

Research Article

Morphological diversity of microbialites and the significance of sponge remains in the Permian Triassic transition interval from Hambast Range, Central Iran

Borhan Bagherpour^{1*}, Masoumeh Soleimani¹, Ali Faghieh¹

1- Department of Earth Sciences, School of Science, Shiraz University, Iran

Keywords: *Permian Triassic Boundary, Hambast Formation, Elika Formation, Microbialites, Sponges.*

1-Introduction

The development of microbial limestones immediately after the end of the Permian mass extinction is one of the most notable consequences of this largest mass extinction of the Phanerozoic (Raup, 1979; Sepkoski, 1984). The Upper Permian skeletal carbonates in equatorial shallow marine settings are replaced by (non-skeletal) microbial carbonate immediately after the extinction horizon, and the abundance of the microbialites reaches their maximum in the (early) Griesbachian (Lehrmann, 1999; Baud et al., 2007; Brayard et al., 2011). The classical Hambast section (the Abadeh section) offers an exceptional opportunity to study this microbialites interval due to their excellent preservation. In this study, we focus on a) the (sedimentary) transition between Permian skeletal carbonates and Triassic microbialites, b) the development and morphological analysis of microbialites in different scales, c) lateral continuity and variations of microbialites, d) the presence of sponge remains associated with microbialites and e) the discussion of these results and paleoenvironmental analysis in the Hambast area.

2-Material and methods

Our studied section is located at the Hambast Valley, 58 km southeast of Abadeh. A stratigraphic profile with the thickest microbialites interval and best exposure in the Hambast Valley was logged, and a bed-by-bed sample was taken in the field. It was sampled for the preparation of 21 thin sections. Discription and sedimentological analysis of microbialites fabrics are conducted on four scales (1- mega-, 2- macro, 3- meso, and 4-microstructure), as Shapiro (2000) suggested.

Our studied profile is precisely located at the same profile recently investigated by Shen et al. (2021). Hence, their high-resolution conodont biozonation is adapted for biostratigraphy and age constraints.

3-Results and discussions

3-1- Field observation

The Uppermost Permian in the studied section is represented by ammonite-bearing medium-bedded nodular limestones of the Hambast Formation. The Hambast Formation is conformably covered by a thin (10 cm) clay layer known as the “boundary clay.” A 160 cm thick microbialites interval follows the boundary clay in the base of the Triassic Elika Formation. The microbialites interval is overlain by thin-bedded dark grey limestones (Taraz et al., 1981).

The microbialites interval is composed of four distinct layers. Except for the second thrombolite layer with tabular macrostructure and clotted fabrics, all other layers are characterized by domical digitated/columnar microbial buildups (mounds). These macrostructures show rapid lateral changes. For example, only 30 meters away from the studied section, in the interval between Late Permian skeletal limestone and thin-bedded grey limestones of the Elika Formation (the microbialites interval), only one (30 cm thick) domical mound is found.

* Corresponding author: bagherpour@shirazu.ac.ir

DOI: 10.22055/AAG.2024.43965.2378

Received: 2023-06-03

Accepted: 2023-09-14

The millimetric to centimetric mesoclots are sparitic (dark) patches embedded in a (light) micritic groundmass in the thrombolite layer and characterized by irregular but sharp outlines. Domical macrostructures are composed of digitated/columnar internal structures embedded in micritic matrix. Sharp and regular outlines characterize columns and show very fine laminations. Millimetric overgrowth calcite fans on the microbial columns are often observed. The micritic matrix in both digitated and clotted microbialites contains abundant sponge (fibers/spicules) remains.

4-Conclusion

According to Baud et al. (2021), laminations in microbial columns (of domical mounds) show that these structures are columnar stromatolite mounds. The low morphological diversity of microbialites perhaps indicates a relatively stable depositional condition. In addition, the dominance of columnar domical microbialites shows a deeper marine setting compared to shallow marine thrombolite-dominated microbialites in S. China (Bagherpour et al., 2017). That is also compatible with the interpretation of stable depositional conditions (e.g., immune from small sea level changes) in a deeper marine setting, as suggested by the low diversity of microbialites. Developing domical columnar microbialites in such a setting can also be interpreted as competition for light. The association of sponges with microbialites that complex metazoan-microbial reef ecosystems existed immediately after the extinction (Friesenbichler et al., 2108). The restriction of metazoan reef builders (after the end-Permian extinction) to near the microbialites suggests the capability of microbial activity to provide habitable niches even in O₂-depleted conditions such as the end-Permian extinction.

