



## Review

# 화성 퇴적분지의 유형과 분지해석 기법

우주선<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 지구환경과학부

<sup>2</sup>서울대학교 행성·지질환경연구소

## Types of the Martian sedimentary basins and the basin analysis methods

Jusun Woo<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 08826, Republic of Korea

<sup>2</sup>Institute of Planetary, Earth and Environmental Sciences, The Research Institute of Basic Sciences, Seoul National University, Seoul 08826, Republic of Korea

Received: October 13, 2025 / Revised: November 26, 2025 / Accepted: December 1, 2025

\*Corresponding author: +82-2-880-6736 / E-mail: [jusunwoo@snu.ac.kr](mailto:jusunwoo@snu.ac.kr)

**요약:** 화성의 퇴적분지는 행성의 물리적 진화, 고기후 변동, 그리고 생명체 흔적의 보존 가능성을 이해하기 위한 핵심 연구 대상이다. 본 연구는 최근의 연구결과를 종합하여 화성 퇴적분지의 분포, 형성 과정, 층서적 특징, 그리고 분지해석 방법론을 검토하였다. 화성의 지질시대는 노아키스기, 헤스페리아기, 아마조니스기 세 시기로 구분되며, 초기에는 습윤한 환경과 활발한 하천 작용이, 이후에는 점진적인 냉각과 건조화가 진행되었다. 화성표면에는 남반구의 수많은 소형 운석충돌구 분지 외에 북반구의 북대양으로 대표되는 대형 운석충돌구 분지, 그리고 연장된 계곡 분지가 발달한다. 분지들에서는 산상지, 삼각주, 하도, 호수, 연안 퇴적체 등 다양한 퇴적 환경의 증거가 관찰된다. 특히 에베르스왈데 충돌구의 산상지 삼각주는 반복적인 수위 변동과 다중 업 발달을 통해, 외적 요인에 의해 조절된 주기적 퇴적 과정을 보여준다. 이는 화성 고환경 연구에서 기후적 조절의 존재를 지지하는 대표 사례이다. 또한 북대양 분지의 순차층서 분석은, 초기 해양의 점진적 소실과 이에 따른 장기적 강제해퇴 과정이 특징적인 모델을 제시한다. 한편, 마리네리스 계곡 내부의 퇴적체 연구는 지체구조운동이 분지 퇴적 주기성과 직접 연계될 수 있음을 입증하여, 화성의 구조적 진화 해석에 새로운 시각을 제시하였다. 연구자들은 화성의 넓은 지역을 포괄하는 궤도선 자료를 바탕으로 궤도상(orbital facies)을 제안하였다. 이 체계는 광역적 층서대비와 행성 기후 진화 해석을 가능하게 한다. 장기간의 수권 활동과 반복적 환경변동이 기록된 퇴적분지는 우리나라 화성 탐사의 주요 목적지이다. 향후 최적의 착륙지 결정을 위해 고해상도 궤도 영상, 분광 탐사, 지하 레이더 등 정밀 궤도관측 기술의 확보와 역량강화가 요구된다.

**주요어:** 화성, 퇴적분지, 층서, 궤도상, 행성과학

**ABSTRACT:** Sedimentary basins on Mars are key research targets for understanding the planet's physical evolution, paleoclimatic fluctuations, and the potential for preserving biosignatures. This study synthesizes recent findings to review the distribution, formation processes, stratigraphic characteristics, and analytical methodologies of Martian sedimentary basins. The geological history of Mars is divided into three major periods - Noachian, Hesperian, and Amazonian - during which the planet evolved from an early humid environment with active fluvial systems to progressively cooler and drier conditions. Sedimentary basins on the Martian surface are classified into three types: small impact crater basins, large impact crater basins, and elongated valley basins. These basins preserve evidence of diverse depositional environments, including alluvial fans, deltas, fluvial channel deposits, lacustrine deposits, and coastal deposits. The Eberswalde delta, in particular, demonstrates cyclic sedimentation controlled by external factors, as indicated by repeated water-level fluctuations and multi-lobed deltaic development, representing a key example of climatic modulation in Martian paleoenvironmental studies. Furthermore, sequence stratigraphic models of the northern oceanic basin suggest a characteristic pattern of long-term forced regression associated with the gradual disappearance of an early ocean. Studies of sedimentary deposits within the Valles Marineris region also reveal that tectonic activity may have directly influenced depositional cyclicality, providing new insights into the structural evolution of Mars. Recent research has proposed an orbital facies framework based on extensive orbital remote-sensing datasets, enabling broad-scale stratigraphic correlation and interpretation of planetary climate evolution. The search for biosignature on Mars may be one of the most important science target of the

Korean Mars missions. Sedimentary basins need to be considered as top priority landing sites as they record long-term hydrological activity and recurrent environmental change which might have provided a cradle of early life forms. In order to select future landing site, the development of advanced pre-mission observation technologies, such as high-resolution orbital imaging, spectroscopic surveys, and subsurface radar are required.

**Key words:** Mars, sedimentary basins, stratigraphy, orbital facies, planetary science

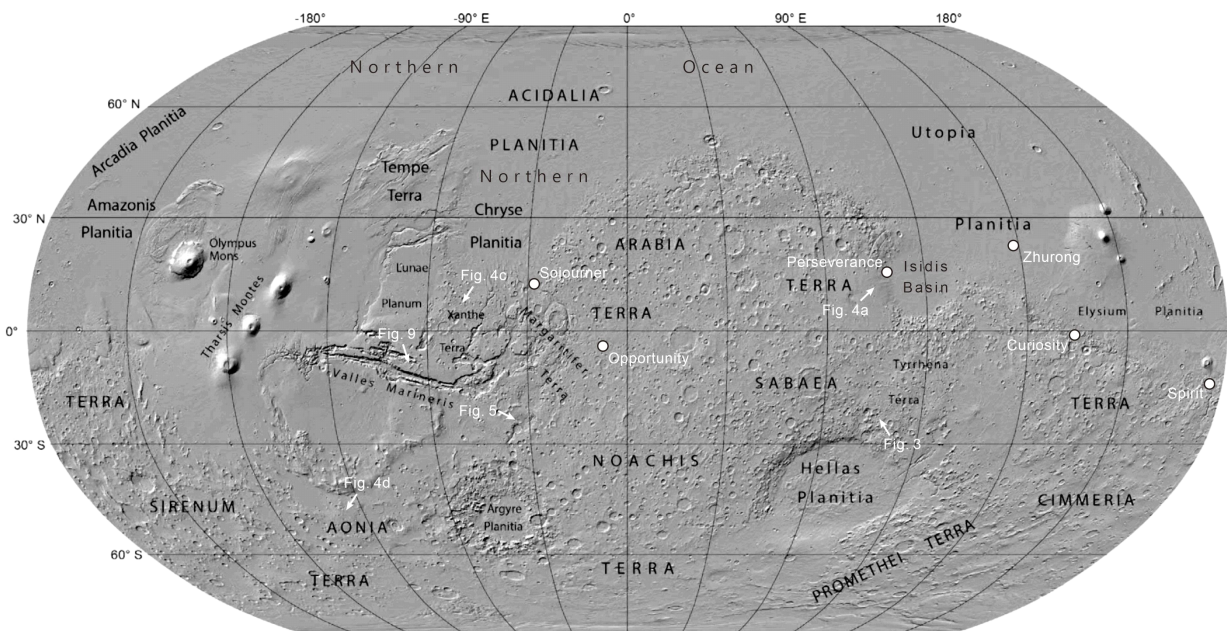
## 1. 서론

퇴적분지(sedimentary basin)에 쌓이는 퇴적물은 퇴적물 공급의 역사, 주변 환경의 변화, 그리고 행성 시스템 내 물질 순환을 기록하는 중요한 단서이다(Reading, 2009; Allen and Allen, 2013). 이러한 퇴적기록은 지질학적 시간 규모에서 일어난 기후 변화, 해수면 변동, 생물 진화, 그리고 자원 형성 과정까지 포괄적으로 반영하기 때문에, 지구과학 전반의 핵심 연구 대상이 되어왔다(Catuneanu, 2006; Nichols, 2009). 지구에서의 퇴적학 연구는 지난 세기 동안 비약적인 발전을 이루어 왔으며, 그 과정에서 세 가지 혁신적 성과가 특히 두드러진다. 첫째, 퇴적상 분석(sedimentary facies analysis)을 통한 퇴적작용과 고환경 복원의 정밀화, 둘째, 분지 발달과 변형 과정을 설명하는 판구조론(plate tectonics)의 도입, 셋째, 시간-공간적 퇴적체 배열을 이해하는 순차층서학(sequence stratigraphy)의 확립이다(Miall, 2010; Catuneanu *et al.*, 2011). 최근에는 전통적 접근법에 더하여 인공지능(AI) 기술이 퇴적학 및 분지해석 연구에 적용되면서, 대용량 탐사 자료의 자동분류 및 해석 정량화 등 새로운 연구 패러다임이 형성되고 있다(예, Ayranci *et al.*, 2021; Di Martino *et al.*, 2023; Gao *et al.*, 2025).

