

식생지수 기반 식생 회복률과 종다양성 변화 분석을 통한 산림 복원 유형 도출

이준희* · 이선주** · 김경민***†

*국립산림과학원 국가산림위성정보활용센터 박사연구원, **국립산림과학원 국가산림위성정보활용센터 연구사,

***국립산림과학원 산림탄소연구센터 연구관

A study on the classification of forest ecological recovery types using vegetation index based vegetation recovery rate and shannon index

Lee, Junhee* · Lee, Sunjoo** and Kim, Kyoung-Min***†

*Ph.D. Researcher, National Institute of Forest Science, National Forest Satellite Information & Technology Center, National Institute of Forest Science, Seoul, Korea

**Research Officer, National Institute of Forest Science, National Forest Satellite Information & Technology Center, Seoul, Korea

***Senior Research Officer, National Institute of Forest Science, Forest Carbon Center On Climate Change, Seoul, Korea

ABSTRACT

This study aims to classify and analyze forest ecosystem recovery patterns in the regions of Busan and Gyeongsangnam-do, South Korea, that were affected by landslides caused by Typhoon Sanba in 2012. To evaluate both the structural and functional recovery of the forest ecosystems, we employed two complementary indicators: the Vegetation Recovery Rate (VRR), derived from time-series NDVI (Normalized Differenced Vegetation Index) data, and the Shannon Diversity Index, calculated from the 1st and 2nd national forest health management surveys. VRR quantified the recovery of vegetation cover based on NDVI changes before and after the disturbance, while the change in the Shannon Index represented functional recovery based on Shannon Index variation. Each indicator was interpreted using the median value as a relative threshold (VRR: 100.26%, Shannon Index difference: 0.1431), allowing spatial classification into four recovery types (A ~ D). Type A (high VRR and high Shannon Index difference) indicates full structural and functional recovery, while Type D (low VRR and low Shannon Index difference) signifies areas requiring priority ecological restoration. Spatial distribution patterns of recovery types revealed that Type A areas were concentrated in Ulsan and Miryang, whereas Type D areas were predominantly found in western Gyeongnam such as Hadong, Geochang, and Sancheong. This classification framework provides a basis for developing region-specific forest restoration strategies and highlights the necessity of integrating both remote sensing and field-based ecological indicators for comprehensive post-disaster assessment.

Key words : Landslide, Shannon Index, Satellite Image, Vegetation Index, Interpolation, Forest Restoration

1. 서론

최근 기후 변화가 심화되면서 폭우, 한파, 태풍, 가뭄 등 극단적인 이상기후 현상이 전 세계적으로 빈번하게 발생하고 있으며, 이는 자연재해 발생 빈도의 증가와 더불어

어 생태계 전반에 걸쳐 다양한 영향을 미치고 있다(Bae and Cho, 2013; Cha et al., 2023; Houghton et al., 2001). 우리나라 역시 예외는 아니며, 특히 산악 지형이 많은 한반도 남부 지역에서는 강우 집중도 상승과 함께 산사태와 같은 산림재해가 반복적으로 발생하고 있다. 산사태는 토

†Corresponding author : greenann@korea.kr (02455, National institute of Forest Science, 57, Hoegi-ro, Dongdaemun-gu, Seoul, Korea. Tel. +82-2-961-2939

ORCID 이준희 0009-0009-5532-3740
이선주 0000-0001-9175-6388

김경민 0000-0001-5146-126x

양의 이탈과 식생의 손실을 동반하며, 경사면의 물리적 안정성뿐만 아니라 산림 생태계의 구조적·기능적 균형을 동시에 붕괴시키는 복합적인 재해 유형이다(Crozier and Glade, 2005; Seo et al., 2024). 이에 따라 산사태 이후 생태계의 회복 수준을 면밀히 분석하고, 지역별 복원 전략을 과학적으로 수립하는 것이 중요한 과제로 부상하고 있다(Kim, 2020).

이와 같은 산림 재해 이후의 생태계 복원 평가는 그동안 위성 영상을 기반으로 한 정량적 모니터링 기법 중심으로 발전해왔다. 특히 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)와 같은 식생지수는 광범위한 지역의 식생 피복 변화 양상을 빠르게 추적할 수 있는 도구로 널리 활용되어 왔다(Abeysiriwardana and Gomes, 2022; Kim et al., 2021; Viet et al., 2021). 원격탐사(Remote Sensing, RS)는 높은 시계열 해상도와 공간 확장성, 비용 효율성 등의 장점을 바탕으로, 넓은 지역의 식생 상태를 지속적으로 관측하고 재해 전후의 변화를 정량화하는 데 매우 효과적인 수단으로 평가된다(Dahigamuwa and Gunaratne, 2016; He and Beighley, 2008; Huabin et al., 2005; Lee et al., 2024). 특히 Landsat, Sentinel 등 공공 위성 영상의 장기 아카이브는 대규모 산림 재해 이후의 회복 과정을 장기적으로 추적할 수 있게 해준다. 이러한 배경에서 NDVI 기반의 시계열 분석을 통해 피해 전후의 식생 회복률을 추정하는 방식은 구조적 회복(vegetation cover recovery)을 정량화하는 데 유용하며, 많은 관련 연구들이 이러한 방법론을 기반으로 산불, 태풍, 산사태 등의 영향 분석에 적용되어 왔다(Ehammer et al., 2010; Gomes et al., 2020; Sim et al., 2020).

그러나 NDVI와 같은 단일 식생지수는 식생의 양적 복원에는 민감하지만, 질적 복원까지는 반영하기 어렵다는 한계를 가진다. 생태계의 기능적 회복은 종 구성의 균형, 상호작용의 안정성, 종 사이의 기능적 다양성 등 보다 복합적인 속성을 포함하며, 이러한 기능적 회복 수준은 Shannon Index와 같은 생태 지표를 통해 보완적으로 평가될 수 있다(Lee et al., 2018). Shannon Index는 원래 정보이론 분야에서 무작위성(엔트로피)을 측정하기 위해 고안된 지표로(Shannon, 1948), 데이터의 불확실성과 다양성을 수량화하는 데 사용되었다. 이후 생태학 분야에서는 이를 군집 내 종의 비희일성과 균등성을 정량화하는 데 적용하면서, 대표적인 종다양성 지표로 자리 잡았다(Magurran, 2004). 본 연구에서는 Shannon Index의 특성을 활용하여, 산사태 피해지의 종다양성 변화를 평가하는

데 적용하였다. 다양한 생태 복원 연구에서는 Shannon Index가 높은 지역일수록 외부 교란 이후 빠르게 종 구성이 회복되며, 생태계의 에너지 흐름과 기능적 연결성이 유지되어 보다 안정적인 천이가 가능함을 보고하고 있다(Chazdon, 2005). 이는 단순한 피복 회복보다 생물학적 구성의 복원이 장기적 생태 안정성에 더 밀접한 영향을 미친다는 점을 시사한다.

