

## LANDSAT 위성영상을 이용한 과거 35년간 두만강 하구 해안선 변화 연구\*

Zhao, Yuwei<sup>1)</sup> · Zhao, Shuqing<sup>1)</sup> · Xu, Zhen<sup>2),3),4)</sup> · 이동근<sup>5)</sup>

<sup>1)</sup>연변대학교 지리해양과학대학 학생 · <sup>2)</sup>연변대학교 지리해양과학대학 교수 · <sup>3)</sup>Tumen River Basin Wetland Ecosystem Field Scientific Research and Observation Station, Yanbian University, Yanji, 133002, China ·

<sup>4)</sup>Jilin Provincial International Joint Research Center of Tumen River Basin Wetland and Ecology, Yanbian University, Yanji, 133002, China · <sup>5)</sup>서울대학교 농업생명과학대학 조경·지역시스템공학부

## Coastline Changes in the Tumen River Estuary over the Past 35 Years Using the Landsat Satellite Imagery

Zhao, Yuwei<sup>1)</sup> · Zhao, Shuqing<sup>1)</sup> · Xu, Zhen<sup>2),3),4)</sup> and Lee, Dongkun<sup>5)</sup>

<sup>1)</sup>Master, College of Geography and Ocean Science, Yanbian Univ, Yanji, China,

<sup>2)</sup>Professor, College of Geography and Ocean Science, Yanbian Univ, Yanji, China,

<sup>3)</sup>Tumen River Basin Wetland Ecosystem Field Scientific Research and Observation Station, Yanbian University, Yanji, 133002, China,

<sup>4)</sup>Jilin Provincial International Joint Research Center of Tumen River Basin Wetland and Ecology, Yanbian University, Yanji, 133002, China,

<sup>5)</sup>Department of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Seoul National University.

### ABSTRACT

Coastline changes evolution of different intensities at all times under the influence of natural and anthropogenic effects. In this paper, we extracted the coastline of the Tumen River estuary from 1985 to 2020 using the digitizing method, verified the accuracy using the visual interpretation results, and analyzed the changes of the coastline of the Tumen River estuary through the area method and the baseline method. The results showed that the coastline showed an erosion trend during 35 years, with an average erosion rate of 0.05 m/year, an average erosion distance of 3.06 m, and an erosion area of 19.25 ha. Among the human activities that retarded the erosion of the coastline, these activities had

**First author** : Zhao, Yuwei, College of Geography and Ocean Science, Yanbian University, Graduate student, Yanji 133002, China,

Tel : +86-178-3306-8575, E-mail : zhaoyuwei\_ybu@163.com

**Corresponding author** : Xu, Zhen, College of Geography and Ocean Science, Yanbian University, Associate Professor, Yanji 133002, China,

Tel : +86-158-4433-2323, E-mail : xuzhen@ybu.edu.cn

**Received** : 17 May, 2024. **Revised** : 21 June, 2024. **Accepted** : 10 June, 2024

a long-term impact on the natural morphology of the coastline.

**Key Words:** *Tumen River Estuary; Coastline; DSAS; Tidal Correction; Digitizing*

## I. 서론

해안선은 바다와 육지의 경계로 그 변화는 기후 변화, 해안침식, 해안지역 건설 등과 같은 영향을 많이 받는다 (Luijendijk et al., 2018). 따라서 해안선을 정확하게 추출하고 변화를 모니터링하는 것이 시급하다 (Aouiche et al., 2016; Chen et al., 2019). 원격탐사기법은 해안선 변화를 모니터링 하는데 있어서 가장 효율적인 방법으로 널리 사용되고 있다 (Li et al., 2023). 그중에서 LANDSAT 위성자료는 장기간 시계열 연구에 광범하게 사용되고 있다(Hu and Wang, 2022). 위성영상을 이용한 해안선 추출 연구는 주로 지수를 이용한 자동 추출 방법과 디지털라이징 방법으로 나눌 수 있다. 지수를 이용한 방법은 육안 분류 기법보다 오차 범위가 크고 위성영상 해상도 크기의 영향을 많이 받는 단점이 있다(Li et al., 2020).

디지털라이징을 방법을 통한 해안선 추출은 작은 지역의 정확한 해안선을 추출하는데 많이 활용되고 있다. Hu 등(2021)은 Landsat 위성영상을 이용하여 디지털라이징 기법으로 과거 40년간 중국의 광둥-홍콩-마카오 Greater Bay Area의 해안선을 추출하고 변화 원인을 분석하였다. Li 등(2023)은 Landsat 위성영상과 디지털라이징 기법을 이용하여 중국 해안선의 길이, 해안 지역 면적, 해안선 다양성 지수 등을 분석하였다. Yao 등(2013)은 디지털라이징 기법을 이용하여 1980년부터 2010년 사이의 중국 해남도 지역의 해안선을 추출하고 체계적인 분석을 수행하였다. 디지털라이징 기법은 해안선 모니터링 연구에 바로 활용될 뿐만 아니라 해안선 자동추출 방법의 정확도 분석을 위한 기준으로 많이 사용되기도 하며 해안선을 비교적 정확하게 추출하는 방법으로 사용되고 있다.