이러한 연구 전통은 지구를 넘어 행성 탐사로 확장되고 있다. 그 중에서도 화성은 퇴적분지의 발달과 퇴적암의 보존 상태가 비교적 양호하게 남아 있는 대표적 천체로 주목받고 있다. 지금까지 화성에 보내진 여섯 대의 로버(rovers) - 소저너(Sojourner), 스피릿(Spirit), 오퍼튜니티(Opportunity), 큐리오시티(Curiosity), 퍼서비어런스(Perseverance), 주룽(Zhurong) - 대부분은 퇴적분지로 추정되는 지역, 혹은 퇴적암 노두를 관찰할 수 있는 지점에 착륙하였다(그림 1; Golombek *et al.*, 2012; Farley *et al.*, 2020). 이는 화성의 표면에서 과거 환경을 복원하고, 물과 생명체의 흔적을 찾기 위한 과학적 전략의 일환이다. 본 논문에서는 화성 탐사의 과학적 목표를 달성하기 위한 핵심 연구대상인 퇴적분지의 지질학적, 지형학적 해석에 관한 최근 연구 성과 중 주요한 것들을 종합적으로 검토하고, 나아가 이를 바탕으로 향후 우리나라의 화성 탐사 프로그램이 지향해야 할 연구 방향과 과학적 함의를 고찰하고자 한다.

## 2. 화성의 지사

화성은 태양계가 형성된 후 수천만 년 이내에 지각(crust), 맨틀(mantle), 핵(core)으로 분화되었으며, 이후 지각 표면에



**Fig. 1.** Topographic map of the Mars with names of major geographic features (modified from Coles *et al.*, 2019).

기록된 운석 충돌구의 분포와 상호관계를 바탕으로 노아키스기(Noachian Period), 헤스페리아기(Hesperian Period), 아마조니스기(Amazonian Period)로 세분된다(그림 2). 노아키스기 시작의 기준으로 채택된 헬라스(Hellas) 운석충돌구의 형성은, 41억 년에서 38억 년 전 사이로 추정된다(Carr and Head, 2010). 노아키스기 이전(Pre-Noachian) 시기에 대해서는 알려진 바가 거의 없지만, 자기장이 존재했고, 여러 대형 분지를 형성한 운석충돌(basin-forming impacts)을 겪었으며, 그중 하나가 전행성 규모의 지형 이분구조(global dichotomy)를 만들었을 것으로 생각된다. 노아키스기는 약 37억 년 전에 끝났으며, 빈번한 운석충돌구 생성(cratering), 침식(erosion), 그리고 다양한 계곡 형성 사건들로 특징지어진다. 타르시스(Tharsis) 고지대의 대부분이 이 시기에 형성되었으며, 표면 조건은 간헐적으로 수화 풍화 생성물(hydrous weathering products)인 층상규산염(phylllosilicate)이 광범위하게 생성될 정도로 습윤했다. 이 시기 말에는 광범위한 황산염(sulfate) 퇴적층이 쌓였다. 평균 침식률은 이후 시대보다 높았지만, 지구의 가장 낮은 평균 침식률보다는 여전히 낮았다. 표면 퇴적기록에, 하천 작용(fluvial activity)에 필요한 따뜻하고 습한 조건은 대형 충돌이나 화산 폭발 같은 사건이 있을 때에만 간헐적으로 충족되었을 것으로 보인다.

노아키스기 말기에 충돌, 계곡 형성, 풍화, 침식의 속도는 급격히 감소했지만, 헤스페리아기 전반에 걸쳐 화산 활동은 여전히 높은 평균 속도로 지속되어 최소한 30%의 행성 표

면이 재형성(resurfacing)되었다. 이 시기에는 고지대의 대형 호수 분지의 물이 저지대의 대양으로 이동하는 홍수가 간헐적으로 발생하고, 거대한 협곡(canyons)도 형성되며 대규모 모수역을 형성했을 것으로 생각된다. 노아키스기 말에 일어난 환경 변화는 대규모 홍수를 제외한 대부분의 수성활동을 억제했으며, 두꺼운 빙권(cryosphere)의 발달을 초래한 것으로 보인다. 그러나 황산염이 풍부한 퇴적물의 존재, 토양 내 황산염 농집, 그리고 간헐적으로 존재하는 헤스페리아기 계곡망(valley networks)은 수성 활동이 완전히 사라지지는 않았음을 시사한다(Carr and Head, 2010).

약 30억 년 전 헤스페리아기가 끝난 후, 지질 활동의 속도는 더욱 느려졌다. 아마조니스기 동안 평균 화산 활동률은 헤스페리아기의 약 1/10 수준으로 감소했으며, 주로 타르시스와 엘리시움(Elysium) 지역에 국한되었다. 주요 홍수 시기는 종료되었지만, 소규모 홍수는 지질학적으로 최근 시기까지 간헐적으로 일어났다. 협곡 발달은 주로 대형 산사태(landslides) 발생에 제한되었으며, 침식과 풍화의 속도는 극도로 낮게 유지되었다. 아마조니스기의 가장 두드러진 특징은 얼음(water ice)의 존재, 축적, 그리고 이동에 의해 형성된 지형이다. 이에는 극지층상퇴적물(polar layered deposits), 화산 위의 빙하 퇴적물(glacial deposits), 고위도 지역의 얼음이 풍부한 표층(ice-rich veneer), 그리고 위도 30-55° 지역대의 다양한 지형, 예를 들어 쇄설류 퇴적체(lobate debris apron), 길게 연장된 계곡 충전체(lineated valley fill),

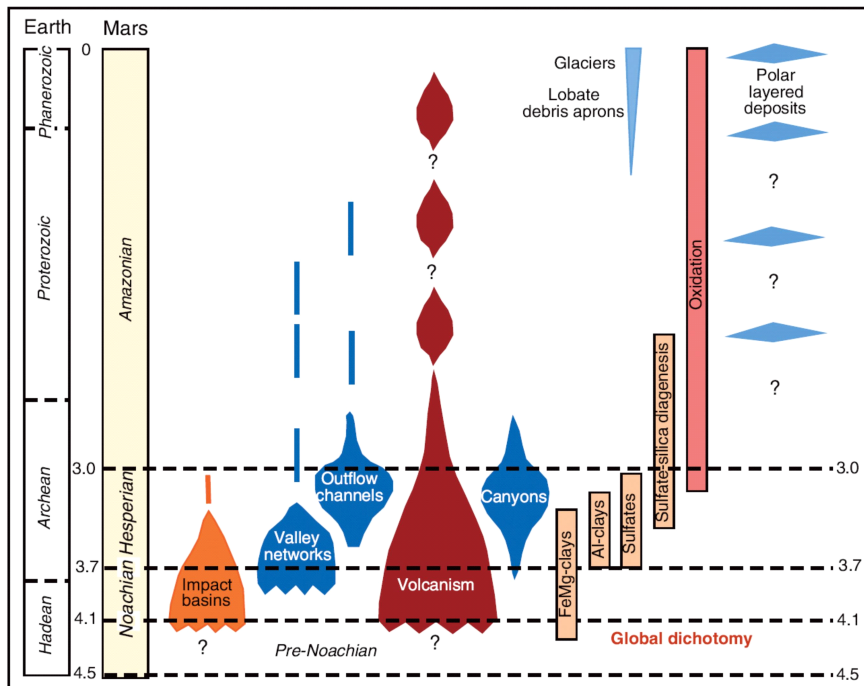


Fig. 2. Diagram summarizing major geologic event on Mars in accordance with geologic time scale (modified from Carr and Head, 2010; Ehlmann and Edwards, 2014; McSween et al., 2019).

동심원 구조를 보이는 운석충돌구 충전체(concentric crater fill)를 포함된다. 가파른 경사면의 협곡(gullies)들도 주로 이 시기 후기에 형성되었다(Carr and Head, 2010).