따라서 NDVI와 같은 위성 기반 식생지수에 Shannon Index를 결합하여 구조적 회복과 기능적 회복을 동시에 평가하는 접근은 생태계 복원 연구의 새로운 방향성을 제시할 수 있다. 그러나 이러한 통합적 접근은 국내외에서도 아직 제한적으로만 이루어지고 있으며, 특히 산사태 피해 지역을 대상으로 한 구조·기능 통합 회복 평가 사례는 매우 드물다. 이에 본 연구는 2012년 제16호 태풍 산바에 의해 산사태 피해가 발생한 경상남도 및 부산광역시 지역을 대상으로 Landsat 위성 영상 기반 NDVI를 활용해 식생 회복률(VRR)을 산정하고, 현장 기반 Shannon Index와의 공간적 관계를 분석함으로써, 산림 생태계의 구조적·기능적 회복 수준을 통합적으로 진단하고 복원 우선지역 도출에 기여하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1. 연구 개요

본 연구는 2012년 제16호 태풍 산바로 인해 산사태 피해를 입은 부산광역시 및 경상남도 지역을 대상으로 하였다. 피해 이후 산림 생태계의 구조적 회복과 기능적 회복 수준을 통합적으로 진단하고, 공간적 회복 유형을 분류하기 위해 위성 영상 기반 식생 회복률(Vegetation Recovery Rate, VRR)과 현장 조사 기반 Shannon Index를 주요 지표로 활용하였다.

VRR은 Landsat 위성영상에서 산출한 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)의 시계열 변화를 기반으로 산정되며, 식생 피복의 양적 회복 수준을 반영한다. 반면, Shannon Index는 국립산림과학원의 산림 건강·활력도 조사(Forest Health Management, FHM) 데이터를 바탕으로, 종 구성의 다양성과 균등도를 반영하는 질적 생태 회복 지표이다.

두 지표는 각각 구조적 회복과 기능적 회복을 나타내는 보완적 특성을 가지며, 이들을 통합하여 회복 유형을 4가지(A~D)로 구분하고 유형별 복원 전략을 제안하는 것을

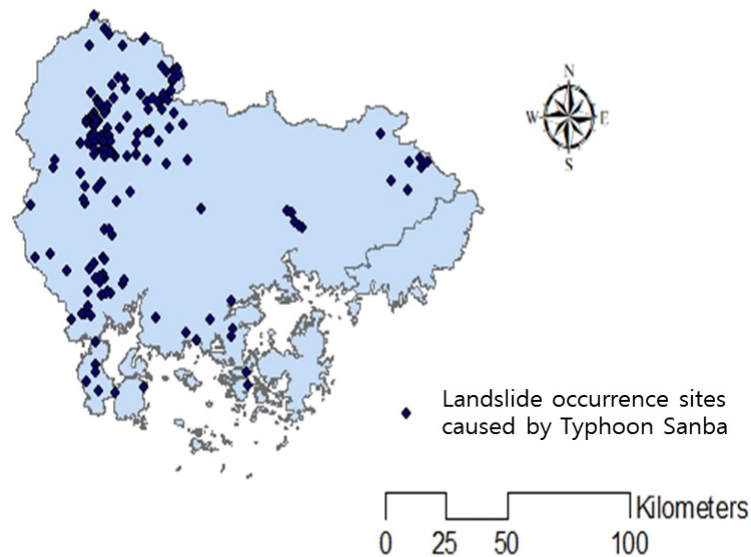


Fig. 1. Landslide distribution caused by Typhoon Sanba (National Disaster Management Research Institute, 2017)

본 연구의 주요 목적 중 하나로 설정하였다.

2.2. 연구 대상지 및 산사태 발생 위치정보

본 연구의 대상지는 부산광역시와 경상남도 지역으로, 한반도 남동부에 위치하며 산림이 밀집된 대표적인 산지 지형을 포함하고 있다. 이 지역은 경사도가 높고 계류가 발달한 복잡한 지형 구조로 인해 산사태 발생에 취약한 특성을 지니며, 특히 여름철 집중호우 시 반복적으로 산림재해가 발생해 왔다. 분석에 활용된 대상지는 2012년 제16호 태풍 ‘산바(Sanba)’의 영향으로 산사태 피해가 발생한 총 165개소이다.

2.3. Shannon Index 산정 및 공간화

본 연구에서는 산림 생태계의 기능적 회복 정도를 평가하기 위해 Shannon Index를 활용하였다. 해당 지수는 국립산림과학원에서 수행한 제1차(2011~2015년) 및 제2차(2016~2020년) 「산림의 건강·활력도 조사(Forest Health Management, FHM)」 자료를 활용하였다. FHM 조사는 「제5차 산림기본계획(2008~2017)」에 근거하여 전국 4,000개 고정 표본점 중 일부를 대상으로 5년 주기로 반복 조사되며, 산림의 구조적·기능적 건강성 평가를 위한 국가 단위 기초자료로 수집된다(National Institute of Forest Science, 2015). 본 연구에서는 이 중 식생건강 항목에 포함된 Shannon Index를 주요 분석 지표로 활용하였

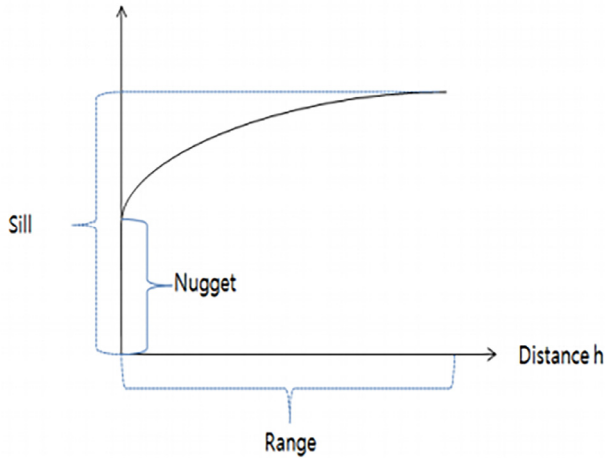
다. Shannon Index는 식 (1)과 같이 계산된다(Shannon, 1948).