두만강 하구는 중국 길림(Jilin)성에 위치하여 동해로 향하는 유일한 수상통로이다. 이 지역은 중국-러시아-북한의 접경지역으로써 기후변화와 인간 활동의 영향이 비교적 뚜렷하게 구분되는 지역이다. 두만강 하구의 해안선 변화에 대한 장기간 모니터링은 접경지역 해안선 보호와 해안대의 생태 복원에 중요한 작용을 한다. 본 연구에서는 Landsat 위성영상 자료를 기반으로 디지털라이징 기법을 이용하여 과거 35년간(1985-2020)의 두만강 하구 지역의 해안선 변화를 모니터링하고자 한다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 연구대상지

본 연구의 대상 지역은 중국 길림성 두만강 하구이며, 지리적 범위는 약 42°10'N ~ 42°37', 130°18'E ~ 130°53'E이다 (Figure 1). 두만강 하구를 중심으로 북한과 러시아 남북 방향으로 해안선을 주요 연구지역으로 해안선의 총길이를 140km이다. 연구지역의 남쪽은 토사가 퇴적되어 형성된 평야와 늪이 주요하게 분포되었고 구릉지가 소량으로 분포되어 있다. 연구지역 북쪽의 해안선은 상대적으로 직선적인 특징을 보이며 파도, 조석, 해류 등 자연적인 요소의 영향을 많이 받는다.

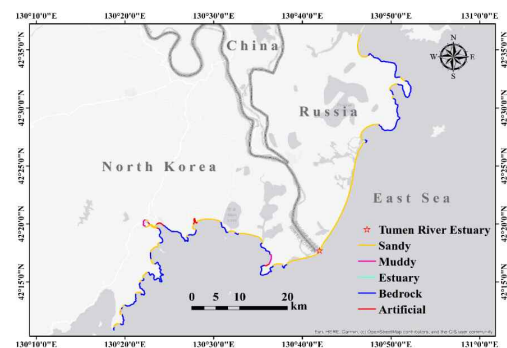



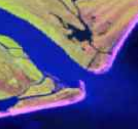



Figure 1. Study area

**Table 1.** Shoreline type definitions and interpretation criteria

	Type	Standard	Image samples
Natural	Bedrock	The bedrock shoreline consists of rocks with a curvilinear shape and distinct contours, with low spectral reflectance and a predominantly gray color in remotely sensed imagery.	
	Sandy	Sandy shoreline located in an open bay in front of a bedrock headland with a relatively straight shoreline formed by the long-term action of waves. It appears as a light white color on the image.	
	Silty	Silt coasts are coasts rich in sediment that have been formed by sediment deposits over a long period of time by tides, runoff, and other dynamics. The color shows darker on the image.	
	Estuary	The estuary coastline is generally located at the mouth of the sea. The river suddenly widens. The line connecting the two banks with a river width greater than 100 meters is the estuary coastline.	
Artificial	Artificial coastline is entirely composed of human activities. The outer boundary of an artificial building represents the position of the artificial coastline extracted from the image.		

## 2. 연구자료

연구에 사용된 수치표고모형(DEM)은 Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 자료를 사용했고, 위성영상은 Landsat Collection 2 Level 2를 사용하였다. 본 연구에서는 위성영상 선정에 있어서 구름 등 노이즈가 없는 영상을 선택하였으며 1985, 1990, 1995, 2001, 2004, 2009, 2010, 2015 및 2020년의 5월부터 10월 사이의 Landsat 영상을 사용하였다. 조위자료는 TPX09-atlas 조석모델의 모의자료를 사용하였다(Egbert and Erofeeva, 2002).

## 3. 연구방법

우선 Landsat 영상을 이용하여 디지털이징 기법을 통하여 연구대상지의 해안선을 추출하였다. 그 후 DEM 자료를 이용하여 해안의 경사를 계산하고, 조석 데이터를 결합하여 연구지역 조석 보정을 수행하였다. 마지막으로 추출한 해안선에 대해 정확도를 분석하고 Digital Shoreline

Analysis System (DSAS) 방법을 이용하여 해안선의 변화율을 분석하였다(Baig et al., 2020).