### 3. 화성 퇴적분지의 분류와 퇴적작용

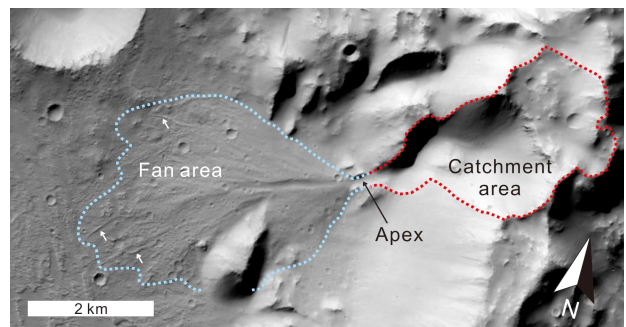
화성의 표면은 전 행성 규모에서 뚜렷한 남반구-북반구 지형 이분구조를 보인다(그림 1). 일반적으로 남반구는 상대적으로 높은 고지대(highlands)로 이루어져 있으며, 수많은 운석 충돌구(impact crater)와 고지대 분지들이 분포한다. 반면, 북반구는 비교적 낮은 고도(lowlands)를 가지며, 평탄한 지형이 넓게 발달한 저지대 형성을 특징으로 한다(Andrews-Hanna *et al.*, 2008; Carr and Head, 2010). 남반구의 고지대에는 다양한 크기의 충돌 기원 분지 구조들이 분포되어 있으며 주변의 고지대로부터 분지 내부로 연결된 하도와 연결된 퇴적체들이 발달한다. 상대적으로 작은 운석충돌구 분지들과 확연히 구분되는 대형 분지들도 남반구에 존재하는데, 아르기에레 분지/평원(Argyre Basin/Planitia)과 헬라스 분지/평원(Hellas Basin/Planitia)이 대표적인 대형 분지로 꼽힌다. 이들은 직경 수 백 킬로미터 규모의 충돌 분지로, 상대적으로 높은 주변부에서 기원한 지표수와 퇴적물의 도착지이자, 간헐적인 대규모 홍수시에는 물이 유출되는 근원지로 작용하였다(Frey, 2006; Tanaka *et al.*, 2014). 특히 헬라스 분지는 행성 표면 중에서도 가장 깊은 지역 중 하나로, 퇴적물 축적과 대기 순환에 중요한 역할을 한 것으로 알려져 있다(Head and Pratt, 2001). 이에 비해 북반구 저지대는 과거의 대양분지(oceanic basins)로 해석되는 광범위한 평탄지형을 이루며, 여러 개의 소분지(sub-basins)로 세분된다. 대표적인 북반구 분지로는 유토피아 분지/평원(Utopia Basin/Planitia), 이시디스 분지/평원(Isidis Basin/Planitia), 그리고 북극분지(North Polar Basin) 등이 있으며, 이들은 북대양(Northern Oceans) 체계의 일부로 간주된다(Carr, 2007; Carr & Head, 2010). 이 분지들은 한때 액체 상태의 물이 존재했던 해양 또는 대규모 호수 환경의 흔적으로 해석되며, 화성의 고대 기후 및 수리환경 복원에 있어 핵심적인 단서를 제공한다(Andrews-Hanna *et al.*, 2008). 화성표면에는 운석충돌 기원의 저지대와 다르게 횡으로 길게 연장된 대규모 계곡도 드물게 발견되며, 그 내부에도 다양한 퇴적체가 쌓여있어 퇴적분지로 작용했음을 알 수 있다(Davis *et al.*, 2021).

이와 같이 활발한 지체구조운동이 없는 화성의 퇴적분지는, 소규모 운석충돌구 분지, 북대양 분지와 남반구 대규모 운석충돌구 분지, 연장된 계곡 분지로 대별될 수 있다. 화성의 주요 분지에서는 다양한 퇴적환경에서 형성된 국지적 퇴적체가 관찰된다. 이러한 퇴적체는 선상지(alluvial fan),

삼각주(delta), 선상지삼각주(fan-delta), 하도(alluvial channel), 호수(lacustrine), 그리고 해안(coastal) 환경 등에서 퇴적된 것으로 해석된다(Hauber *et al.*, 2011; Grotzinger *et al.*, 2015). 또한 일부 지역에서는 대규모 홍수(catastrophic flood)로 인해 형성된 것으로 보이는 협곡(canyon)과 계곡(valley)을 충전하는 퇴적체도 확인된다(Baker, 1982; Burr *et al.*, 2009). 이들은 단기간의 급격한 유수 작용에 의해 침식, 운반, 퇴적된 조립질 물질을 포함한다. 대규모 충돌분지나 대양의 경계부에서는 해안선 침식에 의해 형성된 지형적 구조(coastal erosional features)가 잘 발달하는 경우가 많다. 이 경계부를 따라 하류 방향으로 삼각주 퇴적체와 하도계가 연속적으로 발달하며, 이는 전행성규모의 물 이동 경로 및 퇴적물 공급 방향을 추정하는 데 중요한 단서를 제공한다(Di Achille and Hynes, 2010; Mangold and Ansan, 2006). 분지의 중앙부에는 일반적으로 층리가 잘 발달한 세립질 퇴적체가 분포한다. 이는 장기간에 걸친 낮은 에너지의 정수환경(standing water condition)에서 부유퇴적작용에 의해 형성된 것으로, 주로 호수성 또는 분지 중앙부와 같은 환경을 반영한다(Grotzinger *et al.*, 2014; Stack *et al.*, 2019). 이들 퇴적체는 시간에 따른 퇴적물의 변화, 고기후 변동, 그리고 행성 규모의 수문 순환 변화를 기록하고 있어, 화성 고환경 복원의 핵심 자료로 활용되고 있다(Ehlmann *et al.*, 2008; Grant *et al.*, 2014).

#### 3.1. 소형 운석충돌구 분지의 퇴적작용과 층서

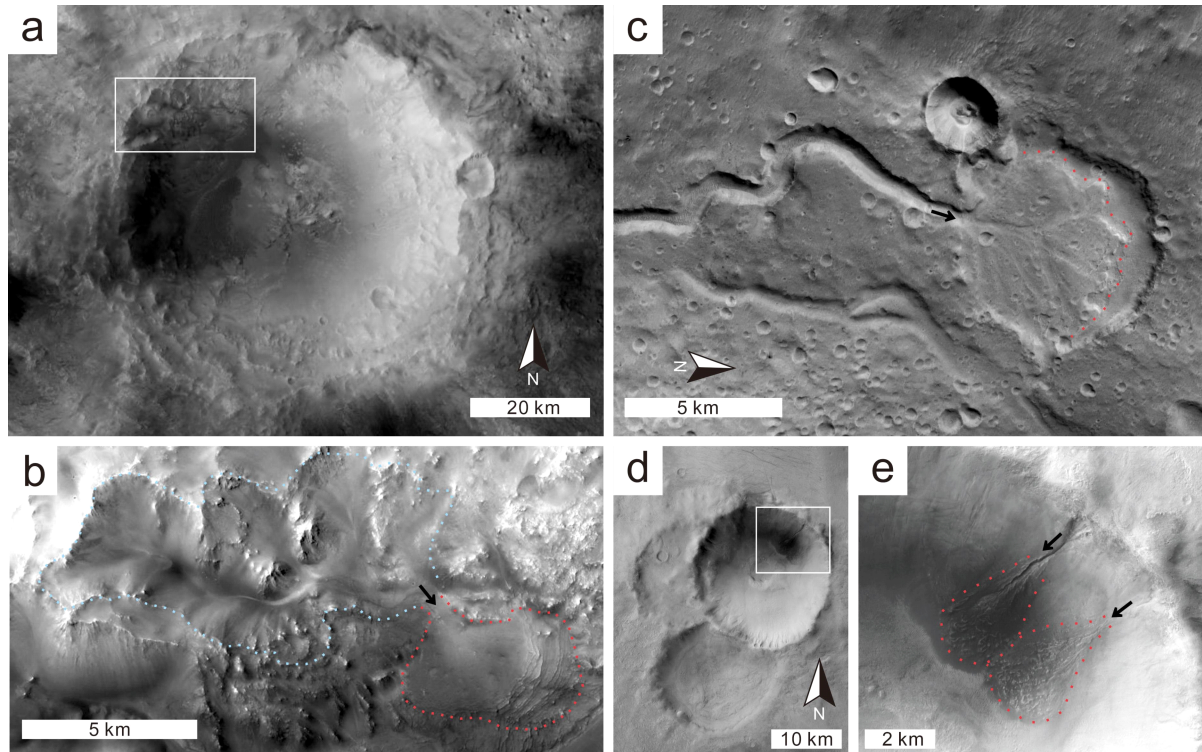
운석충돌구와 관련된 형태로 발달한 분지 내부에서는 충돌구 림(rim)의 급사면에서 안쪽 평원(interior plain)으로 이어지는 경사 지형을 따라 선상지 또는 선상지-삼각주, 그리고 삼각주가 잘 발달하는 것으로 알려져 있다(Morgan *et al.*,



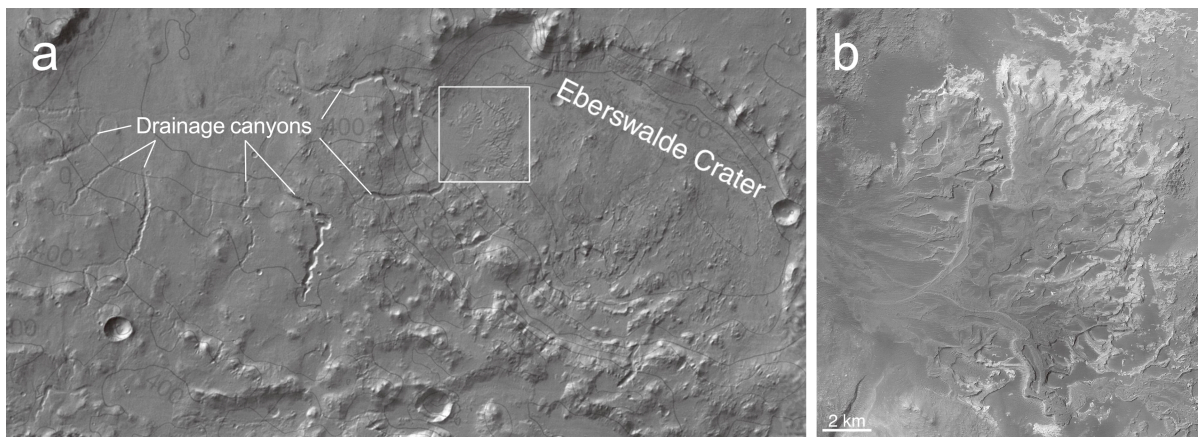
**Fig. 3.** A fan-shaped features showing how flow of water transported sediment from the upstream catchment. The water and sediment spread outward and are deposited through a single point, the apex, where the flow meets the lowland. The ridge-like features (white arrows) that appear on the distal fan surface represent inverted channels, which are remnants of fluvial deposits that have resisted eolian erosion after the formation of the alluvial fan (from CTX mosaic map of Murray Lab, centered at 22.3817°S, 77.0142°E).

