信息如表 1 所示。数据预处理流程包括: 1) 去条带处理, 采用线性插值法修复 Landsat-7 ETM+ 传感器故障导致的条带缺失, 恢复影像完整性; 2) 辐射定标, 将传感器原始数字量化值(DN 值)转换为大气层顶辐射亮度值, 消除传感器增益差异; 3) FLAASH 大气校正(Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes), 基于 MODTRAN 辐射传输模型去除大气散射与吸收影响, 获取地表真实反射率; 4) 数据裁剪, 以垦利区行政边界为掩膜提取研究区范围, 减少数据量并聚焦目标区域。经预处理后, 影像几何精度优于 1 个像元, 反射率误差控制在 5%以内, 满足长时序对比分析需求。

**Table 1.** Satellite remote sensing data information table

**表 1.** 卫星遥感数据信息表

年份 Year	数据类型 Data type	行列号 Row and column	获取日期 Acquisition date
2009	Landsat-7 ETM+	121/34	Apr-25
2015	Landsat-7 ETM+	121/34	Apr-26
2020	Landsat-8 OLI	121/34	Apr-16
2024	Landsat-9 OLI	121/34	Apr-18

## 2.3. NDVI 与 NDSI 计算

将预处理后的图像进行栅格计算, 得到其 NDVI 和 NDSI。本质是基于遥感波段反射率差异构建的光谱特征量化指标, 通过归一化处理(消除光照、大气等干扰)来定量表征地物的属性或类型, 从而实现对地表特征的快速识别与分析, 红光波段和近红外波段在 Landsat 7、Landsat 8、Landsat 9 所对应的波段如表 2 所示。

**Table 2.** Correspondence table for red (Red) and near-infrared (NIR) bands of Landsat 7, 8, and 9 satellites

**表 2.** Landsat 7、8、9 卫星的红光(Red)和近红外(NIR)波段对应表

卫星	Red (红光)	NIR (近红外)
Landsat 7	Band 3	Band 4
Landsat 8	Band 4	Band 5
Landsat 9	Band 4	Band 5

NDVI 和 NDSI 的核心是通过红光波段(Red)和近红外波段(NIR)的反射率差异计算, 公式为:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red}} \quad (1)$$

$$NDSI = \frac{\rho_{Red} - \rho_{NIR}}{\rho_{Red} + \rho_{NIR}} \quad [6] \quad (2)$$

其中,  $\rho_{NIR}$  是近红外波段反射率(通常对应遥感影像中 700~1100 nm 的波段);  $\rho_{Red}$  为红光波段反射率(通常对应 600~700 nm 的波段)。以黄河三角洲地区植被 NDVI 的分布特征为依据, 植被覆盖度被划分为 5 个等级[7], NDSI 按 0~0.4 以 0.1 为步长划分为 5 级, >0.4 为盐土, 分级标准依据黄河三角洲土壤盐渍化实际分布特征确定。具体标准如表 3 和表 4 所示:

**Table 3.** Classification standards for vegetation coverage levels in the Yellow River Delta region based on NDVI  
**表 3.** 基于 NDVI 的黄河三角洲地区植被覆盖度等级划分标准

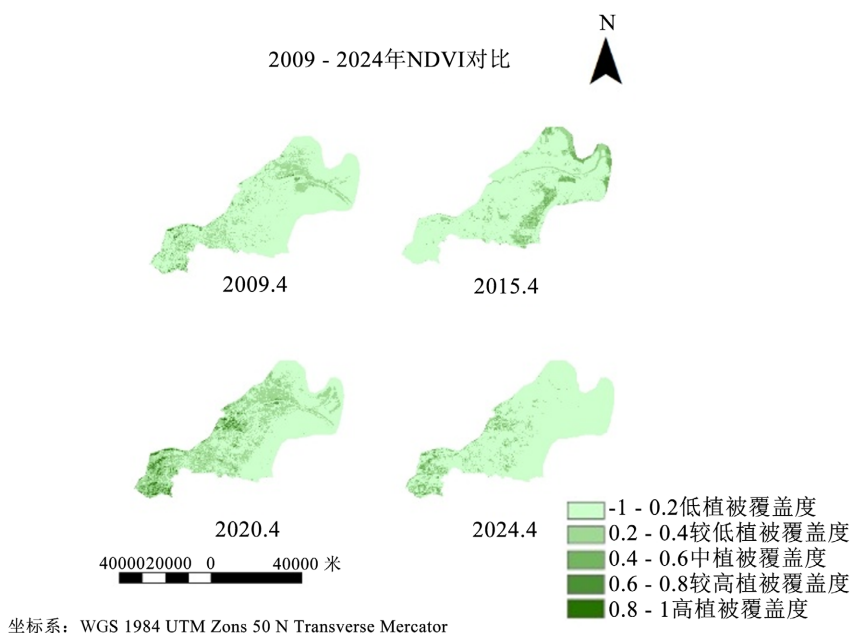
植被覆盖度	NDVI 值
低植被覆盖度	<0.2
较低植被覆盖度	0.2~0.4
中植被覆盖度	0.4~0.6
较高植被覆盖度	0.6~0.8
高植被覆盖度	>0.8