### 1) 해안선 추출 방법

본 연구에서는 Digital Shoreline Analysis System (DSAS) 공간통계모듈을 이용하여 지난 35년간 두만강 해구 남북 양측의 다양한 해안선의 길이를 계산하였다(Himmelstoss et al., 2018). 디지털이징 기법을 통해 연구대상지의 해안선을 추출하였다. 위성영상에서 해안선을 추출할 때 바다와 육지의 혼합 픽셀의 중간 위치를 추출하고 추출된 해안선에 대해 유형을 구분한다. 해안선은 크게 자연적으로 형성된 자연 해안선과 인류활동에 의한 인공 해안선 두 가지로 분류할 수 있다. 본 연구에서는 자연 해안선을 암석 해안선, 모래 해안선, 실트 해안선과 하구 해안선 등 네 가지로 나누었다. 두만강 하구의 해안선 유형의 분류 표준과 샘플 영상은 Table 1과 같다.

**Table 2.** Uncertainty in extracting coastlines from Landsat data

Measurement Uncertainty (m)	1985	1990	1995	2001	2004	2009	2015	2020
Georeferencing error (Eg)	7.43	6.54	5.55	4.72	5.62	5.03	5.89	5.75
Pixel error (Ep)	30	30	30	30	30	30	30	30
Tidal range Error (Et)	0.01	0.01	0.04	0.05	0.07	0.04	0.05	0.04
Extraction error (Ex)	20.92	20.92	20.92	20.92	20.92	20.92	20.92	20.92
Total shoreline uncertainty (Ut)	37.32	37.15	36.99	36.88	37.00	36.92	37.05	37.02

## 2) 불확실성 평가

원격탐사 자료를 이용한 해안선 추출 결과는 필연적으로 오차가 발생한다. 오차는 주로 위치 오차와 측정오차를 포함하며, 각 데이터의 오차 값은 Table 2에 나열되어 있으며, 총 오차는 식 (1)으로 계산할 수 있다 (Hapke et al., 2011).

$$U_t = \sqrt{E_g^2 + E_p^2 + E_t^2 + E_x^2} \quad (1)$$

식(1)에서  $U_t$ 은 불확실성을 나타내고,  $E_g$ 는 지리적 참조 오차이며 Landsat 영상 메타데이터에 포함되어 있다.  $E_p$ 은 픽셀 오차이며, 그 크기는 픽셀 크기와 같다 (Mullick et al., 2020). 이 연구에서는 사용되는 Landsat 위성영상의 해상도는 30m이기 때문에 픽셀 오차도 30m이다,  $E_t$ 은 조위 변동 오차를 나타내며,  $E_x$ 는 추출 오차를 나타내고 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error; RMSE)로 표현할 수 있다 (Darwish and Smith, 2023; Hu and Wang, 2022).

## 3) 조석 보정

조석은 달과 태양의 중력으로 발생한 기조력의 영향으로 해수면의 높낮이가 주기적으로 변하는 현상을 말한다. 조위 고도를 나타낸 관측 결과를 대지의 수평면으로 귀산 하는 과정을 조석 보정이라고 한다 (Sun et al., 2019). 조석의 변화는 모래 및 실트 해안선의 위치에 현저한 영향을 미칠 수 있다(Ting et al., 2015). 따라서 이 두 가지 해안선을 추출할 경우 조석 요인을 고려

하지 않으면 침식 및 퇴적 추정 결과에 대한 불확실성이 커질 수 있다(Zhang, 2013). 본 연구에서는 DEM 자료를 사용하여 버퍼 내의 평균 해안 경사를 계산하고 식(2)에 따라 보정할 거리  $L$ 을 계산하였다.  $L$ 은 추출된 해안선과 실제 해안선 사이의 거리를 나타낸다.

$$L = \frac{(H-h)}{\sin(\alpha)} \quad (2)$$

식에서  $H$ 와  $h$ 는 영상 획득한 날의 가장 높은 조석과 영상획득 시점의 조위이다. 연구 대상지의 8개 시기의 영상 획득 시각의 조석 높이는 Table 1과 같다. 는 해안선을 나타내며 Coastline은 보정 후 해안선 위치를 나타내고 Waterline은 본 연구에서 추출한 해안선 위치를 나타낸다. 암석 해안선과 인공 해안선은 조석의 영향을 적게 받기 때문에 이 연구에서는 모래 해안선과 실트 해안선에 대해서만 조석 보정을 수행하였다.

## 4) 해안선 변화율 분석

본 연구에서는 DSAS 소프트웨어를 이용하여 해안선의 변화율을 분석하였다. 1985년부터 2020년 사이 35년 동안의 해안선 변화율은 순 해안선 운동(Net Shoreline Movement, NSM), 해안선 종점 속도(End Point Rate, EPR) 및 선형 회귀 변화율(Linear Regression Rate, LRR)을 정량화하였다. 해안선이 육지로 이동하면 침식을 나타내며 수치가 음의 값을 가지고 해안선이 바다 쪽으로 이동하면 퇴적을 나타내며 수치가 양의 값을 가지게 된다. 계산 과정은 다음과 같다(식 3-7).