$$H' = - \sum_{i=1}^S p_i \log p_i \tag{1}$$

여기서 p_i 는 i 번째 종의 상대 빈도, S 는 출현 종 수이다. 이 지수는 종의 풍부도와 균등도를 동시에 고려하며, 생물다양성의 핵심 지표로 활용되어 왔다(Das et al., 2012; Zhao et al., 2022). 점 형태로 산출된 Shannon Index를 공간적으로 확장하기 위해 Ordinary Kriging 기법을 적용하였다. Kriging은 공간적 자기상관성을 기반으로 미측정 지점을 예측하는 통계적 보간법으로, Spherical 모델 기반 Semi-variogram을 사용하여 베리오그램을 구축하고 예측가중치를 산정하였다(Choi and Kim, 2015; Goovaerts, 1997; Kim et al., 2014). Ordinary Kriging의 식은 식 (2)와 같다.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [z(x_i) - (x_i + h)]^2 \tag{2}$$

식 (2)에서 h 는 분리 거리(lag distance)로 두 자료 간의 거리를 의미하고, n 은 분리된 거리만큼 떨어진 샘플자료 쌍의 개수를 나타내며 $\gamma(h)$ 는 베리오그램값, z 는 주변수를 나타낸다.



- Range: the maximum distance over which spatial autocorrelation persists; beyond this distance, the variogram levels off and points are effectively uncorrelated.
- Sill: the variogram value at which it stops increasing (the plateau/asymptote), representing the total variance.
- Nugget: the initial variogram value at zero lag distance, reflecting measurement error and/or micro-scale spatial variability.

Fig. 2. Concept of semi-variogram (Choi et al., 2015)

Ordinary Kriging에서 사용되는 핵심 파라미터는 Fig. 2와 같다.

2.4. NDVI 기반 식생 회복률(VRR) 산정

산림 생태계의 구조적 회복 수준을 정량화하기 위해 NDVI 시계열 변화를 활용한 식생 회복률(VRR)을 산정하였다. NDVI는 Landsat 위성영상의 근적외선(NIR)과 가시광선 적색(Red) 밴드의 반사율 차이를 활용하여 식생 활력도를 나타내는 지수로, 식 (3)과 같이 정의된다(Bannari et al., 1995; Huete, 1988).

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (3)$$

본 연구에서는 Google Earth Engine (GEE)을 활용하여 Landsat 영상의 시계열 NDVI 값을 산출하였으며, QA_PIXEL 밴드를 활용하여 구름 및 그림자와 같은 대기 간섭 요소를 제거한 뒤, 각 시점별로 NDVI 중앙값 (median composite)을 합성하였다(Zhu & Woodcock, 2012).

식생 회복률(VRR)은 NDVI의 세 시점 값(NDVI_{pre}, NDVI_{min}, NDVI_t)을 기준으로 식 (4)와 같이 산정된다 (Jiang et al., 2015; Yuan et al., 2022).

$$VRR = \frac{NDVI_{pre} - NDVI_{min}}{NDVI_t - NDVI_{min}} \times 100 \quad (4)$$

NDVI_{pre}: 산사태 피해 이전 정상 식생상태를 나타내는 NDVI (2012년 5~9월)

NDVI_{min}: 산사태 직후 식생 손실이 극대화된 시점의 NDVI (2012년 9~11월)

NDVI_t: 산사태 이후 수년이 지난 회복 시점의 NDVI (2017년 8~10월)

이 식은 피해 직후 식생이 얼마나 손실되었는지를 기준으로, 회복 시점의 식생 상태가 원래 상태에 얼마나 근접했는지를 백분율로 표현하며, 아래와 같이 값을 해석할 수 있다(Table 1).

분석 대상 전체에 대해 VRR을 산출한 후, 각 픽셀 또는 피해지 단위에서의 상대적 회복 수준을 비교하기 위해 VRR 전체 값의 중앙값(100.26%)을 기준으로 고회복 지역과 저회복 지역으로 구분하였다. 이와 같은 중앙값 기반의 회복 구분 방식은 NDVI 회복 유형 분류에 있어 이상치에 대한 민감도를 줄이고, 상대적 회복 수준을 균형 있게 평가할 수 있다는 장점이 있다(Frolking et al., 2009; Yuan et al., 2022).

Table 1. Analysis of absolute vegetation recovery rate ranges

VRR Range	Interpret
VRR ≈ 100%	100%: NDVI has returned to pre-disturbance levels → Structural vegetation recovery completed
VRR < 0%	NDVI declined further compared to the immediate post-disturbance period → Indicates additional disturbance or prolonged degradation
VRR > 100%	NDVI at the time of recovery is higher than the pre-disturbance level → Indicates overcompensation or external reforestation
VRR = 0%	No recovery observed (NDVI remains at post-disturbance level)

2.5. 회복 유형 분류 기준 및 의미

NDVI 기반 식생 회복률(VRR)과 Shannon Index 변화량이라는 두 지표를 통합하여 각 산사태 피해지의 생태 회복 유형을 분류하였다. 분류 기준은 두 지표의 중앙값을 기준으로 상·하 구간으로 구분하여, 총 4가지 유형(A~D)으로 나누었다. 중앙값을 기준으로 회복 수준을 분류하는 접근은 생태계의 이질성과 지역 간 회복 속도의 상이함을 반영하기 위한 방법론으로, 복구 현황이 비선형적이고 국지적 영향을 받는 산림 복원 연구들에서 정규 분포를 가정하기 어려운 경우에 널리 사용되어 왔다(Jiang et al., 2015; Yang et al., 2017; Zhao et al., 2022).

A 유형은 VRR과 Shannon Index 변화량 모두 중앙값 이상인 지역으로, 구조적 회복과 기능적 회복이 모두 양호한 상태로 판단된다. 반대로, D 유형은 두 지표 모두 중앙값 미만인 지역으로, 구조적 손상과 기능적 불균형이 동시에 발생한 복원 우선 개입 대상지로 해석된다.

B 유형은 NDVI 회복은 이루어졌지만 Shannon Index 값은 감소한 지역으로, 식생 피복은 회복되었으나 단일종 우점화나 외래종 확산 등의 문제가 존재할 가능성이 있다(Hooper et al., 2005).