2022). 이와 같은 삼각주 퇴적체의 존재는 과거 호수 환경에 해당하는 수괴(water body)의 존재를 직접적으로 지시한

다. 여러 화성 분지에서 관찰되는 방사상 퇴적체(radiating depositional bodies)는 지형적 형태와 상부 표면 특성을 통



**Fig. 4.** Example of fan-shaped deposits in a small impact crater basin. (a) A CTX image of Hargraves Crater in the west of Isidis Basin (CTX mosaic map of Murray Lab, centered at 20.7654°N, 75.8603°E). (b) Detailed view of boxed area in Fig. 4a showing fan-shaped deposit with its catchment area and general sedimentary transportation direction. Note that the south eastern margin of the deposit is eroded and exposed its stratigraphy. (c) A CTX image of a small impact crater basin with an inlet valley (CTX mosaic map of Murray Lab, centered at 8.5255°N, 48.0046°W). The basin is nearly filled up with a fan-shaped deposit. Blue dotted lines denote catchment areas and red dotted lines demarcate the boundaries of fan-shaped deposits. (d) A CTX image of a small impact crater basin with alluvial fans (CTX mosaic map of Murray Lab, centered at 47.9145°S, 104.6278°W). (e) Detailed view of boxed area in Fig. 4d showing laterally arrayed relatively recent alluvial fans.



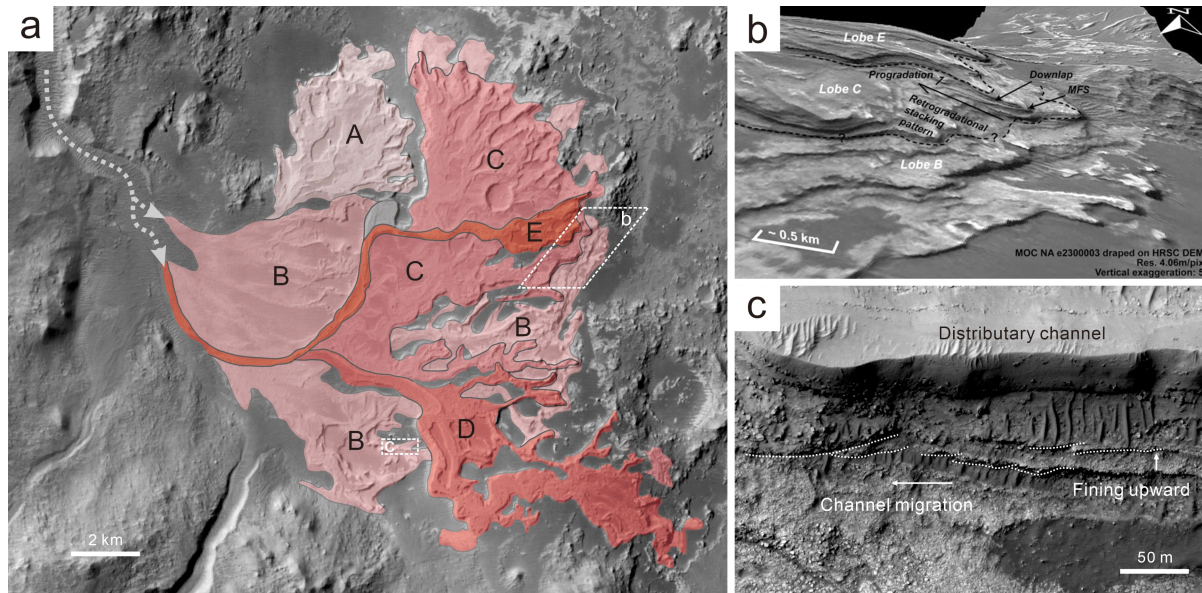
**Fig. 5.** A fan-delta within Eberswalde Crater. (a) Topography showing the impact crater and the surrounding highlands. Valleys that supplied water and sediment downstream are clearly observed in the upstream area of the delta (CTX mosaic map from Murray Lab, centered at 23.9103°S, 33.6839°W). (b) Enlarged view of the rectangular area in the overall topographic map, showing well-developed radial delta lobes formed through multiple depositional episodes.

해 선상지와 삼각주로 구분할 수 있다(그림 3; Tebolt and Goudge, 2022). 일반적으로 삼각주는 평탄한 상면(flat-topped surface)을 가지는 반면, 선상지는 볼록한 상면(convex-up surface)이 특징적이다. 따라서 형태적 대비는 퇴적물 공급 방식과 수위의 존재 여부를 구분하는 핵심적인 지형 지표로 활용된다(그림 4).

이러한 지형은 에베르스왈데 선상지 삼각주에 잘 보존되어 있으며, 여러 삼각주 엽의 중첩과, 형성 이후의 침식에 의해 드러난 단면에 의해 그 층서적 발달도 파악할 수 있는 대표적 사례이다(그림 5; Pondrelli *et al.*, 2008). 이 선상지

-삼각주는 총 다섯 개의 엽으로 구성되어 있으며, 그중 네 개는 삼각주 기원의 퇴적체로 해석된다(그림 6). 각 엽의 상대적 층서 관계는 단순한 절단 관계(cross-cutting relationships)를 통해 복원할 수 있으며, 이를 바탕으로 삼각주 평원(delta plain)과 삼각주 전면(delta front) 사이의 전이 구간으로부터 당시의 대략적인 수위 변동을 추정할 수 있다(Pondrelli *et al.*, 2008).

각 엽 간의 전환은 외적 요인에 의해 조절된 것으로 보이며, 세 차례의 수위 변동(water-level fluctuations)이 식별된다. 이는 각각 퇴적계다발(systems tracts)과 연관될 가능



**Fig. 6.** (a) Detailed satellite imagery of the fan-delta showing individual channel-fill depositional lobes and their relative stratigraphic order from A (older) to E (younger) Redrawn after Pondrelli *et al.* (2008). (b) Sequence stratigraphic interpretation (Pondrelli *et al.*, 2008) based on the spatial relationships among bottomset, foreset, and topset units of the delta deposits and their corresponding depositional lobes (fig. 15 in Pondrelli *et al.*, 2008). (c) Grain-size recognition and its vertical variation derived from surface characteristics of the deltaic deposits, indicating an overall upward-fining trend (HiRISE image PSP\_001336\_1560\_RED). See fig. 7 of Pondrelli *et al.* (2008) for more interpretation.

Lobes	West	Depositional environments	East	Water-level curve	Systems Tracts/ Boundaries
E					?TST — TS?
D	Delta plain				FSST-LST
C					HST — SB TST — MFS
B		Delta front			FSST-LST — TS
A		Prodelta and basin			HST — SB TST — MFS

**Fig. 7.** Sequence stratigraphic model of the Eberswalde crater fan-delta system (modified from fig. 21 of Pondrelli *et al.*, 2008). Short-term fluctuations indicating episodic variations in water-level are superimposed on a long-term trend of water-level fall.

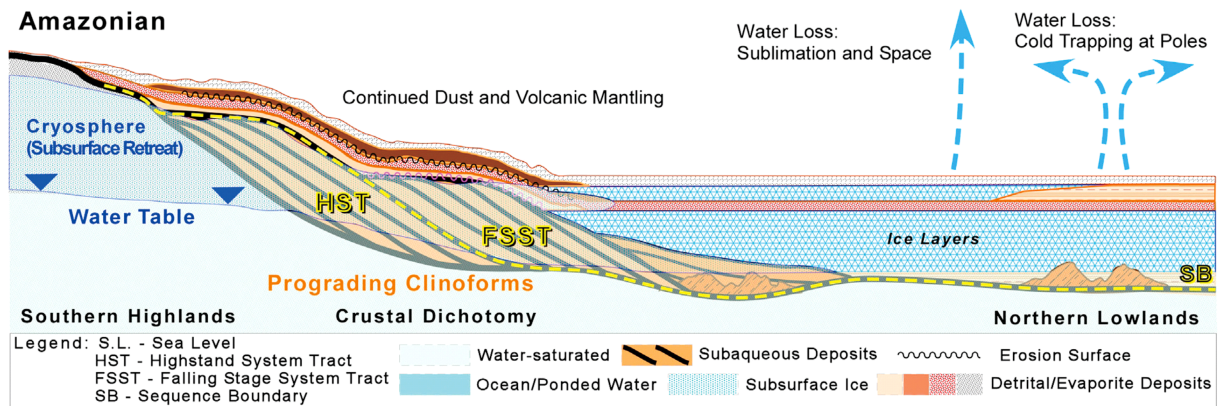
성이 있으며, 세 개의 저차 주기(lower-order cycles) 위에는 보다 고차의 후퇴 경향(higher-order regressive trend)이 중첩되어 있다. 이 세 저차 주기는 일시적이거나 국지적인 환경요소에 의해 부분적으로 조절되었을 가능성이 있으나, 주기적인 퇴적 양상은 기후적 요인의 존재를 강하게 시사한다(그림 7; Pondrelli *et al.*, 2008).