**Table 3.** Shoreline Erosion Accumulation Rate Classification

Level	LRR(m/yr)	Classification
1	<-2	Severe erosion
2	-2~-1	High erosion
3	-1~0	Medium erosion
4	0	Stable
5	0~1	Medium accretion
6	1~2	High accretion
7	>2	Severe accretion

의 기울기와 절편을 표시하고  $x_i$ 는  $i$ 시기의 해안선 X축 좌표 위치이며  $y_i$ 는 특정 단면에서  $i$ 시기의 해안선과 기준선 사이의 거리 간격이고  $n$ 은 해안선 기간의 수를 나타낸다. 본 연구에서는 해안선 LRR 값을 7가지 범주로 분류하고(Table 3), 과거 35년 동안 연구대상지 해안선의 전체적인 변화를 평가하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 해안선 길이의 변화

1985년부터 2020년까지 35년간 5년 단위로 8개 시기의 해안선 길이의 변화는 다음과 같다 (Table4). 해안선 길이 변화량은 1985년과 2020년 두 시기의 해안선 길이의 차이로 간주하였다. 두만강 하구 북쪽 해안선의 길이는 1985년부터 2020년까지 약 0.25km 증가하였다. 해안선 종류별 변화를 보면, 모래 해안선의 길이가 가장 길고 하구 해안선의 길이는 기타 유형의 해안선보다 훨씬 짧은 것으로 확인되었다. 35년 동안 두만강 하구 북쪽의 암석 해안선은 약 1.58km 감소하고 모래 해안선은 약 1.81km 증가했으며 하구 해안선은 크게 변하지 않았다. 특히 1995~2001년 사이의 모래 해안선이 약 0.43km 정도의 큰 폭으로 증가하였다.

두만강 하구 남쪽은 암석 해안선이 우세인 해안선 유형이고 모래 해안선이 그 뒤를 잇고 있으며 실트 해안선 및 인공 해안선의 길이는 비교적

$$NSM = D_{\neq w} - D_{old} \quad (3)$$

$$EPR = \frac{D}{T} \quad (4)$$

$$LRR = ax + b \quad (5)$$

$$a = \frac{\sum_i x_i^2 \sum_i y_i - \sum_i x_i \sum_i x_i y_i}{n \sum_i x_i^2 - (\sum_i x_i)^2} \quad (6)$$

$$b = \frac{n \sum_i x_i y_i - \sum_i x_i \sum_i y_i}{n \sum_i x_i^2 - (\sum_i x_i)^2} \quad (7)$$

식(3)에서  $D_{new}$ 는 최신 시기의 해안선을 나타내고,  $D_{old}$ 는 오래된 시기의 해안선을 표한다. EPR은 기선의 특정 단면에 수직인 해안선 종말점 변화율을 나타낸다. D는 두 해안선 사이의 간격을 표하고, T는 두 해안선 사이의 시간 차이를 나타낸다. a와 b는 각 해안선 위치 계열 적합성

**Table 4.** Summary of shoreline length on both sides of the study area (km)

	North				South					
	Bedrock	Sandy	Estuary	Total	Bedrock	Sandy	Muddy	Estuary	Artificial	Total
1985	25.45	31.04	0.13	56.63	44.35	28.88	3.96	0.00	4.94	82.13
1990	25.32	31.15	0.21	56.69	44.40	29.09	3.91	0.00	5.02	82.42
1995	25.30	31.08	0.15	56.53	44.46	28.92	3.62	0.16	5.47	82.63
2001	25.20	31.51	0.16	56.88	45.20	29.38	3.33	0.00	6.13	84.04
2004	24.32	32.37	0.18	56.88	45.11	29.28	3.20	0.20	6.21	84.00
2009	24.13	32.62	0.40	57.15	44.86	27.39	3.09	0.00	7.76	83.10
2015	23.89	32.67	0.12	56.68	44.13	26.77	3.04	0.13	7.78	81.85
2020	23.87	32.85	0.16	56.88	43.78	26.84	2.64	0.00	8.27	81.53

짧다. 과거 35년간 인공 해안선은 증가하는 추세를 보인다. 지난 35년 동안 두만강 하구 남측지역은 암석 해안선, 모래 해안선, 실트 해안선은 각각 0.57km, 2.04km, 1.32km 감소하였고, 인공 해안선은 3.33km가 증가하였으며 하구 해안선은 뚜렷한 변화가 없는 것으로 나타났다.

## 2. 해안선 면적 변화 분석

과거 35년간 해안선은 전반적으로 침식을 나타내며 침식된 거리는 약 3.06m로 나타났다. 5년간격의 NSM 과 EPR에 대한 분석 결과는 Table5 과 같다. 그 결과 1990년부터 1995년까지 연구지역의 침식해안선의 평균 EPR이 1.3m/년으로 가장 작았고, 2001년부터 2004년까지의 평균 EPR은 3.88m/년으로 가장 크게 나타났다. 퇴적해안

선의 평균 EPR은 1985년부터 1990년까지 1.69m/년으로 가장 작았고, 1995년부터 2001년까지 퇴적해안선의 평균 EPR은 3.02m/년으로 가장 크게 나타났다. 연구 지역의 해안선은 1990~1995년과 2009~2015년에 퇴적하는 특성을 보였고, 1990~995년에는 퇴적률이 최대에 도달하여 연평균 퇴적률이 1.91m/년이었고, 기타 기간에는 해안선이 침식 특성을 보였다.