References

- Bagherpour, B., Bucher, H., Baud, A., Brosse, M., Vennemann, T., Martini, R., Guodun, K., 2017. Onset, development, and cessation of basal Early Triassic microbialites (BETM) in the Nanpanjiang pull-apart Basin, South China Block. *Gondwana Research* 44, 178–204. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2016.11.013>
- Baud, A., Richoz, S., Pruss, S., 2007. The lower triassic anachronistic carbonate facies in space and time. *Global Planetary Change* 55, 81–89. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.06.008>
- Baud, A., Richoz, S., Brandner, R., Krystyn, L., Heindel, K., Mohtat, T., Mohtat-Aghai, P., Horacek, M., 2021. Sponge Takeover from End-Permian Mass Extinction to Early Induan Time: Records in Central Iran Microbial Buildups. *Frontiers in Earth Science* 9:586210. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.586210>
- Brayard, A., Vennin, E., Olivier, N., Bylund, K.G., Jenks, J., Stephen, D.A., Bucher, H., Hofmann, R., Goudemand, N., Escarguel, G., 2011. Transient metazoan reefs in the aftermath of the end-Permian mass extinction. *Nature Geoscience* 4, 693–697. <https://doi.org/10.1038/ngeo1264>
- S., Peckmann, Friesenbichler, E., Richoz, S., Baud, A., Krystyn, L., Sahakyan Sahakyan, L., Vardanyan, J., Chanakhchi section Reitner, J., Heindel, K., 2018. Sponge-microbial buildups from the lowermost Triassic isotopes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, in southern Armenia: microfacies and stable carbon Palaeoecology* 490, 653–672. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2017.11.056>
- Lehrmann, D.J., 1999. Early Triassic calcimicrobial mounds and biostromes of the Nanpanjiang Basin, South China. *Geology* 27, 359–362. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1999\)027%3C0359:ETCMAB%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1999)027%3C0359:ETCMAB%3E2.3.CO;2)
- Raup, D.M., 1979. Size of the Permo-Triassic bottleneck and its evolutionary implications. *Science* 206, 217–218. <https://doi.org/10.1126/science.206.4415.217>
- Sepkoski, J.J.Jr., 1984. A kinetic-model of Phanerozoic taxonomic diversity 3. Post-Paleozoic families and mass extinctions. *Paleobiology* 10, 246–267. <https://doi.org/10.1017/S0094837300008186>
- Shapiro, R.S., 2000. A comment on the systematic confusion of thrombolites. *Palaios* 15, 166–169. <https://doi.org/10.2307/3515503>
- Taraz, H., Golshani, F., Nakazawa, K., Shimizu, D., Bando, Y., Ishii, K.I., Murata, M., Okimura, Y., Sakagami, S., Nakamura, K., Tukuoka, T., 1981. The Permian and the Lower Triassic systems in Abadeh region, central Iran. *Memoir of the Faculty of Education, Kyoto University, Series of Geology and Mineralogy* 47, 62–133. <https://doi.org/hdl.handle.net/2433/186643>

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Bagherpour, B., Soleimani, M., Faghih, A., 2024. Morphological diversity of microbialites and the significance of sponge remains in the Permian Triassic transition interval from Hambast Range, Central Iran. Adv. Appl. Geol. 14(2), 350-369.

DOI: 10.22055/AAG.2024.43965.2378

URL: https://aag.scu.ac.ir/article_18867.html

©2024 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers

بررسی تنوع شکل شناسی میکروبو سنگ ها و آثار اسفنج های گذر پرمین به تریاس در منطقه همبست، ایران مرکزی