C 유형은 NDVI는 회복되지 않았지만 Shannon Index는 증가한 지역으로, 종 구성은 양호하나 식생 피복의 회복이 지연되고 있는 상태로, 자연천이 유도되거나 외부 식생 도입을 통해 구조적 회복을 유도할 수 있는 가능성을 내포한다(Prach and Hobbs, 2008).

D 유형은 두 지표 모두 낮은 경우로, 회복이 전반적으로 지연되고 있으며 복원 개입이 필요한 지역으로 판단된다(SER, 2004).

이와 같은 회복 유형 분류는 NDVI와 Shannon Index라는 이질적인 정보를 통합하여 산림 생태계의 회복 상태를 입체적으로 진단할 수 있게 하며, 지역별 복원 우선순위를 과학적으로 설정하는 데 기여할 수 있다.

3. 연구결과

3.1. 식생 회복률(VRR) 분석

산사태 발생 이후의 구조적 회복 수준을 평가하기 위해 Landsat 시계열 NDVI 기반으로 산정한 식생 회복률(VRR)을 분석한 결과, 대상지 대부분에서 회복이 일정 수준 이상 진행된 것으로 나타났다(Fig. 3). 전체 분석 지점의 VRR 값은 -100%에서 120%의 범위를 보였으며, 중앙값은 100.26%로 확인되었다. 이는 상당수 지역에서 피해 직전의 NDVI 수준에 근접하거나 초과한 회복이 이루어졌음을 의미한다.

특히, 경상남도 동부의 산악지대 및 일부 해안 산지에서는 VRR이 100%를 초과하는 지역들이 분포하였으며, 이는 단순한 식생 피복 회복을 넘어 인위적 식생 개입이나 교란 후 우점종 치환 등의 가능성을 시사할 수 있다. 반면, 하동, 산청, 함천 등 남서부 산림 지역에서는 VRR이 0% 이하로 낮아, 회복이 지연되거나 식생이 원상태로

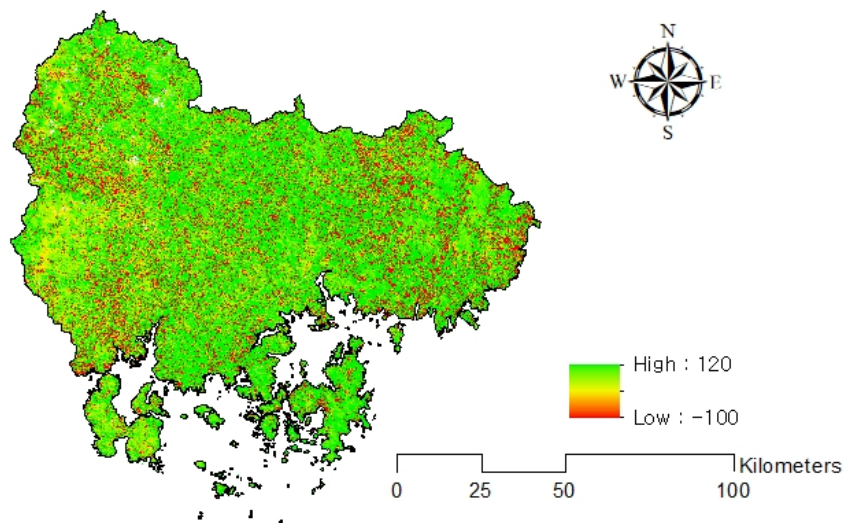


Fig. 3. Vegetation recovery rate in Busan and Gyeongsangnam-do region

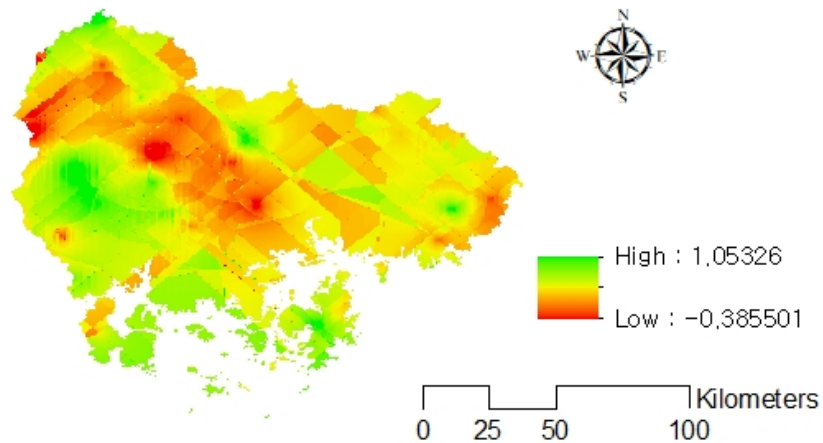


Fig. 4. Spatial analysis of changes in species diversity using ordinary kriging

복귀하지 못한 양상이 관찰되었다.

공간적 분포를 살펴보면, 회복률은 지형 조건 및 인위적 접근성에 따라 상이한 패턴을 보였다. 접근이 용이하고 비교적 완만한 경사지에서는 VRR이 높게 나타난 반면, 해발고도가 높고 경사가 급한 지역에서는 낮은 회복률을 보였다. 이는 복원 속도가 지형적 특성과 밀접하게 연관되어 있음을 나타내며, 복원 전략 수립 시 이러한 지형 요소를 고려한 공간 기반 접근이 필요함을 시사한다.

3.2. Shannon Index 변화량 공간 분석

Shannon Index 기반의 종다양성지수는 제1차 산림 건강·활력도 조사자료(2011~2015년)와 제2차 자료(2016~2020년)를 바탕으로 Ordinary Kriging 기법을 활용해 공간적으로 보간되었으며, 두 시점 간의 차이를 통해 종다양성 변화량을 산출하였다(Fig. 4). 이를 통해 산사태 이후 산림 생태계의 기능적 회복 수준을 공간적으로 진단할 수 있었다.

모델의 예측 정확도를 평가한 결과, 전체 38개 검증 샘플 기준으로 제1차 산림의 건강활력도는 평균 예측 오차(ME)는 0.0016, 평균 표준 오차는 약 0.73, RMSE는 약 0.70, 제 2차 산림의 건강활력도는 평균 예측 오차(ME)는 0.0012, 평균 표준 오차는 약 0.68, RMSE는 약 0.70으로 나타나, 실제 관측값과 비교하여 전반적으로 유사한 수준의 변동성을 유지하는 예측 결과로, 해당 보간 결과가 통계적으로 안정적이라고 판단된다.