35년 동안 두만강 해구 남북 양측의 변화를 분석하기 위해 연구 지역의 남쪽과 북쪽 해안선 단독 NSM과 EPR을 계산하였다(Table6). 그 결과 2004년부터 2009년까지가 연구지역의 북쪽 해안선 침식이 가장 심각한 시기로 나타났으며 연평균 침식률이 약 2.25m/년도 나타났다. 1990년부터 1995년까지 북쪽 해안선 퇴적률이 가장 빠른

**Table 5.** Average NSM and average EPR results of the coastline every five years from 1985 to 2020

	Erosion			Accretion			Overall	
	Average NSM (m)	Average EPR (m/year)	% of Transects	Average NSM (m)	Average EPR (m/year)	% of Transects	Average NSM (m)	Average EPR (m/year)
1985-1990	-11.73	-2.23	59.47%	8.87	1.69	40.53%	-3.38	-0.64
1990-1995	-6.59	-1.3	25.53%	15.26	3.00	74.47%	9.68	1.91
1995-2001	-17.23	-3.05	63.17%	17.04	3.02	36.83%	-4.61	-0.82
2001-2004	-11.56	-3.88	63.07%	8.76	2.94	36.93%	-4.06	-1.36
2004-2009	-15.11	-3.00	52.61%	13.09	2.60	47.39%	-1.74	-0.35
2009-2015	-11.5	-1.82	37.33%	17.60	2.79	62.67%	6.74	1.07
2015-2020	-12.32	-2.42	69.73%	9.11	1.79	30.27%	-5.83	-1.15
1985-2020	-22.58	-0.64	61.32%	27.88	0.84	38.68%	-3.06	-0.07

**Table 6.** Overall performance of NSM and EPR on both sides of the study area from 1985 to 2020

	North				South			
	Average NSM (m)	Average EPR (m/year)	% of Erosion	% of Accretion	Average NSM (m)	Average EPR (m/year)	% of Erosion	% of Accretion
1985-1990	-3.51	-0.67	59.93%	40.07%	-3.29	-0.63	59.15%	40.85%
1990-1995	11.61	2.28	27.68%	72.32%	8.34	1.64	24.03%	75.97%
1995-2001	-7.97	-1.41	64.11%	35.89%	-1.88	-0.33	62.52%	37.48%
2001-2004	-3.21	-1.08	56.35%	43.65%	-5.04	-1.69	67.87%	32.13%
2004-2009	-11.35	-2.25	65.23%	34.77%	4.93	0.98	43.84%	56.16%
2009-2015	8.57	1.36	34.70%	65.30%	5.46	0.87	39.15%	60.85%
2015-2020	-10.93	-2.15	77.36%	22.64%	-2.21	-0.43	64.30%	35.70%



시기로 분석되었고 연평균 퇴적률이 약 1.64m/년에 달하였다. 2001년부터 2004년까지는 남쪽 해안선 퇴적률이 가장 높은 시기로 연평균 침식률이 약 1.69m/년으로 확인되었다. 두만강 하구의 남북 양측 해안 침식과 퇴적 면적을 분석한 결과 과거 35년 동안 연구 지역 전체의 해안선이 침식되었고 침식 면적은 약 19.25ha로 확인되었다. 연구지역 북쪽 해안선의 침식 면적은 약 122.23ha이고, 퇴적면적은 약 37.89ha로 전반적으로 침식 특성을 나타냈다. 남쪽 해안선의 침식면적은 약 59.65ha로 나타나고 퇴적면적은 약 124.74ha로 전반적으로 퇴적특성을 나타냈다.

### 3. 해안선 변화율 분석

본 연구는 35년 동안 해안선의 변화에 대하여 선형 회귀 분석을 수행하여 해안선 변화율을 계산하였다. 그 결과 연구지역은 35년 동안 60.84%의 해안선이 침식되었고 평균 침식률은 0.61m/년으로 나타나고 평균 퇴적률은 0.81m/년으로 나타났다. 모든 해안선 유형은 과거 35년 동안 침식 경향을 보였고 연평균 침식률은 약 0.05m/년이다. 남북 양측의 해안선 변화율을 비교해 보면, 북쪽 해안선의 67.98%는 매년 0.91m의 속도로 침식되었고, 32.02%는 약 0.48m/년의 속도로 해양 방향으로 퇴적되었다. 전반적으로 북쪽 해안선은 0.46m/년의 속도로 육지로 향한 침식 경향을 보였다. 남쪽 해안선의 55.86%는 매년 0.35m의 속도로 침식되었으며 44.14%는 0.97m/년의 속도로 해양 방향으로 퇴적되었다. 전반적으로 해안선은 0.23m/년의 속도로 퇴적 경향을 보이는 것으로 확인되었다. 연구지역 북쪽은 침식해안선이 퇴적해안선의 약 2.1배로 나타나고 연구지역 남쪽은 퇴적해안선이 침식해안선의 약 1.3배로 나타났다.