برهان باقرپور*

بخش علوم زمین، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز، ایران

معصومه سلیمانی

بخش علوم زمین، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز، ایران

علی فقیه

بخش علوم زمین، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز، ایران

* bagherpour@shirazu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۰۱

چکیده

انقراض جمعی انتهای پرمین که به عنوان بزرگترین حادثه زیستی فانروزوئیک شناخته می شود، تاثیرات قابل توجهی بر رژیم رسوبی حاکم نیز داشته است. رسوبات اسکلتی سکوه های کربناته اواخر پرمین بلافاصله بوسیله رسوبات کربناته غیراسکلتی حاصل از گسترش فراوان میکروبو سنگ ها پوشیده می شوند. در این مطالعه تنوع شکل شناسی، ارگانیسیم های همراه و شرایط محیط تشکیل میکروبو سنگ های گذر پرمین به تریاس در منطقه همبست مورد مطالعه قرار گرفتند. هیچ گونه آثار فرسایشی در سطح رسوبات پرمین دیده نشده و میکروبو سنگ های منطقه مورد مطالعه به استثناء یک لایه با ساختمان مسطح و ساخت داخلی لخته ای، همگی دارای ساختمان گنبدی شکل و ساخت داخلی شعاعی/ستونی می باشند. وجود لامیناسیون در ساختمان داخلی ستون ها مشخصه استروماتولیت های ستونی می باشد و یا ساخت لخته ای نیز به روشنی مشخص کننده حضور میکروبو سنگ های ترومبولیتی می باشد. بررسی میکروسکوپی فضای بین لخته ها یا ستون های میکروبی نشان دهنده آثار فراوان باقی مانده اسفنج ها می باشد. بر اساس مشاهدات حاضر اینگونه استنباط می شود که، تنوع کم میکروبو سنگ ها در منطقه مورد مطالعه می تواند حاکی از ثبات نسبی شرایط رسوبگذاری باشد که در کنار غلبه میکروبو سنگ های شعاعی/ستونی نشان دهنده عمق بیشتر محیط رسوبگذاری نسبت به مناطقی با غلبه ترومبولیت ها می باشد. توسعه ساختمان گنبدی و ساخت ستونی احتمالاً رقابت میکروبو سنگ ها در جهت کسب نور بیشتر را نشان می دهد. همچنین حضور اسفنج های همراه، حاکی از توسعه ریف هایی با اکوسیستم پیچیده بلافاصله پس از انقراض انتهای پرمین است. با توجه به وابسته بودن حضور این ریف ها به میکروبو سنگ ها، تامین اکسیژن بوسیله عمل فتوسنتز می تواند عامل اصلی توسعه ریف های پیچیده در شرایط نامطلوب جهانی پس از انقراض باشد. **واژه های کلیدی: میکروبو سنگ ها، گذر پرمین به تریاس، سازند همبست، سازند الیکا، اسفنج.**

۱- مقدمه

به تریاس (Permian Triassic Boundary: PTB) بین 251.880 ± 0.031 و 251.941 ± 0.037 شکل گرفته اند (Burgess et al., 2014). در آب های کم عمق استوایی، تولید کربنات کلسیم اسکلتی پرمین پسین با یک پسروی جهانی دریا مصادف با PTB (Yin et al., 2014) به پایان می رسد و با تولید میکروبو سنگ ها در ابتدای تریاس جایگزین می شود (به عنوان مثال، Lehrmann et al., 2003, 2015) و فراوانی آن ها در طول اشکوب گریسباخین (ابتدای تریاس) به اوج خود می رسد (Lehrmann, 1999; Baud et al., 2007; Brayard et al., 2011). از شناخته شده ترین مثال های این

میکروبو سنگ ها (Microbialites) را می توان رسوبات ارگانیکی در نظر گرفت که در نتیجه تجمع میکروبو ها (بخصوص سیانوباکتری ها) شکل گرفته اند (Burne and Moore, 1987). گسترش این سنگ های رسوبی، که در زمان های مشخصی به بیشترین فراوانی رسیده اند، در دریاهای کم عمق نزدیک به استوا یکی از مشخصه های گذر پرمین به تریاس است. این میکروبو سنگ ها در ارتباط با تغییرات اکولوژیک بلافاصله پس از بزرگترین انقراض جمعی فانروزوئیک (Raup, 1979; Sepkoski, 1984)، و همزمان با گذر پرمین