Semi-variogram 분석 결과에서도, 짧은 거리에서는 낮은 반분산 값을 보이다가 거리가 증가함에 따라 완만히

상승 후 안정화되는 전형적 형태가 확인되었다. 반분산 값은 지점 간 값 차이의 평균적 크기를 의미하며, 이는 가까운 지점일수록 Shannon Index 변화가 유사하고 일정 거리 이상에서는 공간적 자기상관성이 소멸함을 보여준다. 이러한 결과는 Ordinary Kriging 적용의 타당성을 뒷받침한다(Goovaerts, 1997)(Fig. 5, 6).

다만, 경험 베리오그램과 이론 베리오그램 간의 차이가 일부 구간에서 크게 나타나 Kriging 결과의 공간 분포에 불연속적 양상이 발생할 수 있었다. ArcGIS Geostatistical Analyst 모듈은 weighted least squares (WLS) 방식(Cressie, 1985)을 적용해 range, sill, nugget을 최적화하는데, 본 연구에서는 spherical 모델을 사용하였으며, 이 절차를 통해 전반적인 추세는 안정적으로 적합되었음을 확인하였다. 이러한 한계를 고려하여, 본 연구에서는 Kriging 결과를 절대적 공간 추정값으로 해석하기보다는 종다양성의 상대적 변화 경향과 분포 패턴을 파악하기 위한 보조적 도구로 활용하였다. 또한 Fig. 5와 Fig. 6에서 나타나는 일부 오차는 결과 해석에 미치는 영향이 제한적임을 확인하였다.

분석 결과, 일부 지역에서는 Shannon Index가 증가한 반면, 전체적으로는 감소 경향이 우세하였다. 특히 부산 북부 및 경남 서부 및 중부 산림에서는 종 구성의 단순화 혹은 Shannon Index 의 저하가 두드러졌다. Shannon Index가 감소한 지역은 외래종 확산이나 특정 우점종의 지배와 같은 요인과 연관될 가능성이 있으며(Hooper et al., 2005), 지속적인 교란 또한 종 구성 단순화를 초래할 수 있다는 점이 본 연구에서 보고된 바 있다(Tilman et al., 1997).

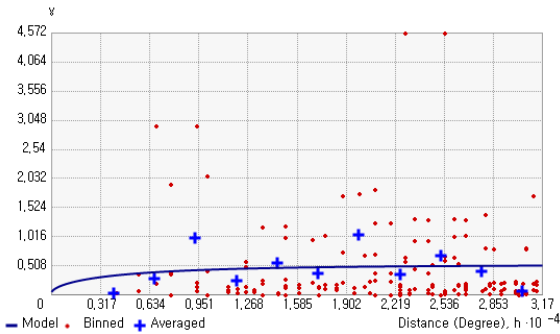


Fig. 5. Semivariogram of species diversity index from the 1st forest health management survey (Ordinary Kriging)

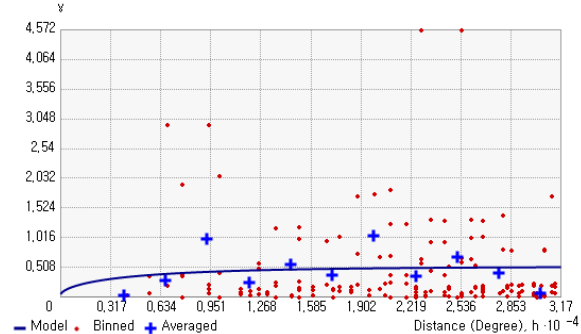


Fig. 6. Semivariogram of species diversity index from the 2nd forest health management survey (Ordinary Kriging)

이러한 결과 해석을 보다 정량화하기 위해, 본 연구에서는 공간화값의 중앙값(0.1431)을 기준으로 기능 회복 수준을 다음과 같이 상대적으로 평가하였다.

- Shannon Index 변화량 ≥ 0.1431 : 기능적 회복이 상대적으로 진전된 지역으로 간주, 종다양성이 피해 이전 수준 이상으로 회복되었거나 안정적인 생물다양성 구조가 유지되고 있는 지역
- Shannon Index 변화량 < 0.1431 : 기능적 회복이 저조하거나 종다양성이 오히려 감소한 지역으로, 생태계 내 종 구성의 불균형이나 외부 교란 요인이 지속되고 있을 가능성 존재

이와 같은 중앙값 기준 구분은 절대적 해석의 한계를 보완하며, 광범위한 산림 지역에서의 기능 회복 경향을 비교 분석하는 데 효과적인 기준으로 작용한다. 실제로 Shannon Index의 중앙값을 기반으로 한 상대적 회복 수준 분류는 종다양성 변화에 따른 산림 건강도 진단에 있어 중요한 지표로 활용될 수 있다.

3.3. 식생회복률과 Shannon Index 변화량 공간 분석 기반의 생태 회복 유형 분류

본 연구에서는 위성 기반 식생 회복률(VRR)과 기능적 회복 지표인 Shannon Index 변화량을 결합하여, 총 165개 산사태 피해 포인트에 대해 생태계 회복 유형을 4가지로 분류하였다. 이 분석 결과를 행정구역 단위(총 15개 시군)로 집계하여 지역별 공간적 특성을 해석하였다. 유형 분류는 VRR과 Shannon Index 변화량의 중앙값을 기준으로 하여 상대적 회복 수준을 판단하였으며, 이를 기반으로

회복 유형 A ~ D로 구분하고, 그에 맞는 관리방향을 제시하였다. 유형별 관리방향 제시는 선행 연구사례를 참고하여 제시하였다(Fig. 7, Table 2).

시,군 단위로 분석 결과, A 유형(구조적·기능적 회복이 모두 양호한 구역)은 하동군(5개소)에서 가장 많이 나타났으며, 이는 상대적으로 식생 피복과 종다양성 회복이 모두 양호한 지역으로, 모니터링 중심의 유지 관리가 바람직한 지역으로 판단된다(Frolking et al., 2009).

B 유형(NDVI는 회복되었으나 Shannon Index가 저화된 구역)은 거창군(16개소)과 합천군(14개소)에서 특히 높은 비율로 분포하였다. 이 유형은 외견상 NDVI 기반 구조적 회복은 진전되었으나 종 구성의 다양성은 낮아진 지역으로, 단일종 우점화나 외래종 확산 가능성이 제기된다. 따라서 생물다양성 복원 및 기능적 안정성 확보를 위한 추가 조치가 필요한 지역이다(Hooper et al., 2005).