1985년부터 2020년까지 연구지역의 LRR의 공간적 분포와 수치적 통계적 분포는 Figure 2와 같다. 좌측 그래프는 각 단면의 LRR 값을 지도상에서 직관적으로 나타낸 결과이고 우측 서브 그래

프는 해안선 단면의 LRR 수치 분포도이다. 대부분의 지역에서 LRR은 -1~1m/년 사이로 나타나고 이는 중급 정도의 침식과 퇴적에 속한다. 그림에서 표시된 A, B, C, D, E, F 부분은 침식과 퇴적의 변화가 비교적 큰 지역을 나타낸다. 지역 A, B, C는 퇴적 지역을 나타내고 D, E, F는 침식 지역을 표한다. 지역 A와 B는 연구 지역의 남쪽에 위치하고 지역 D, E, F는 연구 지역의 북쪽에 위치하며 지역 C는 두만강 하구이다. 변화의 길이는 각각 A는 약 2.5km, B는 약 1.8km, C는 약 3.3km, D는 약 8.6km이고 E는 약 1.3km이다. 또한 그림에서 계산에 따르면 지역 A-F의 35년 평균 LRR은 각각 8.89m/년, 1.28m/년, 2.73m/년, -2.52m/년, -1.28m/년, -1.38m/년으로 나타났다. 그중 지역 A와 지역 C는 심각한 퇴적 지역으로 분석되었고 지역 B는 고 퇴적 지역으로 나타났으며 지역 D는 심각한 침식 지역이다.

A지역은 북한 손봉 용수호 부근의 해안선으로 그 변화가 비교적 크다. 본 연구에서는 1985년에서 2020년 사이에 해당 지역의 Landsat 원격 탐사 영상과 Google Earth의 고해상도 영상을 이용하여 검토하였다. 그 결과 2004년부터 2009년

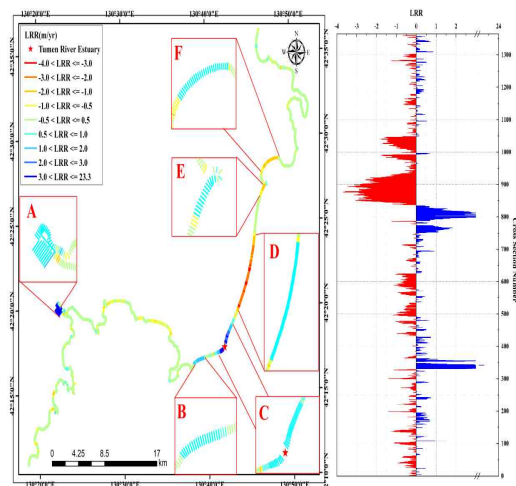


Figure 2. Spatial and numerical distribution of the coastline linear regression rate (LRR) in the study area from 1985 to 2020

사이 용수호 지역의 해안선이 육지로 크게 침식 되었음을 알 수 있으며 2006년 용수호 근처의 지표면에 인간 활동으로 인한 흔적이 없음을 보여 준다. 그러나 2009년에는 이 지역의 퇴적 유형이 경작지로 나타나기도 하였다. 따라서 용수호 지역은 인간 활동의 증가가 자연 퇴적 과정을 악화 시키었음을 알 수 있다.

지역 B와 지역 C는 하천 유출구에 위치하며 하천 퇴적물에 의해 운반되어 퇴적물을 생성한다. 하천 퇴적물의 수송 과정은 육지 가장자리의 형태학적 진화에 중요한 역할을 미치며, 이 과정은 해안선의 퇴적 또는 침식에 중요한 영향을 미친다(Chaudhry, 2008). Luan 등(2021)은 하천으로 운반되는 토사가 해안선 특성을 형성하는 주요 요인 중 하나임을 강조한 바 있다. 또한 해안 퇴적물의 출처에는 해안 암석의 침식과 해양 생물 파편 입자가 포함될 수 있다(Van Loon et al., 2017). He 등(2023)의 연구에 따르면 하천 유역의 강수량이 하천으로 운반되는 토사의 양을 증가시켜 하천 유출구에서 진흙을 발생시킬 수 있다. 또한 하천 토사와 해안선 길이 사이에 양의 상관관계가 있음을 입증된 연구도 있다(He et al. 2023).