**Table 4.** Classification standards for salinization level in the Yellow River Delta region based on NDSI  
**表 4.** 基于 NDSI 的黄河三角洲地区盐渍化程度等级划分标准

盐渍化程度	NDSI 值
非盐渍化	-1~0
轻度盐渍化	0~0.1
中度盐渍化	0.1~0.2
重度盐渍化	0.2~0.3
极重度盐渍化	0.3~0.4
盐土	>0.4

### 3. 实验结果与分析

利用上述数据与模型，在 ENVI 软件中进行 NDVI 和 NDSI 计算得到四年垦利区植被覆盖情况和盐碱土盐分分布状况，在 ArcGIS 中进行图幅整饰，分层设色，如图 2 和图 3 所示。



**Figure 2.** Comparison chart of NDVI from 2009 to 2024  
**图 2.** 2009~2024 年 NDVI 对比图

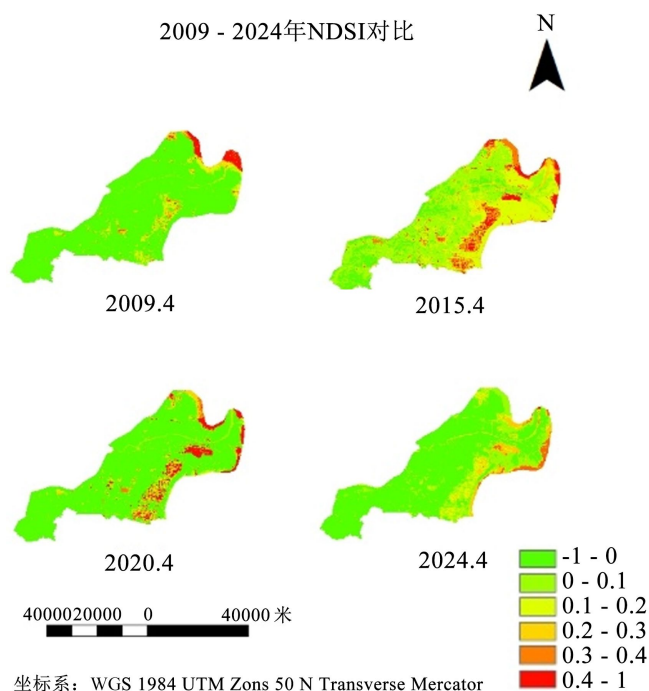


Figure 3. Comparison chart of NDSI from 2009 to 2024

图 3. 2009~2024 年 NDSI 对比图

由图 2 和表 5 可知, 从 2009 年 4 月到 2024 年 4 月, 垦利区 NDVI 呈现出明显的植被覆盖度提升趋势, 反映出垦利区植被生态质量逐步改善、植被覆盖持续优化。此外我们观察到依据现有 NDVI 图, 判断 2024 年相对之前植被覆盖率减少, 经调查研究发现, 该年份 4 月垦利区降水量仅 12.3 mm, 较常年同期(28.5 mm)偏少 56.8%, 且月平均气温较常年偏低 2.3℃, 4 月 23~24 日出现强寒潮天气过程, 最低气温骤降至 4.2℃, 较常年同期极端低温偏低 3.5℃。前期干旱导致土壤墒情不足, 后期寒潮造成返青作物及新生植被遭受冻害, 植被在 4 月份的生长受到明显抑制, NDVI 较 2020 年同期下降约 0.08~0.12。排除 2024 年气候异常情况, 植被覆盖整体在此 15 年内呈上升趋势。