Payne et al., 2007; Song et al., 2009; Lehrmann)
(et al., 2015)، سطح ناپیوسته سنگ آهک‌های پرمین بالایی
را به عنوان سطح انحلال شیمیایی زیردریایی ناشی از اسیدی-
شدن ستون آب تفسیر کردند. هرچند مطالعه گسترده این
سطح توسط Bagherpour و همکاران (۲۰۱۷) نشان داد که
هم انحلال شیمیایی و هم فرسایش فیزیکی می‌توانند از عوامل
وجود آورنده سطح ناپیوسته رسوبات پرمین بالایی باشند.
شکل گرفتن انواع مختلف میکروبرسنگ‌ها (انواع دارای ساخت
لخته‌ای و یا شعاعی) در پاسخ به عوامل محیطی از جمله عمق
آب و در دسترس بودن نور تفسیر شده‌اند. به نظر می‌رسد که
توقف رشد میکروبرسنگ‌ها هم در ارتباط مستقیم با نوع
رسوبات (آواری یا کربناته) پوشاننده آنها باشد.
یکی از نکاتی که اخیراً مورد توجه محققین قرار گرفته است
وجود اسفنج‌ها و بیوهرم‌های میکروبی- اسفنجی در گذر
پرمین به تریاس می‌باشد که به دلیل اندازه کوچک باقی‌مانده
اسفنج‌ها و روش‌های کمتر شناخته شده حفاظدگی فقط در
مقیاس میکروسکوپی قابل مطالعه است. این در حالی است که
اثبات وجود اسفنج‌ها در این بازه زمانی دارای اهمیت
فوق‌العاده‌ای در تفسیر محیطی می‌باشد.
اگرچه کل توالی پرمین و ابتدای تریاس در دره همبست
به صورت گسترده مورد بررسی محققان متعدد قرار گرفته است
(Korte et al., 2004; Kozur, 2004, 2005, 2007;)
Horacek et al., 2007; Shen et al., 2009; Richoz et
al., 2010; Liu et al., 2013; Shen et al., 2013;
Ghaderi et al., 2014b; Leda et al., 2014;
Bagherpour et al., 2017; Angiolini et al., 2017)، این
مطالعه فقط بر روی بازه حاوی میکروبرسنگ‌ها در انتهای
پرمین و ابتدای تریاس متمرکز شده است. اهداف این مطالعه
عبارتند از: ۱- بررسی آثار فرسایش و ناپیوستگی در انتهای
رسوبات پرمین. ۲- توصیف و بررسی انواع مختلف
میکروبرسنگ‌ها در مقیاس‌های میکروسکوپی و میکروسکوپی.
۳- بررسی گسترش و تغییرات جانبی رسوبات حاوی
میکروبرسنگ‌ها. ۴- اثبات و بررسی حضور اسفنج‌ها به عنوان
یکی از ارگانیزم‌های موجود در اکوسیستم بلافاصله پس از
انقراض انتهای پرمین. ۵- بررسی کاربرد موارد فوق در شرایط
محیطی زمان تشکیل رسوبات مطالعه شده.

میکروبرسنگ‌ها می‌توان از انواع موجود در جنوب چین
Lehrmann et al., 2003; Ezaki et al., 2008; Yang et)
Baud et al.,)، ترکیه (al., 2011; Jiang et al., 2014
Taraz et al., 1981; Kozur, 2005,) و ایران (1997, 2005
2007; Baud et al., 2007; Richoz et al., 2010; Leda
et al., 2014) نام برد. میکروبرسنگ‌های گذر پرمین به تریاس
(Permian Triassic Boundary Microbialites: PTBM)
دارای یک توزیع مشخص استوایی بوده و معمولاً به عنوان
اکوسیستم‌های خالی شده از بی‌مهرگان (Awramik, 1990;
Schubert and Bottjer, 1992) یا رخساره‌های غالب
پرکامبرین با غلبه میکروبرسنگ‌ها (عمدتاً سیانوباکتری‌ها) آب‌های
کم عمق تفسیر می‌شوند (Sepkoski et al., 1991; Baud)
et al., 1997, 2002, 2007; Kershaw et al., 1999,
2007; Pruss et al., 2006; Ezaki et al., 2008).
عده‌ای از دانشمندان توسعه چشمگیر رسوبات PTBM
(Permian Triassic Boundary Microbialites) را
مربوط به حذف متازوئ‌هایی نظیر گاستروپودها که می‌توانند
از میکروبرسنگ‌ها تغذیه کنند در اثر انقراض دسته جمعی
پرمین-تریاس می‌دانند (Schubert and Bottjer, 1992;)
Lehrmann, 1999; Pruss et al., 2006). علاوه بر آن
توضیحات دیگری مانند شرایط فوق اشباع در اقیانوس‌ها و
همچنین بالا آمدن آب‌های قلیایی از توده‌های عمیق تر آب‌های
فاقد اکسیژن نیز وجود دارد (Kershaw et al., 1999,)
Kershaw (2007). اخیراً Kershaw و همکاران (۲۰۱۲) نظر قبلی خود
مبنی بر اهمیت بالا آمدن آب‌های قلیایی را مورد بازنگری قرار
داده و بر اهمیت ورود رسوبات آواری بر تشکیل
میکروبرسنگ‌ها (بخصوص در جنوب چین) تاکید کردند. لازم
به ذکر است که Lehrmann و همکاران (۲۰۱۵) همچنین
ضحیم نشدن میکروبرسنگ‌ها به سمت حاشیه سکو را به
عنوان شواهدی در رد تاثیر بالا آمدن آب‌های قلیایی بدون
اکسیژن تفسیر کردند.
بررسی نحوه شروع رشد، توسعه ساختارهای مختلف و
توقف رشد PTBM می‌تواند درک فرآیندهای اساسی که
گسترش رسوبات سنگ آهک میکروبی را تقویت می‌کنند،
بهبود ببخشد. لازم به ذکر است که ماهیت سطحی که رشد
میکروبرسنگ‌ها از روی آنها آغاز می‌شود، یعنی مرز ناپیوسته
بین سنگ آهک اسکلتی پرمین پسین و PTBM موضوع
تفاسیر متفاوت بوده است. در جنوب چین محققان مختلفی