따라서 두만강 하구에서도 하천으로 의해 운반된 퇴적물이 해당 지역의 해안선 형태에 상당한 영향을 미칠 수 있다고 사료된다. 지역 D, E, F는 두만강 해구의 북쪽에 있으며, 북쪽은 두만강의 토사가 퇴적되어 형성된 광활한 평야와 늪지대가 특징이다. 해안선의 변화에 영향 주는 인위적인 요소는 주로 인위적으로 건축물을 구축하는 방식으로 해안선의 모양과 위치의 변화에 영향을 준다. 반면 자연 요소는 주로 바닷물의 씻김과 해수면의 상승을 통해 해안선의 위치와 모양을 바꾼다. 두만강 하구의 변화를 분석한 결과에 따르면 북쪽 해안선의 유형은 모두 자연 해안선으로 단일하다. 그뿐만 아니라 이 지역은 모래 해안선이 대부분을 차지하며 인위적인 개입은 거의 없는 것으로 나타났다. 이런 유형의 해안선은 해양 해류의 영향과 조석 변동에 취약하여 해안선

이 더 큰 침식 위협에 직면할 수 있음을 의미한다.

## VI. 결론

본 연구에서는 과거 35년간의 두만강 해구의 해안선을 추출하고 그 변화를 모니터링하였다. 그 결과 연구 지역의 북쪽은 암석 해안선이 약 1.58km 감소하였고, 모래 안선이 약 1.81km 증가하였으며, 해구 안선은 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 연구 지역의 남쪽은 암석 해안선이 약 0.57km 감소하고 모래 해안선이 약 2.04km 감소하였으며 실트 해안선이 약 1.32km 감소하였다. 반면 인공해안선이 약 3.33km 증가하였다. 전체 연구 지역에서 35년 동안 약 60.84%의 해안선이 침식되었으며 평균 침식률이 약 0.61m/년이며 평균 침식 거리는 3.06m로 나타나고 침식 면적은 19.25ha로 확인되었다. 과거 35년 동안 연구 지역의 북쪽 해안선은 약 0.46m/년의 속도 육지로 향한 침식 현상이 나타나고 남쪽 해안선은 약 0.23m/년의 속도로 해양으로 향한 퇴적 현상을 나타냈다.

두만강 하구의 남북 방향의 해안선 변화가 차이가 큰 것으로 나타났다. 북쪽 해안선은 자연적 요인의 영향을 받으며 침식 해안선의 비율과 퇴적 해안선의 비율이 불균형하게 나타났다. 남쪽 해안선은 인위적 요인과 자연적 요인의 공동으로 영향 주며 침식과 퇴적 해안선의 비율이 상대적으로 균형을 이루고 있는 것으로 나타났다. 이것은 매립, 그리고 해안에서의 인공구조물 건설 및 기타 인간 활동의 영향 때문으로 사료된다. 이러한 활동은 종종 토지에 대한 개발과 사용 가능한 토지 면적을 늘리는 것을 목표로 하지만 동시에 자연 퇴적 과정을 변경하고 해안선의 동적 변화를 악화시킬 수 있다. 특히 해안 지역에서 이러한 인위적인 개입은 기존에 자연적으로 형성된 해안선을 사라지게 할 수 있으며, 조류 패턴을 변경하여 생태계와 해양 생물다양성에 장기적인 영향을 미칠 수 있다.



## 사사

본 연구는 National Natural Science Foundation of China (42276177)와 환경부의 재원을 지원받아 한국환경산업기술원 “신기후체제 대응 환경기술개발사업”의 연구개발을 통해 창출되었습니다. (2022003570004)