Table 5. Statistical table of proportions and areas for each interval of NDVI

表 5. NDVI 各区间比例及面积统计表

Class Summary	2009		2015		2020		2024	
	Area (km <sup>2</sup> )	Percent	Area (km <sup>2</sup> )	Percent	Area (km <sup>2</sup> )	Percent	Area (km <sup>2</sup> )	Percent
-1 to 0.2	1920.28	82.38	1886.25	80.92	1445.92	62.03	2052.68	88.06
0.2 to 0.4	369.70	15.86	325.87	13.98	726.57	31.17	210.02	9.01
0.4 to 0.6	28.21	1.21	118.65	5.09	84.62	3.63	65.27	2.80
0.6 to 0.8	11.42	0.49	0	0	59.67	2.56	3.03	0.13
0.8 to 1	0.93	0.04	0	0	14.45	0.62	0	0

#### 1) 2009~2015 年: 暗管排盐工程的启动效应

2009 年低植被覆盖区占 95.52%, 生态基底极差。2010 年前后, 黄河三角洲未利用地开发项目在垦利区引入大型开沟埋管机进行暗管排碱施工, 将盐碱荒地改造为高标准农田。遥感影像上, 垦利街道、

兴隆街道核心区出现条带状、网格状的中高植被斑块, NDVI 由 0.05~0.15 跃升至 0.3~0.5, 与暗管铺设轨迹一致。

### 2) 2015~2020 年: 高标准农田与耐盐碱作物的协同跃升

2020 年低植被覆盖区骤降至 25.04%, 高覆盖区从无到有。此阶段垦利区入选全国首批整县级推进高标准农田试点县, 累计投资数亿元开展土地平整、暗管排碱、客土改良, 推动“五良”融合。同时, 依托国家盐碱地综合利用技术创新中心, 筛选培育耐盐碱作物新品种 87 个, 推广耐盐碱小麦、大豆 23 万亩。遥感影像上呈现大面积连片中高覆盖区, 农田纹理规则, 与自然恢复区形成“人工改良-自然恢复”二元结构。

### 3) 2020~2024 年: 气候异常与工程韧性的空间分异

2024 年 NDVI 因春季干旱(降水 12.3 mm, 偏少 56.8%)和寒潮(最低气温 4.2℃)出现短期波动。但空间异质性显著: 垦利街道五庄村等已完成“封域双层真空负压阻控”改良的 1 万亩农田, NDVI 仍维持 0.5 以上, 小麦亩产 400 公斤、玉米 600 公斤; 而未改良地远荒地降幅更大。这印证了系统工程对气候异常的缓冲作用, 剔除干扰后整体仍呈上升趋势。

由表 6、图 3 可知, 2009~2024 年垦利区 NDSI 整体呈下降趋势, 高盐渍化区域( $NDSI \geq 0.3$ )面积显著收缩, 高盐渍化区( $NDSI \geq 0.3$ )面积相对 2009 年缩减约 38.38%, 生态系统向健康、稳定方向演进。盐渍化降低的空间过程与地方水利工程布局、改良技术推广呈现强相关性。

**Table 6.** Statistical table of proportions and areas for each interval of NDSI

**表 6.** NDSI 各区间比例及面积统计表

Class Summary	2009		2015		2020		2024	
	Percent	Area (km <sup>2</sup> )	Percent	Area (km <sup>2</sup> )	Percent	Area (km <sup>2</sup> )	Percent	Area (km <sup>2</sup> )
-1 to 0	84.62	1972.49	13.47	313.99	79.41	1851.05	68.45	1595.57
0 to 0.1	4.25	99.07	67.44	1572.03	8.64	201.40	16.17	376.92
0.1 to 0.2	4.26	99.30	13.98	325.87	6.27	145.15	7.85	192.98
0.2 to 0.3	2.88	67.13	5.09	118.65	5.40	125.87	5.06	117.95
0.3 to 0.4	1.45	33.80	0.00	0.00	0.26	6.06	2.41	56.18
0.4 to 1	2.51	58.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.70

### 1) 灌排网络升级的“带状冲刷效应”

2020~2024 年 NDSI 降幅最大, 同期垦利区新建田间灌渠 304 公里, 渗漏率降低 30%~50%。遥感影像上, 渠系周边 500~1000 m 形成  $NDSI < 0.1$  的低值带, 呈线状分布, 与渠系走向完全吻合。特别是 2024 年建成的 5000 亩盐碱地综合利用示范园, NDSI 普遍低于 0.05, 形成显著的低盐渍化“热点”。