### 3.2. 북대양을 비롯한 대형 운석충돌구 분지의 퇴적작용과 층서

화성 북부 저지대에는 과거 대양이 존재했을 가능성이 제시되어 왔으며, 그 경계를 따라 삼각주, 계곡계, 그리고 해안선의 흔적이 다수 발견된다(Carr, 2007). 이러한 지형적 증거는 저지대가 한때 광범위한 수괴로 덮여 있었음을 시사하며, 화성 초기의 수문환경과 기후 진화를 해석하는데 중요한 단서를 제공한다. 이러한 배경에서 Barker and Bhattacharya(2018)는 화성 북부 대양분지 전체에 적용 가능한 광역 층서 모델(stratigraphic model)을 제시하였는데(그림 8), 이들은 저지대 퇴적체의 분포와 형태를 순차층서학(sequence stratigraphy)의 관점에서 해석하여, 이를 해수면 하강기(sea-level fall)에 해당하는 퇴적체의 특수한 경우로 이해하였다. 즉, 장기간에 걸친 물의 소멸과 이에 따른 해안선의 지속적인 후퇴, 그리고 기온 하강으로 인한 얼음의 우세 혹은 영구동토(permafrost)의 발달이 복합적으로 작용한 결과로 보았다. 이 관점은 화성을 물을 함유한 천체(water-bearing body)로서 이해하려는 접근과 맞닿아 있다. 화성이 어떻게 진화하여 오늘날의 건조한 환경에 이르게 되었는지는, 그 초기 역사와 행성 진화 과정을 해석하는데 있어 핵심적인 과학적 질문이다.

지구에서 확립된 순차층서학의 원리는 해석을 위한 개념적 틀을 제공하며, 화성 북부 저지대의 층서발달사 이해에 효과적으로 적용될 수 있다. Barker and Bhattacharya (2018)는 초기 화성에 원시 해양이 존재했을 가능성과, 계곡망 형성 및 이후의 대규모 유출수로(outflow channels) 발달 시기에 남쪽의 고지대로부터 침식된 퇴적물이 저지대에 축적되었다는 가설에 근거한 모델을 제시한다. 기후의 점진적 냉각에 의해 유도된 과거의 전 행성적 환경 변화는 저위도 지역에서 표층 및 근표층수(surface and near-surface water)의 점진적 소실을 초래하고, 그 결과 물이 고위도 지역에 냉각 포획(cold-trapping)되는 과정을 거쳤을 것으로 추정하였다(그림 8).

이러한 변화는 분지 및 저지대 퇴적환경 내에서 독특하고 장기적인 강제해퇴(forced regression), 즉, 수괴의 점진적 축소와 함께 지속적으로 분지 내부방향으로 향하는 퇴적환경의 변화를 유발했을 것으로 해석된다. 지구의 지중해에서 마이오세에 일어난 메시나절 염분 위기(Messinian Salinity Crisis)는 증발 사건에 의해 대규모 수괴가 점진적으로 소멸하며 유발하는 퇴적학적 및 환경적 결과를 이해하기 위한 지구의 행성유사(terrestrial analogue) 사례로 비교된다. 이와 유사한 과정이 화성에서도 발생했다면, 이는 분지와 저지대 퇴적환경 내에 진단적인 퇴적 연속체(diagnostic sequences of deposits)와 광역 부정합(regional-scale unconformities)을 형성시켰을 가능성이 있다. 이런 지질학적 특성은 북부 저지대의 간헐적인 재표면화(intermittent resurfacing)와 함께, 헤스페리아기 말기까지 진행된 초기 해양의 점진적 상실을 지시하는 증거와 일치한다(Barker and Bhattacharya, 2018). 이는 거시적인 환경변화를 기반으로



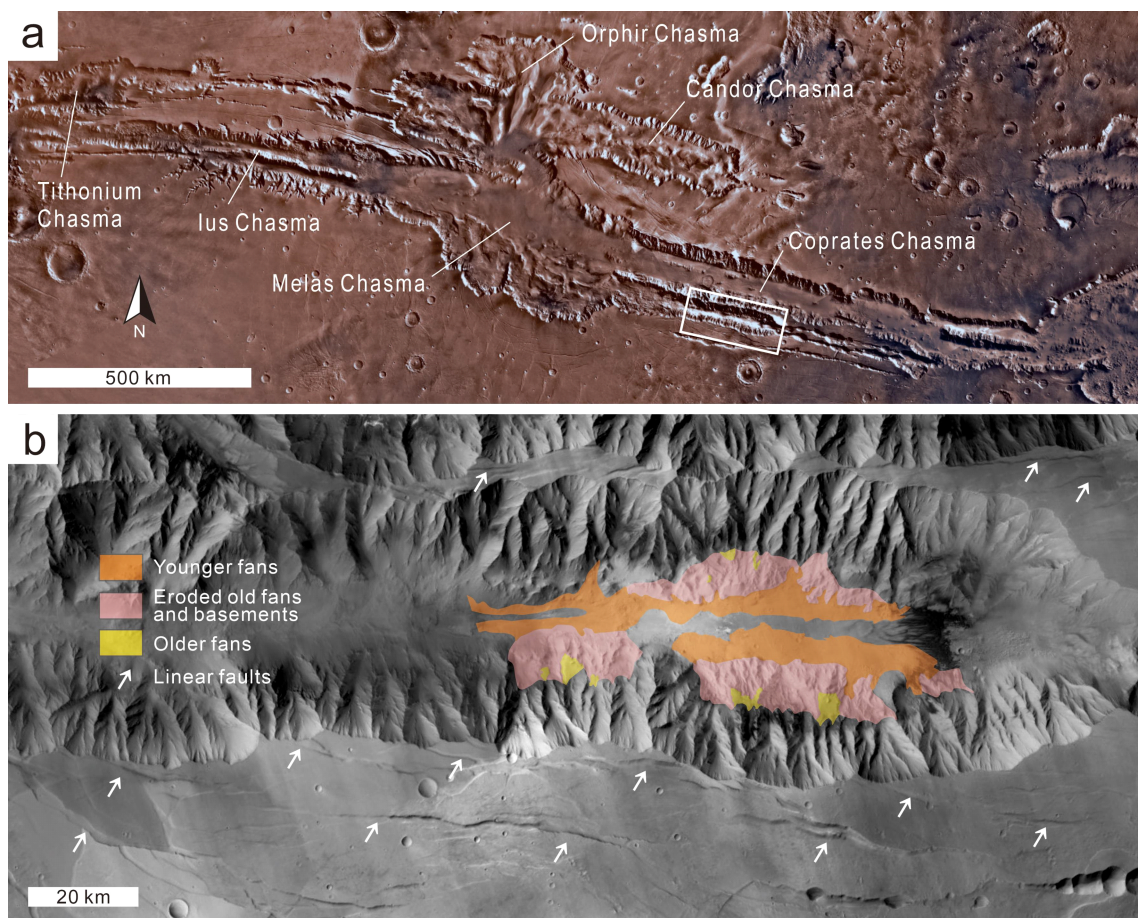
**Fig. 8.** Low-order sequence stratigraphic model of the northern ocean showing Amazonian time with pre-Amazonian stratigraphy (modified from fig. 8 of Barker and Bhattacharya (2018) with permission from the publisher). It is characterized by a unidirectional decline in surface water and the influence of persistent ice on the stratigraphic architecture. HST and FSST formed in the early Noachian while the lower ice layer formed in the latter part of the Noachian. Continental dust, ejecta, and volcanic material accumulated on top of the lower ice. Middle and late Hesperian outflow events might form the upper ice layer which eventually buried by continued deposition of the mantling dust and volcanics (Barker and Bhattacharya, 2018).

한 모델로서 향후 보다 세부적인 증거들을 바탕으로 다시 검증될 필요가 있다.