## References

- Aouiche, I., Daoudi, L., Anthony, E. J., Sedrati, M., Ziane, E., Harti, A., & Dussouillez, P. 2016. Anthropogenic effects on shoreface and shoreline changes: Input from a multi-method analysis, Agadir Bay, Morocco. *Geomorphology*, 254: 16-31.
- Baig, M. R. I., Ahmad, I. A., Shahfahad, Tayyab, M., & Rahman, A. 2020. Analysis of shoreline changes in Vishakhapatnam coastal tract of Andhra Pradesh, India: an application of digital shoreline analysis system (DSAS). *Annals of GIS*, 26 (4): 361-376.
- Chaudhry, M. H. 2008. Sediment Transport. *Open-Channel Flow*, 453-477.
- Chen, C., Fu, J., Zhang, S., & Zhao, X. 2019. Coastline information extraction based on the tasseled cap transformation of Landsat-8 OLI images. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 217: 281-291.
- Ding, Y., Yang, X., Jin, H., Wang, Z., Liu, Y., Liu, B., Zhang, J., Liu, X., Gao, K., & Meng, D. 2021. Monitoring Coastline Changes of the Malay Islands Based on Google Earth Engine and Dense Time-Series Remote Sensing Images. *Remote Sensing*, 13(19): 3842.
- Egbert, G. D., & Erofeeva, S. Y. 2002. Efficient Inverse Modeling of Barotropic Ocean Tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19 (2): 183-204.
- Hapke, C., Schwab, W., Gayes, P., McCoy, C., Viso, R., & Lentz, E. 2011. Inner Shelf Morphologic Controls on the Dynamics of the Beach and Bar System, Fire Island, New York. (In *The Proceedings of the Coastal Sediments 2011*). pp. 1034-1047.
- He, A., Huang, J., Sun, Z., Zhou, J., & Yang, C. 2023. Spatial and Temporal Evolution Characteristics of the Salween River Delta from 1973 to 2021. *Remote Sensing*, 15 (5): 1467.
- Himmelstoss, E.A., Henderson, R.E., Kratzmann, M.G., & Farris, A.S., 2018, Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.0 user guide: U.S. Geological Survey Open-File Report 2018-1179, 110 p., <https://doi.org/10.3133/ofr20181179>.
- Hou, X., Wu, T., Hou, W., Chen, Q., Wang, Y., & Yu, L. 2016. Characteristics of coastline changes in mainland China since the early 1940s. *Science China Earth Sciences*, 59 (9): 1791-1802.
- Hu, R., Yao, L., Yu, J., Chen, P., & Wang, D. 2021. Remote sensing of the coastline variation of the Guangdong-Hongkong-Macao Greater Bay Area in the past four decades. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(12), 1318.
- Hu, X., & Wang, Y. 2022. Monitoring coastline variations in the Pearl River Estuary from 1978 to 2018 by integrating Canny edge detection and Otsu methods using long time series Landsat dataset. *CATENA*, 209: 105840.
- Li, K., Zhang, L., Chen, B., Zuo, J., Yang, F., & Li, L. 2023. Analysis of China's

- Coastline Changes during 1990&ndash;2020. *Remote Sensing*, 15(4): 981.
- Liu, Y., Huang, H., Qiu, Z., & Fan, J. 2013. Detecting coastline change from satellite images based on beach slope estimation in a tidal flat. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 23: 165-176.
- Luan, H. L., Ding, P. X., Yang, S. L., & Wang, Z. B. 2021. Accretion-erosion conversion in the subaqueous Yangtze Delta in response to fluvial sediment decline. *Geomorphology*, 382: 107680.
- Mishra, M., Acharyya, T., Chand, P., Santos, C. A. G., Kar, D., Das, P. P., Pattnaik, N., Silva, R. M. d., & Nascimento, T. V. M. d. 2022. Analyzing shoreline dynamicity and the associated socioecological risk along the Southern Odisha Coast of India using remote sensing-based and statistical approaches. *Geocarto International*, 37 (14): 3991-4027.
- Mishra, M., Sudarsan, D., Kar, D., Naik, A. K., Das, P. P., Santos, C. A., & da Silva, R. M. 2020. The development and research trend of using DSAS tool for shoreline change analysis: a scientometric analysis. *Journal of Urban & Environmental Engineering*, 14(1).
- Mujabar, P. S., & Chandrasekar, N. 2013. Shoreline change analysis along the coast between Kanyakumari and Tuticorin of India using remote sensing and GIS. *Arabian Journal of Geosciences*, 6, 647-664.
- Mullick, M. R. A., Islam, K. A., & Tanim, A. H. 2020. Shoreline change assessment using geospatial tools: a study on the Ganges deltaic coast of Bangladesh. *Earth Science Informatics*, 13: 299-316.
- Natesan, U., Parthasarathy, A., Vishnunath, R., Kumar, G. E. J., & Ferrer, V. A. 2015. Monitoring longterm shoreline changes along Tamil Nadu, India using geospatial techniques. *Aquatic Procedia*, 4, 325-332.
- Sun M. H., Cai Y. L., Gu X. H., Wang X. L., & Qin P. 2019. Coastline remote sensing monitoring based on tidal law correction. *Remote sensing information (06)*:105-112.
- Ting, W., Xin-liang, X., & Qing, C. 2015. Extraction and accuracy evaluation of multi-temporal coastl-ines of mainland China since 1940s. *Marine Science*, 38(11): 66-73.
- Van Loon, A. J., Moretti, M., Tropeano, M., Acquafredda, P., Baldaconi, R., Festa, V., Lisco, S., Mastronuzzi, G., Moretti, V., & Scotti, R. 2017. Chapter 3 - Tracing the Source of the Bio/Siliciclastic Beach Sands at Rosa Marina (Apulian Coast, SE Italy). *Sediment Provenance*, 25-47.
- Zhang, X. 2013. Coastline extraction using remote sensing based on coastal type and tidal correction. *Remote Sensing for Natural Resources*, (4):91-97.
- Yao, X., Gao, Y., Du, Y., & Ji, M. 2013. Spatiotemporal changes of Hainan Island coastline in the past 30 years based on remote sensing technology. *Journal of Natural Resources*, 28(01): 114-25.