### 2) 暗管排盐技术的斑块破碎化效应

2021 年 6 月, 乾舜水土治理公司在垦利街道启动根治盐碱示范区, 一期 3000 亩采用“封域双层真空负压阻控”技术, 土壤含盐量由 41.5 g/kg 降至 1.4 g/kg; 至 2024 年扩展至 1 万亩, 带动周边技术扩散。遥感影像上, 项目区呈现规则化的低盐渍化矩形斑块, 边界清晰, 与未改良区的自然盐渍化斑块形态迥异, 可作为识别暗管工程的遥感标志。2024 年垦利区累计启动 20 万亩盐碱地开发, 入选全国县级成果样板县, 直接导致高盐渍化区由连片分布转为零星岛状。

### 3) 生态互馈机制的空间验证

政策密集区(垦利街道、黄河口镇)NDVI与NDSI强负相关( $R^2 > 0.75$ ),植被改善直接驱动土壤降盐,形成正向反馈;沿海新淤地带等自然演替区耦合关系较弱,植被恢复滞后于脱盐。这表明人工干预可显著加速互馈进程,重度盐渍化区需优先工程破锁。

针对黄河三角洲盐碱地生态系统的时空变化特征,本研究提出以下综合措施:首先,应强化生态保护政策的实施,严格限制破坏性开发活动,并制定长期规划以确保植被覆盖的持续提升;其次,推广耐盐碱作物[8](如冬枣、藜麦)及高效农业技术(如节水灌溉、高标准农田建设),推动“以种适地”与“以地适种”结合[9][10],以增强农田生态稳定性;同时,结合植被的降盐改土作用,科学应用暗管排盐、秸秆还田等技术[10],优化盐碱地改良效果,利用遥感技术持续监测植被覆盖度和土壤盐渍化动态变化[11],及时调整治理措施。通过上述多维度干预,可有效促进该区域生态环境的可持续改善。

## 4. 结论与展望

### 4.1. 结论

1) 揭示了15年植被覆盖与土壤盐渍化协同演变的时空规律

2009~2024年,垦利区NDVI整体呈显著上升趋势,低植被覆盖区( $NDVI < 0.2$ )与较低植被覆盖区( $0.2 \leq NDVI < 0.4$ )面积持续减少,中、较高及高植被覆盖区( $NDVI \geq 0.4$ )面积大幅增加;同期NDSI持续下降,高盐渍化区域( $NDSI \geq 0.4$ )面积从58.51 km<sup>2</sup>锐减至0.70 km<sup>2</sup>。植被改善与盐渍化降低呈现显著的空间耦合特征,生态系统向健康、稳定方向演进。

2) 阐明了生态好转的多因素驱动机制

研究区盐碱地生态系统的持续改善,是政策引导、技术支撑与生态互馈三者协同作用的结果。国家与地方生态保护及盐碱地治理政策提供了顶层设计与实施保障,耐盐碱作物推广、高效改良技术的规模化应用加速了土壤脱盐与植被恢复,而植被覆盖度提升与土壤盐渍化降低之间形成的正向生态互馈机制,进一步巩固了治理成效,推动生态系统向健康稳定方向演进。

3) 构建了长时序双指数耦合监测的技术方法体系

本研究构建了一套“15年长时序遥感监测-NDVI/NDSI双指数耦合分析-野外实地采样验证”的滨海盐碱地生态评估方法体系。该方法以2009~2024年Landsat系列数据为支撑,实现了植被覆盖与土壤盐渍化的协同反演,同时通过野外调查与土壤采样验证了反演结果的可靠性,弥补了传统单指数监测、短时序分析或缺乏地面验证的不足,可为黄河三角洲及同类滨海盐碱地的生态监测与治理评估提供科学参考。

### 4.2. 展望

1) 建立高频连续监测体系,支撑精准治理决策

建议依托国家黄河流域生态监测网络,构建“卫星遥感-无人机-地面站点”多源协同的季度-年度动态监测机制,实时追踪植被覆盖度与土壤盐渍化演变,为黄河三角洲生态保护修复工程实施效果评估与治理方案动态优化提供高频数据支撑。