### 3.3. 연장된 협곡 분지의 퇴적작용과 층서

일반적으로 화성의 대부분 퇴적분지는 지체구조운동과 직접적인 관련성이 없는 것으로 여겨지며, 주로 충돌, 침식, 그리고 유수 작용에 의해 형성되었다. 그러나 일부 지역에서는 분지 형성과 진화 과정에 구조운동의 증거가 관찰되는 예외적인 사례가 보고되기도 한다. Davis *et al.* (2021)은 화성의 대표적인 대규모 협곡 지형인 마리네리스 계곡 지역 내 두 곳에서 고해상도 궤도 영상 자료(high-resolution orbital data sets)를 활용하여 선상지 퇴적체의 특성을 정밀 분석하였다(그림 9). 협곡 바다 부분과 중간 부분의 테라스 위에 선상지가 발달하였으며, 이들은 협곡의 양쪽 사면에 대칭적으로 나타난다. 이들이 퇴적된 테라스는 협곡의 연장방향과 같은 방향으로 발달하며, 주변에 나타나는 정단

층의 경향과도 일치한다. 수직적으로 어긋난 다른 시기 선상지 퇴적체의 보존 상태는, 단층대(fault zone) 내에서의 반복적인 활동 또는 초기 상반방향으로의 점진적인 단층전파를 지시한다. 즉, 선상지 퇴적체의 형성과 진화가, 단일 사건이 아닌 최소 두 차례 이상의 독립적인 구조운동과 관련된 퇴적사건에 의한 것이며 분지의 형성이 지체구조 변형과 밀접하게 연계되어 있었음을 보여준다. 이는 최초로 화성에서 구조운동과 퇴적주기성(depositional cyclicity)이 직접적으로 관련되어 있음을 입증한 중요한 사례로 꼽힌다(Davis *et al.*, 2021). 화성에서 가장 큰 계곡인 마리네리스 계곡 전역에 걸친 광역적 지체구조 작용을 퇴적체가 기록하였음을 보고한 이 연구는, 특정 화성 퇴적분지의 경우 지체구조 운동을 고려한 분지해석이 필요할 수 있음을 제시한다. 따라서 향후 4,000 km 이상의 길이를 가진 마리네리스 계곡을 퇴적분지로 이해하고 이의 상세한 구조를 연구할 필요가 있다.



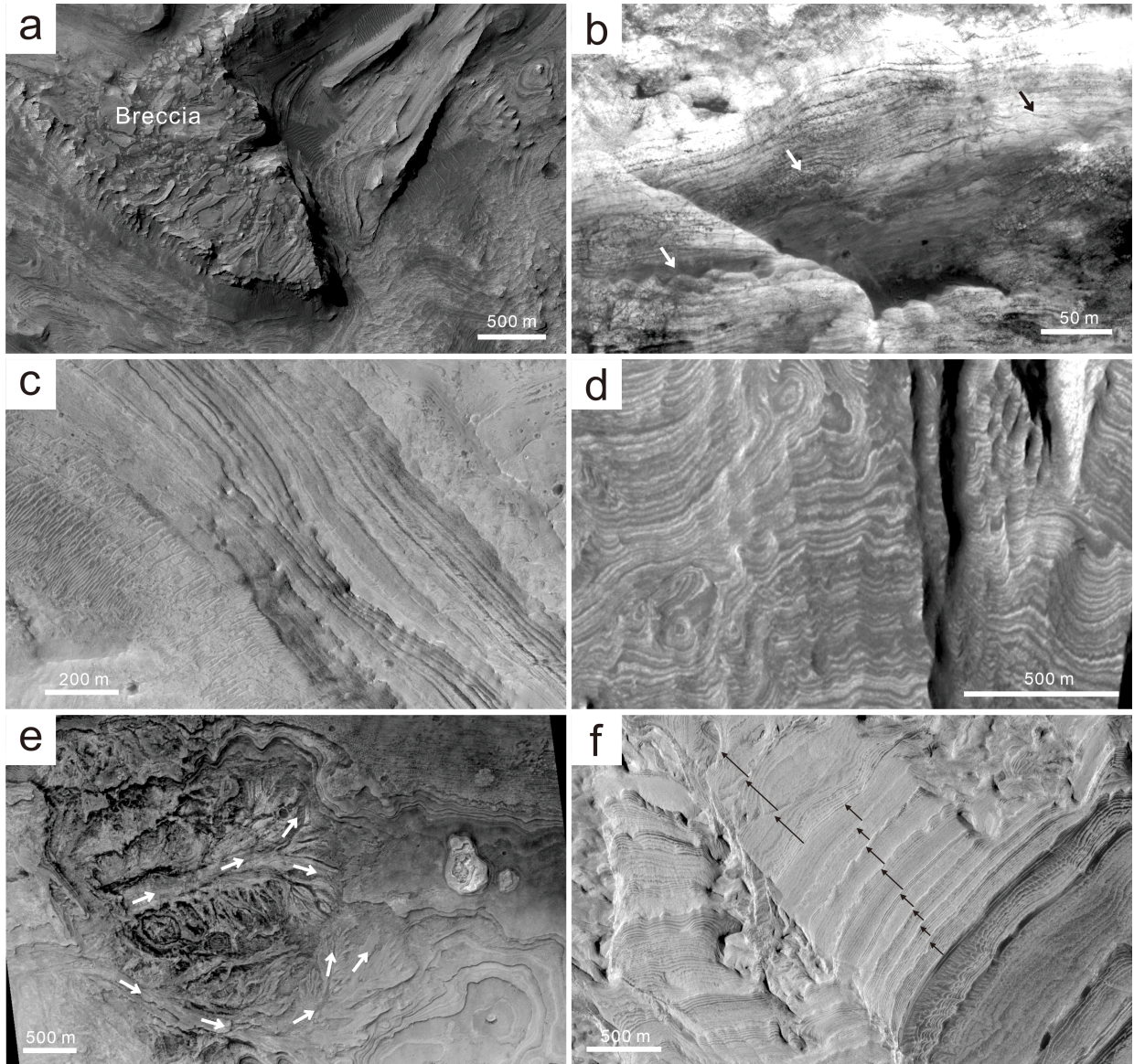
**Fig. 9.** (a) Topographic map of Valles Marineris (Viking colorized global mosaic 232 m v2). Southern Coprates Chasma is marked by a white box. (b) Detailed view of the southern Coprates Chasma. Two layers of alluvial-fan horizons, older upper fans and younger lower fans are color coded. Arrows mark normal faults run parallel to the orientation of the valley. They are separated by steep slope formed by inward fault propagation. For detailed lithology, drainage system, and formative processes, refer to Davis *et al.* (2021).

## 4. 토 의

### 4.1. 화성에 특화된 분지해석 방법

퇴적분지의 진화를 해석하기 위해서는 단순히 분지와 분지 충전물의 지형적 형태뿐 아니라, 그 내부를 구성하는 층

서와 그 변화를 함께 분석해야 한다. 그러나 화성의 경우, 지표 노출 단면이 매우 제한적이어서 지구와 같은 방식으로 퇴적층의 수직적 배열을 직접 관찰하기 어렵다. 설사 노출부가 존재하더라도, 위성영상에서 관찰 가능한 해상도 한계로 인해 수평 규모에 비해 상대적으로 작은 수직 두께



**Fig. 10.** Examples of Martian orbital facies proposed by Grotzinger and Milliken (2012). (a) Massive Breccia (MBR) exposed in the central part of the Valles Marineris (HiRISE image ESP\_025600\_1735). (b) Complexly Stratified Clay (CSC) exposed in the northern rim of Muara Crater within Mawrth Vallis (HiRISE image ESP\_050362\_2045\_RED). Arrows indicate different types of unconformable contacts. See more details in fig. 16 in Grotzinger and Milliken (2012). (c) Laterally Continuous Sulfate (LCS) observed in Melas Chasma (HiRISE image PSP\_006678\_1675). (d) Laterally Continuous Heterolithic (LCH) outcrops near Juventae Chasma (HiRISE image PSP\_002946\_1765), where bright and dark layers in satellite imagery correspond to strata containing opaline silica and sulfides (Grotzinger and Milliken, 2012). (e) Distributary Network (DNW) developed in a lacustrine delta at the southwestern Melas Chasma (HiRISE image PSP\_007087\_1700). Arrows indicate inferred sedimentary pathways. See Metz *et al.* (2009) for more detailed interpretation. (f) Rhythmite (RHY) within the strata filling the Becquerel Crater (HiRISE image ESP\_044784\_2015, same view with fig. 3B of Lewis *et al.*, 2008 and fig. 9C of Grotzinger and Milliken, 2012), with arrows indicating cyclic bedding patterns regularly observed in the sequence.

를 가지는 지층의 세부 구분에는 본질적인 제약이 따른다. 이러한 한계를 극복하기 위한 새로운 접근법으로, Grotzinger and Milliken (2012)은 지구 퇴적분지의 탄성과 탐사자료를 바탕으로 한 탄성파상(seismic facies) 개념을 응용한 궤도상 (orbital facies) 개념을 제안하였다. 이는 궤도 탐사 자료 (orbiter observations)를 기반으로 퇴적체의 구조적 틀 (depositional framework), 층상 구조 및 조직적·형태적 특징 (bed-scale textural/morphologic attributes), 그리고 광물학적 조성(mineralogy)을 종합적으로 고려하여 퇴적상의 유형을 구분하는 분류 체계이다. 궤도퇴적상 체계는 다음과 같은 여섯 가지 주요 유형으로 구성된다(Grotzinger and Milliken, 2012).