C 유형(구조적 회복은 낮으나 기능적 회복이 상대적으로 양호한 구역)은 하동군(10개소), 산청군(8개소), 합천군(4개소) 등지에서 확인되었다. 이들은 식생 피복의 회복은 지체되고 있으나 종다양성은 유지되거나 오히려 증가하고 있어, 자연천이 유도 또는 외부 식생 지원을 통해 회복이 기대되는 지역으로 해석된다(Prach and Hobbs, 2008).

반면, D 유형(구조·기능 모두 저조한 회복 수준)은 거창군(21개소), 합천군(13개소), 산청군(9개소) 등 경남 서부 산림지대에서 집중적으로 나타났으며, 식생 피복과 종다양성 모두 저조한 상태로, 우선적인 복원 개입이 요구되는 핵심 관리 대상지로 분류된다(SER, 2004).

이러한 분류 결과는 단순한 NDVI 기반 구조적 회복만으로는 산림 생태계 전반의 복원력을 충분히 진단할 수 없음을 시사하며, 기능적 회복 요소인 종다양성 변화량

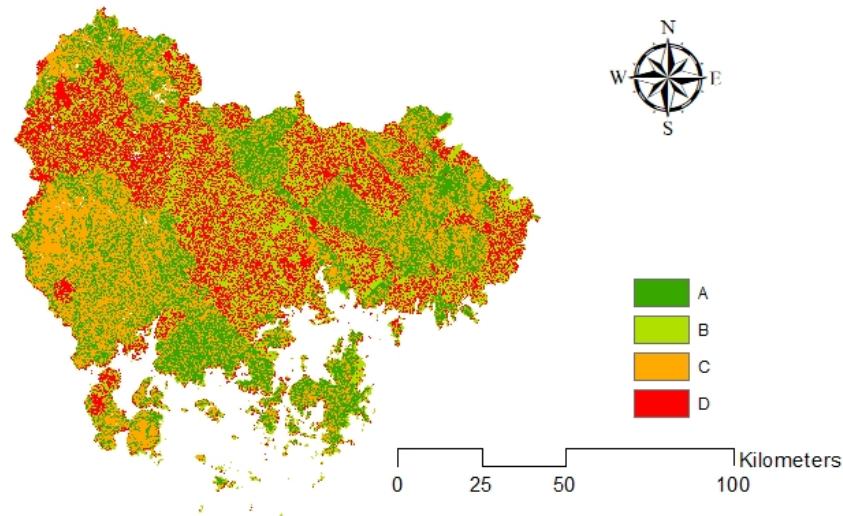


Fig. 7. Results of ecological recovery type classification based on spatial analysis of vegetation recovery rate and changes in species diversity

Table 2. Classification of ecological recovery types based on vegetation recovery rate (VRR) and changes in Shannon Index

Type	VRR Trend	Shannon Index Change Trend	Ecological Interpretation	Management Strategy
Type A	High (↑) : ≥ 100.26	High (↑) : ≥ 0.1431	Both structural and functional recovery are favorable	Monitoring-based maintenance: minimize artificial intervention, conduct periodic remote sensing-based observation (Frolking et al., 2009)
Type B	High (↑) : ≥ 100.26	Low (↓) : < 0.1431	Structural recovery observed, but biodiversity not fully restored (potential dominance of a single species)	Promote biodiversity: introduce native species, implement biodiversity restoration programs (Hooper et al., 2005)
Type C	Low (↓) : < 100.26	High (↑) : ≥ 0.1431	Vegetation cover recovery is delayed, but species composition remains favorable	Facilitate succession: promote natural succession or support structural recovery through assisted revegetation (Prach and Hobbs, 2008)
Type D	Low (↓) : < 100.26	Low (↓) : < 0.1431	Both structural and functional recovery are insufficient	Priority restoration required: afforestation, biodiversity enhancement, soil improvement, and multidimensional restoration strategies (SER, 2004)

(Shannon Index 변화량)을 병행 고려해야 함을 강조한다. 또한 유형별 공간 분포 차이는 지형적 요인, 교란 강도, 과거의 산림 관리 여부 등의 복합적인 영향에 따라 달라지는 회복 양상을 반영하는 것으로 판단된다.

4. 결론 및 고찰

본 연구는 2012년 제16호 태풍 산바로 인해 산사태 피

해가 발생한 부산·경남 지역을 대상으로, 구조적 회복을 의미하는 위성 기반 식생 회복률(VRR)과 기능적 회복을 의미하는 Shannon Index의 변화를 분석함으로써 산림 생태계 회복 유형을 다차원적으로 분류하고자 하였다. 기존 생태계 회복 평가가 위성 영상 기반 식생지수에만 치중되었던 한계를 극복하고자, 본 연구는 현장 조사 기반의 생태지표와 위성 영상의 융합 분석을 시도하였다.

우선, 위성 영상 기반 NDVI를 활용한 VRR 분석을 통

해 산사태 피해 이후 식생 회복의 구조적 회복 수준을 정량화하였다. VRR은 식생이 피해 이전 상태로 회복되었는지, 혹은 피해 직후보다 악화되었는지를 명확히 보여주는 지표로 기능하며, NDVI 시계열 변화율을 기반으로 산정되었다. 전체 분석 결과, VRR 값은 대부분 양(+)의 범위에 있었으며, 일부 지역에서는 100%를 초과하는 초과 회복 양상도 관찰되었다. 이는 외부 인위적 식재나 조림 활동 등의 개입 가능성을 시사하며, 반드시 생태적 복원을 의미하지는 않을 수 있다. 반면, VRR 값이 0 이하로 나타난 지역은 식생 회복이 피해 직후 수준에도 미치지 못하는 것으로, 지속적인 교란이나 회복 지연 현상이 존재하는 지역으로 해석된다.

그러나 이러한 해석은 절대적 기준에 의존하는 한계를 가지므로, 본 연구에서는 VRR 전체 값의 중앙값(100.26%)을 기준으로 회복 수준을 상대적으로 구분하였다. 이에 따라, VRR이 중앙값 이상인 지역은 '상대적 고 회복 지역', 중앙값 미만인 지역은 '상대적 저회복 지역'으로 정의하였다. 이러한 기준은 NDVI 기반 회복 해석에 있어 중앙값을 활용한 선행연구(Frolking et al., 2009; Yuan et al., 2022)를 참고하여 설정되었으며, 광범위한 생태계 교란지에서의 회복 수준 분류에 유효한 접근으로 평가된다.