۲- زمین شناسی

۲-۱- زمین شناسی عمومی

منطقه همبست در انتهای پرمین، در حاشیه جنوبی خرده قاره سیمین که دو اقیانوس نئوتتیس و پالئوتتیس را از هم جدا می‌کرد واقع بوده است (شکل a۱). همچنین بازسازی‌های جغرافیای دیرینه (Muttoni and Kent, 2019) نشان می‌دهد که منطقه آباد در ساحل شمالی نئوتتیس، در ناحیه سنندج-سیرجان متعلق به خرده قاره سیمین قرار دارد (Hassanzadeh and Wernicke, 2016). این منطقه با پلتفرم‌های کربناته، حاوی فسیل‌های فراوان اسکلتی (بی‌مهرگان) در پرمین پسین بوده که بوسیله یک لایه نازک رسوبات غیر کربناته (رسی) و سپس رسوبات کربناته غیراسکلتی (میکروبو سنگ‌ها) پوشیده شده‌اند. میکروبو سنگ‌های این زمان در قسمت مقابل منطقه مورد مطالعه یعنی در حاشیه شمالی گندوانا (زاگرس امروزی) از جمله در قانده سازند کنگان نیز به وفور گزارش شده‌اند (Wei et al., 2005; Insalaco et al., 2006; Wang et al., 2007, 2020; Heindel et al., 2015, 2018; Foster et al., 2019).