(1) 과상 각력암(Massive Breccia, MBR) - 대규모 각력암상, 운석충돌 및 붕괴 기원의 거력질 퇴적체로 주변의 다른 퇴적상과 함께 발달한다(그림 10a). (2) 복합층리 이암 (Complexly Stratified Clay, CSC) - 복잡한 층리를 가진 점토상, 습윤 환경에서의 반복적 퇴적을 반영한다(그림 10b). (3) 측방연속 황산염(Laterally Continuous Sulfate, LCS) - 횡으로 연속성이 뛰어난 황산염상, 산성 환경에서의 증발 및 화학적 퇴적의 산물로 해석된다(그림 10c). (4) 측방연속 이질암(Laterally Continuous Heterolithic, LCH) - 다양한 입도와 구성물질이 교호하며 측방으로 넓게 연속되는 퇴적상으로, 변화하는 퇴적환경을 지시한다(그림 10d). (5) 지류망 (Distributary Network, DNW) - 삼각주 또는 하도망 형태의 분지류 퇴적상으로 배수계로부터 공급된 물과 퇴적물이 퍼져 쌓인 퇴적체이다(그림 10e). (6) 반복층(Rhythmite, RHY) - 주기적 층리(rhythmic bedding)가 뚜렷한 퇴적상, 계절성 또는 기후주기에 의해 형성된 것으로 해석된다(그림 10f).

상기 퇴적상들은 화성의 여러 대표적 지역(reference sections)에서 관찰되며, 이들의 연속적 배열(succession)은 멀리 떨어진 지역 간의 층서 대비를 가능하게 한다. 이를 통해 화성 표면의 환경 변화를 시간적·공간적으로 보다 정밀하게 복원할 수 있게 되었다. 지질시대적으로 보면, 화성의 가장 오래된 지형은 MBR과 CSC 퇴적상이 우세하며, 상대적으로 젊은 지형에서는 LCS, DNW, RHY 퇴적상이 지배적이다. 그러나 일부 지역에서는 점토를 함유한 DNW와 LCH 퇴적상이 대규모 황산염 퇴적체(LCS)와 동시대(동시성, coeval)로 나타나기도 한다. 이는 화성의 기후 진화가 단순히 전 행성적 알칼리-산성 전이(global alkaline-acidic transition)로 설명될 수 없음을 보여준다. 오히려 지역적 수리지화학 환경(aqueous geochemistry)의 다양성과, 지표수(surface water)와 지하수(groundwater)가 각각 차지하는 상대적 역할이 복합적으로 작용했음을 시사한다(Grotzinger and Milliken, 2012).

#### 4.2. 우리나라 화성 탐사에 있어서의 함의

화성 탐사를 수행하는 데 있어 가장 근본적인 과학적 목표의 제1순위는 생명체 흔적(biosignatures)의 확인이다. 이는 미항공우주국(NASA), 유럽우주국(ESA) 등 주요 우주기관의 장기 탐사 프로그램에서도 일관되게 설정된 최상위 연구 과제로, 퇴적 환경 내에서 물-암석-유기물 상호작용에 대한 정밀 분석을 통해 달성될 수 있다. 우리나라의 향후 화성 탐사 계획 또한 생명 탐색이 최우선 목표 중 하나로 설정될 가능성이 높으며, 이에 부합하는 탐사 장비의 탑재 및 착륙지 선정 전략이 수반되어야 한다. 생명체의 흔적이 남을 가능성이 높은 환경은 일반적으로 물이 장기간 안정적으로 존재했던 지역인 퇴적분지와 내부의 퇴적체다. 특히, 단순히 일시적인 수위가 아니라 반복적인 수위 변동과 환경 변화가 기록된 지역은, 다양한 화학-물리적 조건에서 생명체가 형성되거나 유지되었을 가능성을 검증할 수 있는 최적의 후보지이다.

상기한 조건은 이미 로버가 활동하고 있는 예제로(Jezero), 게일(Gale) 분지 또는 앞서 언급된 에베르스왈데 운석충돌 구와 같이 장기간의 수권 활동과 퇴적 주기성이 공존하는 지역에서 대표적으로 관찰된다. 북반구 대양의 과거 연안 지역 또한 비슷한 환경이 발달했던 곳으로 생각되지만, 그 광대함과 중요성에 비해 아직까지 탐사의 횟수가 제한적이다. 따라서 우리나라의 화성 착륙 탐사 계획 또한 복합 퇴적층서가 발달하고, 다양한 환경 지시자가 공존하는 분지를 대상으로 설정하는 것이 바람직하다. 이를 위해서는 착륙지 선정 이전 단계의 정밀 궤도 관측(orbital reconnaissance)이 결정적이다. 궤도선의 해상도(resolution)와 분광 탐지능력(spectral sensitivity)은 표면 퇴적체의 구조적 배열, 광물 조성, 그리고 층서적 연속성을 식별하는 데 필수적이기 때문이다. 특히 이미 공개된 자료를 바탕으로 앞서 제시된 궤도상 체계(Grotzinger and Milliken, 2012)를 구체화하고 실제 연구에 적용하는 경험이 축적된다면, 우리나라가 향후 확보할 고해상도 궤도 영상 자료로도 화성 분지의 층서적 진화와 환경 변화를 정량적으로 규명할 수 있을 것이다.

#### 5. 결론

화성의 퇴적분지 연구는 단순히 외계 행성의 지형·지질을 탐구하는 수준을 넘어, 지구형 행성의 진화 과정과 생명체의 보존 조건을 규명하는 핵심 분야로 자리 잡고 있다. 특히, 화성의 퇴적체는 수십억 년 전의 기후 변동, 수권 순환, 화학적 풍화, 그리고 지하수 활동의 흔적을 보존하고 있어, 행성 규모의 환경 변화를 시·공간적으로 복원할 수 있는 유일한 단서로 평가된다.

지구에서 확립된 퇴적학·층서학의 이론인 퇴적상 분석, 순차층서학, 분지해석 개념은 화성의 환경 진화를 이해하는데 강력한 개념적 도구를 제공한다. 최근 궤도 영상 기반의 궤도상 접근법으로, 제한된 관측 여건에서도 화성 표면의 층서적·광물학적 특성을 정량적으로 해석할 수 있는 시초가 마련되었으며, 이는 지구에서의 퇴적학 연구 방법론이 행성 연구로 확장된 대표적 사례라 할 수 있다. 우리나라의 향후 화성 탐사는 상기한 국제적 연구의 흐름 속에서 퇴적 분지 중심의 탐사 전략을 채택해야 한다. 생명체의 흔적을 탐색하기 위해서는, 장기간 물이 존재했던 퇴적환경, 반복적인 수위 변동과 다중 환경 전이가 기록된 분지를 우선 고려해야 한다. 고해상도 궤도 영상, 분광 탐사, 지하 레이더 탐지 등 착륙 전 정밀 사전탐사 체계의 확립이 선행되어야 하며, 국내 연구진이 주도적으로 참여할 수 있는 퇴적분지 모델링 및 궤도 데이터 기반 층서 분석 기술의 확보가 시급하다. 궁극적으로, 지구-화성 비교퇴적학(comparative sedimentology)은 우리나라 화성 탐사의 학문적 정체성을 확립할 수 있는 방향을 제시한다. 화성의 퇴적분지를 이해하는 것은 곧, 지구의 진화와 생명체가 유지될 수 있었던 환경 조건을 다시 해석하는 일이기도 하다. 따라서 향후 한국형 화성 탐사 프로그램은 단순한 행성 탐사 기술 개발을 넘어, 퇴적분지라는 시공간의 기록을 통해, 생명과 환경의 행성적 연속성을 해석하는 과학임무기반의 탐사로 자리매김할 필요가 있다. 이와 같은 학문적 비전은 대한민국이 우주 탐사 과학의 주변부를 넘어, 행성과학 분야의 중심 국가로 도약하는 기반이 될 것이다.

### 감사의 글

논문에 건설적인 의견을 주신 두 분의 심사위원과 편집 위원께 감사드립니다. 본 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다(RS-2023-00301976).

### REFERENCES

Allen, P.A. and Allen, J.R., 2013, Basin Analysis: Principles and Application to Petroleum Play Assessment (3rd ed.). Wiley-Blackwell, John Wiley & Sons.  
 Andrews-Hanna, J.C., Zuber, M.T. and Banerdt, W.B., 2008, The Borealis basin and the origin of the martian crustal dichotomy. *Nature*, 453, 1212-1215.  
 Ayranci, K., Yildirim, I.E., Waheed, U.B. and MacEachern, J.A., 2021, Deep learning applications in geosciences: Insights into ichnological analysis. *Applied Sciences*, 11, 7736.  
 Baker, V.R., 1982, The Channels of Mars. University of Texas Press.  
 Barker, D.C. and Bhattacharya, J.P., 2018, Sequence stratigraphy on an early wet Mars. *Planetary and Space Science*, 151, 97-108.