2) 深化机理研究与模型优化,提升预测能力

针对黄河三角洲新生陆地快速演替特征,加强水-盐-植被耦合机理研究,研发适用于滨海盐碱地的生态过程模型;融合遥感大数据与机器学习技术[12],构建植被-盐渍化演变预测模型,提升对极端气候、人类活动干扰情景下生态系统响应的模拟能力。其中,NDSI阈值划分虽参考了区域盐渍化分布特征,但尚未有针对黄河三角洲的权威分级标准,未来可结合更多地面实测数据优化。

3) 拓展应用场景,服务盐碱地综合利用国家战略

将本研究方法体系推广至黄河三角洲东营、滨州等全域，以及环渤海滨海盐碱地、江苏沿海滩涂等区域[13]；对接“以种适地”与“以地适种”相结合的盐碱地综合利用需求，为耐盐碱作物适生区划、高标准农田建设空间布局、生态产品价值实现机制构建提供精准决策支持，助力黄河流域生态保护和高质量发展国家战略深入实施[13]。

## 致 谢

本论文依托淄博市社会科学规划研究项目(25ZBSK165)完成，聚焦淄博推动黄河流域生态保护和高质量发展研究。谨向所有给予支持与帮助的师长、同仁及亲友致以诚挚谢意。

衷心感谢导师的悉心指导，从选题构思、框架搭建到内容打磨，都倾注了大量心血，其严谨治学态度与专业素养令我受益匪浅。感谢项目组同仁的并肩协作，调研与研讨中的交流探讨，为研究推进提供了诸多助力。感谢学校与山东省级大学生创新创业项目提供的资源支持，保障研究顺利开展。

囿于学识，文中难免疏漏，恳请各位专家学者批评指正。

## 基金项目

淄博市社会科学规划研究项目“淄博推动黄河流域生态保护和高质量发展研究(25ZBSK165)”。

## 参考文献

- [1] 舒鲁玉. 黄河三角洲地区农业碳排放时空差异与影响因素研究[D]: [硕士学位论文]. 淄博: 山东理工大学, 2024.
- [2] 张胜男. 黄河三角洲土壤盐渍化时空演变及其对作物种植结构的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国农业科学院, 2024.
- [3] 刘祖汀. 河套灌区盐碱地改良工程对地下水动态时空演变规律影响及数值模拟[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022.
- [4] Li, X.J., Li, Y., Wang, B., Sun, Y., Cui, G. and Liang, Z. (2022) Analysis of Spatial-Temporal Variation of the Saline-Sodic Soil in the West of Jilin Province from 1989 to 2019 and Influencing Factors. *Catena*, **217**, Article ID: 106492. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106492>
- [5] 顾东岳, 陈雅婷. 黄河三角洲土壤盐含量的遥感反演[J]. 吉林农业, 2015(12): 59-60.
- [6] Zhao, H.J., Wang, Y., Yang, L., Yuan, L. and Peng, D. (2015) Relationship between Phytoplankton and Environmental Factors in Landscape Water Supplemented with Reclaimed Water. *Ecological Indicators*, **58**, 113-121. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.03.033>
- [7] 付含培, 王让虎, 王晓军. 1999-2018 年黄河流域 NDVI 时空变化及驱动力分析[J]. 水土保持研究, 2022, 29(2): 145-153+162.
- [8] 李小艳, 翟红莲, 李海涛, 等. 不同土壤处理方式对盐碱地盐碱化程度的影响[J]. 山东林业科技, 2015, 45(2): 20-22.
- [9] 高岩, 李韶慧. 盐碱地综合利用现状及对策[J]. 现代农业科技, 2025(15): 67-71.
- [10] 于功霞, 李迎, 刘宏元, 等. 我国盐碱地改良与利用技术研究进展[J]. 黑龙江农业科学, 2025(7): 96-103.
- [11] 关元秀, 刘高焕, 刘庆生, 等. 黄河三角洲盐碱地遥感调查研究[J]. 遥感学报, 2001(1): 46-52+86.
- [12] 李彤, 王春月, 范昕桐. 吉林一号卫星在盐碱地精细提取中的应用——以吉林省乾安县为例[J]. 卫星应用, 2023(3): 61-66.
- [13] Zhao, X., Tao, W., Wang, Q., Liu, S. and Cao, J. (2025) Spatiotemporal Characterization of Ecological Elements and Zoning of Saline-Alkaline Land Management in the Yellow River Delta. *Environmental Development*, **57**, Article ID: 101398. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2025.101398>