이와 함께, Shannon Index의 변화는 생태계의 기능적 회복 수준을 나타내는 지표로 활용되었다. Shannon Index의 증가는 생물 종 구성의 균형성과 다양성이 회복되고 있음을 나타내며, 종다양성이 높아질수록 생태계의 안정성과 회복력이 강화된다는 생태학적 기반에 근거하였다(Das et al., 2012; Zhao et al., 2022). 본 연구에서는 제1차(2011~2015년) 및 제2차(2016~2020년) 산림 건강·활력도 조사를 활용하여 각 시기의 Shannon Index를 구축한 뒤, 이를 통해 변화량을 산출하였다.

두 지표(VRR, Shannon Index 변화량)를 결합하여 산출된 4개 유형(A~D)의 공간적 분포는 향후 산림 복원 전략 수립에 있어 과학적 기준을 제공한다. 예를 들어, 합천군과 거창군은 VRR이 중앙값 미만, Shannon Index 변화량은 중앙값 이상인 Type C 유형으로 분류되었으며, 이는 식생 회복은 더딘 반면 생물다양성은 상대적으로 회복된 상태로, 자연천이 유도 또는 외부 식생 도입과 같은 중재가 요구되는 지역이다. 반면, 대부분의 피해지는 VRR과 Shannon Index 변화량 모두 중앙값 이상인 Type A 유형으로 분류되어, 구조·기능 양측면에서 회복이 양호하게 진행된 지역으로 평가되었다.

또한, 본 연구에서 제시한 Kriging 기반 종다양성 공간 분포도는 조사구 수의 제한성과 분포의 불균등성으로 인해 경험 베리오그램과 이론 베리오그램 간의 오차가 일부 존재한다. 따라서 본 연구에서는 이를 절대적 공간 추정 값으로 해석하기보다는, 종다양성의 상대적 변화 경향과 분포 패턴을 확인하기 위한 보조적 도구로 활용하였다.

본 연구의 한계점은 NDVI 기반의 VRR 산정은 피복 회복의 양적 지표에 기반하므로, 실제 수종 구성이나 군집 구조의 질적 회복까지는 반영하지 못한다. NDVI가 높더라도 단일종이 우점하거나 외래종이 식생을 대체할 경우 생태계 안정성은 낮을 수 있다.

또한, Sentinel-2와 같은 고해상도 시계열 영상과 LiDAR, UAV 데이터 등을 결합하여 시공간적으로 더 정밀한 분석이 요구되며, 외부 인위적 조림이나 산림정책 개입 여부에 따른 회복 패턴의 차이도 정성적 자료와 함께 분석될 필요가 있다.

그럼에도 불구하고 본 연구는 산사태 피해지 복원 현황을 구조적·기능적 관점에서 구분하고, 유형별 대응 전략을 제시함으로써, 복원 우선순위 설정 및 생태계 기반 산림정책 수립에 기여할 수 있는 통합적 접근을 제시했다는 점에서 학술적 및 실무적 의의가 있다.

사사

본 연구는 국립산림과학원의 산림재해 상시감시 및 생태계 모니터링을 위한 농림위성 융합산출물 개발(FM0103-2021-02-2025) 지원 연구과제에 의해 이루어진 것임.

Reference

- Abeyasiriwardana HD, Gomes PI. 2022. Integrating vegetation indices and geo-environmental factors in GIS-based landslide-susceptibility mapping: Using logistic regression. *J Mountain Sc* 19(2): 477-492. doi: 10.1007/s11629-021-6988-8
- Bae MK, Cho TH. 2013. The capability strengthen strategies and energy substitution effect of forestry sectors as climate change response mechanism: Focused on woody biomass (in Korean with English abstract). *J Korean Inst For Recreat* 17(1): 87-96.

- Bannari A, Morin D, Bonn F, Huete A. 1995. A review of vegetation indices. *Remote Sens Rev* 13(1-2): 95-120. doi: 10.1080/02757259509532298
- Cha S, Lim CH, Hong M, Lim J, Lee WK. 2023. Landslide vulnerability assessment based on climate change scenarios using the maximum entropy (Maxent) model. *J Clim Change Res* 14(2): 145-156. doi: 10.15531/KSCCR.2023.14.2.145
- Chazdon RL. 2008. Beyond deforestation: Restoring forests and ecosystem services on degraded lands. *Science* 320(5882): 1458-1460. doi: 10.1126/science.1155365
- Choi JH, Kim BJ. 2015. A study for applicability of cokriging techniques for estimating the real transaction price of land (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Geospatial Inf Sci* 23(1): 55-63.
- Choi SB, Parreno G, Kim KK, Kang CW. 2015. A study on imputation for missing data using the kriging. *J Korean Data Anal Soc* 17(6): 2857-2866.
- Crozier MJ, Glade T. 2005. Landslide hazard and risk: issues, concepts and approach. In: Glade T, Anderson MG, Crozier MJ (eds). *Landslide hazard and risk*. Chichester, UK: John Wiley & Sons. p. 1-40. doi: 10.1002/9780470012659.ch1
- Cressie, N. 1985. Fitting variogram models by weighted least squares. *Math Geol* 17(5): 563-586. doi: 10.1007/BF01991593
- Dahigamuwa TY, Gunaratne M. 2016. Feasibility study of land cover classification based on normalized difference vegetation index for landslide risk assessment. *Geosciences* 6(4): 45. doi: 10.3390/geosciences6040045
- Dale VH, Joyce LA, McNulty S, Neilson RP, Ayres MP, Flannigan MD, Wotton BM. 2001. Climate change and forest disturbances: climate change can affect forests by altering the frequency, intensity, duration, and timing of fire, drought, introduced species, insect and pathogen outbreaks, hurricanes, windstorms, ice storms, or landslides. *BioScience* 51(9): 723-734. doi: 10.1641/0006-3568(2001)051[0723:CCAFD]2.0.CO;2
- Das P, Das RK, Baruah CK. 2012. Shannon diversity index (H) as an ecological indicator of environmental pollution – A GIS approach. *Int J Environ Sci* 3(1): 997-1006. doi: 10.5958/j.2231-1742.2.1.003
- Ehammer A, Fritsch S, Conrad C, Lamers J, Dech S. 2010. Statistical derivation of fPAR and LAI for irrigated cotton and rice in arid Uzbekistan by combining multi-temporal RapidEye data and ground measurements. In: *Proceedings volume 7824, remote sensing for agriculture, ecosystems, and hydrology XII*. p. 66-75. doi: 10.1117/12.864796
- Frolking S, Palace M, Clark DB, Chambers JQ, Shugart HH, Hurtt GC. 2009. Forest disturbance and recovery: a general review in the context of spaceborne remote sensing of impacts on aboveground biomass and canopy structure. *J Geophys Res Biogeosci* 114(G2). doi: 10.1029/2008JG000911
- Gomes P, Aththanayake U, Deng WL, Zhao W, Jayathilaka T. 2020. Ecological fragmentation two years after a major landslide: correlations between vegetation indices and geo-environmental factors. *Ecol Eng* 153: 105914. doi: 10.1016/j.ecoleng.2020.105914
- Goovaerts P. 1997. *Geostatistics for natural resources evaluation*. New York, NY: Oxford University Press.
- He Y, Beighley RE. 2008. GIS-based regional landslide susceptibility mapping: A case study in southern California. *Earth Surf Process Landf* 33(3): 380-393. doi: 10.1002/esp.1562
- Hooper DU, Chapin FS, Ewel JJ, Hector A, Inchausti P, Lavorel S, Wardle DA. 2005. Effects of biodiversity on ecosystem functioning: A consensus of current knowledge. *Ecol Monogr* 75(1): 3-35. doi: 10.1890/04-0922
- Houghton JT, Ding Y, Griggs DJ, Noguer M, van der Linden PJ, Dai X, Maskell K, Johnson CA. 2001. *Climate change 2001: the scientific basis*. Cambridge, UK: The Press Syndicate of the University of Cambridge. p. 881-889.
- Huabin W, Gangjun L, Weiya X, Gonghui W. 2005. GIS-based landslide hazard assessment: An overview. *Prog Phys Geogr* 29(4): 548-567. doi: 10.1191/030913