Burr, D.M., Carling, P.A. and Baker, V.R., 2009, Megaflooding on Earth and Mars. Cambridge University Press.  
 Carr, M.H., 2007, The surface of Mars (Vol. 6). Cambridge University Press.  
 Carr, M.H. and Head III, J.W., 2010, Geologic history of Mars. *Earth and Planetary Science Letters*, 294, 185-203.  
 Catuneanu, O., 2006, Principles of Sequence Stratigraphy. Elsevier.  
 Catuneanu, O., Galloway, W.E., Kendall, C.G.S.C., Miall, A.D., Posamentier, H.W., Strasser, A. and Tucker, M.E., 2011, Sequence stratigraphy: Methodology and nomenclature. *Newsletters on Stratigraphy*, 44, 173-245.  
 Davis, J.M., Grindrod, P.M., Banham, S.G., Warner, N.H., Conway, S.J., Boazman, S.J. and Gupta, S., 2021, A record of syn-tectonic sedimentation revealed by perched alluvial fan deposits in Valles Marineris, Mars. *Geology*, 49, 1250-1254.  
 Di Achille, G. and Hynes, B.M., 2010, Ancient ocean on Mars supported by global distribution of deltas and valleys. *Nature Geoscience*, 3, 459-463.  
 Di Martino, A., Carlini, G., Castellani, G., Remondini, D. and Amorosi, A., 2023, Sediment core analysis using artificial intelligence. *Scientific Reports*, 13, 20409.  
 Ehlmann, B.L., Mustard, J.F., Fassett, C.I., Schon, S.C., Head, J.W., Des Marais, D.J. and Murchie, S.L., 2008, Clay minerals in delta deposits and organic preservation potential on Mars. *Nature Geoscience*, 1, 355-358.  
 Farley, K.A., Williford, K.H., Stack, K.M., Bhartia, R., Chen, A., de la Torre, M., Hand, K., Goreva, Y., Herd, C.D.K., Hueso, R., Liu, Y., Maki, J.N., Martinez, G., Moeller, R.C., Nelessen, A., Newman, C.E., Nunes, D., Ponce, A., Spanovich, N., Willis, P.A., Beegle, L.W., Bell, J.F. III, Brown, A.J., Hamran, S.-E., Hurowitz, J.A., Maurice, S., Paige, D.A., Rodriguez-Manfredi, J.A., Schulte, M. and Wiens, R.C., 2020, Mars 2020 mission overview. *Space Science Reviews*, 216, 142.  
 Frey, H.V., 2006, Impact constraints on, and a chronology for, major events in early Mars history. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 111, E08S91.  
 Gao, H., Wu, X. and Ding, X., 2025, A Geologically-Informed and Data-Driven AI Workflow for Fully Seismic Stratigraphic Interpretation of Sedimentary Basin. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 63, 1-13.  
 Golombek, M., Grant, J., Kipp, D., Vasavada, A., Kirk, R., Ferguson, R., Bellutta, P., Calef, F., Larsen, K., Katayama, Y., Huertas, A., Beyer, R., Chen, A., Parker, T., Pollard, B., Lee, S., Sun, Y., Hoover, R., Sladek, H., Grotzinger, J., Welch, R., Noe Dobrea, E., Michalski, J. and Watkins, M., 2012, Selection of the Mars Science Laboratory landing site. *Space Science Reviews*, 170, 641-737.  
 Grant, J.A., Wilson, S.A., Mangold, N., Calef III, F. and Grotzinger, J.P., 2014, The timing of alluvial activity in Gale crater, Mars. *Geophysical Research Letters*, 41, 1142-1149.  
 Grotzinger, J.P., Gupta, S., Malin, M.C., Rubin, D.M., Schieber, J., Siebach, K., Sumner, D.Y., Stack, K.M., Vasavada, A.R., Arvidson, R.E., Calef, F. III, Edgar, L., Fischer, W.F., Grant, J.A., Griffes, J., Kah, L.C., Lamb, M.P., Lewis, K.W., Mangold, N., Minitti, M.E., Palucis, M., Rice, M., Williams, R.M.E., Yingst, R.A., Blake, D., Blaney, D., Conrad, P., Crisp, J., Dietrich,

- W.E., Dromart, G., Edgett, K.S., Ewing, R.C., Gellert, R., Hurowitz, J.A., Kocurek, G., Mahaffy, P., McBride, M.J., McLennan, S.M., Mischna, M., Ming, D., Milliken, R., Newsom, H., Oehler, D., Parker, T.J., Vaniman, D., Wiens, R.C. and Wilson, S.A., 2015, Deposition, exhumation, and paleoclimate of an ancient lake deposit, Gale crater, Mars. *Science*, 350, aac7575.
- Grotzinger, J.P. and Milliken, R.E., 2012, The sedimentary rock record of Mars: Distribution, origins, and global stratigraphy. *Sedimentary Geology of Mars*, 102, 1-48.
- Grotzinger, J.P., Sumner, D.Y., Kah, L.C., Stack, K., Gupta, S., Edgar, L., Rubin, D., Lewis, K., Schieber, J., Mangold, N., Milliken, R., Conrad, P.G., DesMarais, D., Farmer, J., Siebach, K., Calef, F. III, Hurowitz, J., McLennan, S.M., Ming, D., Vaniman, D., Crisp, J., Vasavada, A., Edgett, K.S., Malin, M., Blake, D., Gellert, R., Mahaffy, P., Wiens, R.C., Maurice, S., Grant, J.A., Wilson, S., Anderson, R.C., Beegle, L., Arvidson, R., Hallet, B., Sletten, R.S., Rice, M., Bell, J. III, Griffes, J., Ehlmann, B., Anderson, R.B., Bristow, T.F., Dietrich, W.E., Dromart, G., Eigenbrode, J., Fraeman, A., Hardgrove, C., Herkenhoff, K., Jandura, L., Kocurek, G., Lee, S., Leshin, L.A., Leveille, R., Limonadi, D., Maki, J., McCloskey, S., Meyer, M., Minitti, M., Newsom, H., Oehler, D., Okon, A., Palucis, M., Parker, T., Rowland, S., Schmidt, M., Squyres, S., Steele, A., Stolper, E., Summons, R., Treiman, A., Williams, R., Yingst, A. and MSL Science Team, 2014, A habitable fluvio-lacustrine environment at Yellowknife Bay, Gale Crater, Mars. *Science*, 343, 1242777.
- Hauber, E., Brož, P., Jagert, F., Jodłowski, P. and Platz, T., 2011, Very recent and wide-spread basaltic volcanism on Mars. *Geophysical Research Letters*, 38.
- Head III, J.W. and Pratt, S., 2001, Extensive Hesperian-aged south polar ice sheet on Mars: Evidence for massive melting and retreat, and lateral flow and ponding of meltwater. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 106, 12275-12299.
- Lewis, K.W., Aharonson, O., Grotzinger, J.P., Kirk, R.L., McEwen, A.S. and Suer, T.A., 2008, Quasi-periodic bedding in the sedimentary rock record of Mars. *Science*, 322, 1532-1535.
- Mangold, N. and Ansan, V., 2006, Detailed study of a hydrological system of valleys, a delta and lakes in the Southwest Thaumasia region, Mars. *Icarus*, 180, 75-87.
- McSween, H.Y., Moersch, J.E., Burr, D.M., Dunne, W.M., Emery, J.P., Kah, L.C. and McCanta, M.C., 2019, *Planetary geoscience*. Cambridge University Press, United Kingdom.
- Metz, J.M., Grotzinger, J.P., Mohrig, D., Milliken, R., Prather, B., Pirmez, C., McEwen, A.S. and Weitz, C.M., 2009, Sublacustrine depositional fans in southwest Melas Chasma. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 11, E10002.
- Miall, A.D., 2010, *The Geology of Stratigraphic Sequences* (2nd ed.). Springer.
- Morgan, A.M., Wilson, S.A. and Howard, A.D., 2022, The global distribution and morphologic characteristics of fan-shaped sedimentary landforms on Mars. *Icarus*, 385, 115137.
- Nichols, G., 2009, *Sedimentology and Stratigraphy* (2nd ed.). Wiley-Blackwell.
- Pondrelli, M., Rossi, A.P., Marinangeli, L., Hauber, E., Gwinner, K., Baliva, A. and Di Lorenzo, S., 2008, Evolution and depositional environments of the Eberswalde fan delta, Mars. *Icarus*, 197, 429-451.
- Reading, H.G. (Ed.), 2009, *Sedimentary Environments: Processes, Facies and Stratigraphy* (3rd ed.). Wiley-Blackwell.
- Stack, K.M., Grotzinger, J.P., Lamb, M.P., Gupta, S., Rubin, D.M., Kah, L.C., Edgar, L.A., Fey, D.M., Hurowitz, J.A., McBride, M., Rivera-Hernández, F., Sumner, D.Y., Van Beek, J.K., Williams, R.M.E. and Yingst, R.A., 2019, Evidence for plunging river plume deposits in the Pahrup Hills member of the Murray formation, Gale crater, Mars. *Sedimentology*, 66, 1768-1802.
- Tanaka, K.L., Skinner, J.A., Dohm, J.M., Irwin, R.P., Kolb, E.J., Fortezzo, C.M., Platz, T., Michael, G.G. and Hare, T.M., 2014, *Geologic map of Mars*. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Map 3292.
- Tebolt, M. and Goudge, T.A., 2022, Global investigation of martian sedimentary fan features: Using stratigraphic analysis to study depositional environment. *Icarus*, 372, 114718.