- 3305pp462ra
- Huete AR. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sens Environ* 25(3): 295-309. doi: 10.1016/0034-4257(88)90106-X
- Jiang WG, Jia K, Wu JJ, Tang ZH, Wang WJ, Liu XF. 2015. Evaluating the vegetation recovery in the damage area of Wenchuan Earthquake using MODIS data. *Remote Sens* 7(7): 8757-8780. doi: 10.3390/rs70708757
- Kim D, Kim J, So SH, Lee G, Lee S, Lee J, Choi S, Kang S. 2021. Relationships of satellite-driven NDVI with climate, topography, and land cover in Central Asia. *J Environ* 14(1): 13-20.
- Kim SG. 2020. Restoration effect by maintenance after rehabilitation of landslide areas in Mt. Umyeon [dissertation]. Yongin, Korea: Dankook University.
- Kim YS, Shim KM, Jung MP, Choi IT. 2014. Accuracy comparison of air temperature estimation using spatial interpolation methods according to application of temperature lapse rate effect. *J Climate Change Res* 5(4): 323-329. doi: 10.15531/kscrcr.2014.5.4.323
- Korea Forest Service. n.d. Landslide information system; [accessed 2025 Jun 27]. <https://sansatai.forest.go.kr/>
- Lee DK, Kim HG, Nam SW. 2017. A study on the riskiness and expansion of climate change risk: focusing on landslide risk. *Risk Manag Res* 28(2): 69-94. doi: 10.1007/978-3-030-60196-6_6
- Lee J, Lee S, Yoo Y, Kim K, Jeon S. 2024. Selecting appropriate vegetation indices for detection and prediction mapping of landslides in South Korea. *J Climate Change Res* 15(4): 477-488. doi: 10.15531/KSCCR.2024.15.4.477
- Lee KI, Jeon SW, Jang R. 2018. Assessment and comparison of biodiversity by analysis unit using biodiversity index (in Korean with English abstract). Proceedings of the Korean Environmental Policy Association Conference; 2018 Feb 9; Seoul, Korea.
- Magurran AE. 2013. Measuring biological diversity. John Wiley & Sons.
- National Disaster Management Research Institute. 2017. Landslide occurrence history.
- National Institute of Forest Science. The 1st forest health monitoring. Seoul, Korea: National Institute of Forest Science.
- Prach K, Hobbs RJ. 2008. Spontaneous succession versus technical reclamation in the restoration of disturbed sites. *Restor Ecol* 16(3): 363-366. doi: 10.1111/j.1526-100X.2008.00412.x
- Seo J, Lee KH, Lee G, Oh SW, Song E. 2024. Evaluating the influence of post-earthquake rainfall on landslide susceptibility through soil physical properties changes (in Korean with English abstract). *J Korea Soc Disaster Inf* 20(2): 270-283.
- SER (Society for Ecological Restoration). 2004. The SER international primer on ecological restoration. Science & policy working group; [accessed 2025 Jun 27]. <https://www.ser.org/page/SERDocuments>
- Shannon CE. 1948. A mathematical theory of communication. *Bell Syst Tech J* 27(3): 379-423. doi: 10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x
- Sim S, Kim W, Lee J, Kang Y, Im J, Kwon C, Kim SY. 2020. Wildfire severity mapping using Sentinel satellite data based on machine learning approaches. *Korean J Remote Sens* 36(5): 1109-1123.
- Tilman D, Lehman C, Yin C, 1997. Habitat destruction, dispersal, and deterministic extinction in competitive communities. *American Nat* 149(2): 407-435. doi: 10.1086/285998
- Viet LD, Chi CN, Tien CN, Quoc DN. 2021. The effect of the normalized difference vegetation index to landslide susceptibility using optical imagery Sentinel-2 and Landsat 8. 4th Asia Pacific Meeting on Near Surface Geoscience & Engineering 2021: 1-5. doi: 10.3997/2214-4609.202177051
- Yang MD, Chen SC, Tsai HP. 2017. A long-term vegetation recovery estimation for Mt. Jou-Jou using multi-date SPOT 1, 2, and 4 images. *Remote Sens* 9(9): 893. doi: 10.3390/rs9090893
- Yuan W, Wei Y, Liu S, Dong W, Liu H. 2022. Monitoring vegetation recovery after disturbance using

time-series remote sensing data: A comparison of trajectory-based approaches. *Remote Sens Environ* 268: 112760. doi: 10.1016/j.rse.2021.112760

Zhao L, Hallett LM, Jones SK, Wilcox KR. 2022. Species diversity promotes temporal stability across communities and ecosystems. *Nat Commun* 13: 7890. doi: 10.1038/s41467-022-35514-9