۲-۲- برش مورد مطالعه

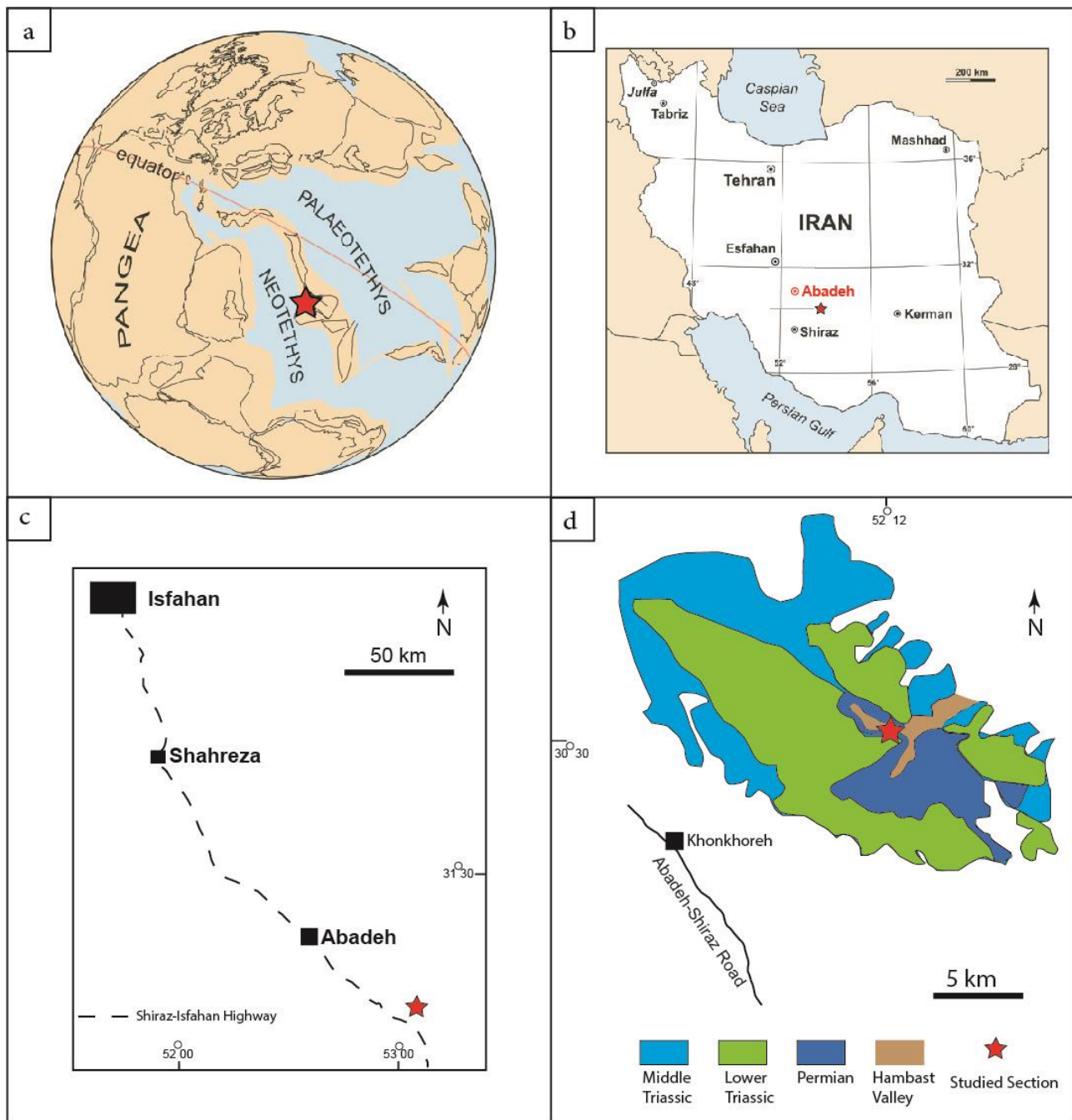
منطقه مورد مطالعه در دره همبست و در ۵۸ کیلومتری جنوب شرق آباد قرار گرفته (شکل b۱ و c) و شامل توالی ضخیمی از رسوبات پرمین و تریاس می‌باشد. رسوبات پرمین در منطقه مورد مطالعه به ۷ واحد (واحد‌های ۱ تا ۷) و رسوبات تریاس به ۵ واحد (واحد‌های a-e) تقسیم شده‌اند (Taraz et al., 1981; Heydari et al., 2000; Chen et al., 2020). پرمین بالایی در این برش شامل قسمت بالای واحد ۵ و واحد‌های ۶ و ۷ (معادل سازند همبست) می‌باشد. قدیمی‌ترین رسوبات تریاس شامل واحد a است و معادل سازند الیکا می‌باشد.

محدوده مورد بررسی در این مطالعه شامل بالاترین قسمت سازند همبست و قانده سازند الیکا می‌باشد (شکل ۲ و ۳). رسوبات پرمین بالایی (چانگزینگین) در این برش شامل طبقات آهکی نودول دار متوسط لایه با آمونیت فراوان هستند که بصورت متناوب از لایه‌های قرمز و خاکستری تشکیل

شده‌اند (شکل a۴). سازند همبست در این برش با یک لایه رس زیتونی رنگ به ضخامت ده سانتی‌متر (Boundary Clay) پوشیده شده است (شکل ۳ و a۵). این لایه رس با رسوباتی به ضخامت بین ۱۵۰ تا ۱۷۰ سانتی‌متر متشکل از رسوبات میکروبی با ساختارها و رخساره‌های متفاوت در قاعده سازند الیکا پوشیده می‌شود (شکل ۳ و c۴). رسوبات میکروبی به نوبه خود با آهک‌های نازک لایه و تیره سازند الیکا پوشیده می‌شوند (شکل b۴). با توجه به اینکه هدف اصلی این تحقیق، مطالعه محدوده حاوی رسوبات میکروبی سازند الیکا بوده، در ادامه توصیف دقیقی از این واحد ارائه شده است. ضخامت، شکل‌شناسی و رخساره رسوبات میکروبی در منطقه مورد مطالعه (دره همبست) بصورت جانبی به سرعت تغییر می‌کند، به همین منظور پس از انجام بازدید صحرایی گسترده، کامل‌ترین و ضخیم‌ترین محدوده جهت بررسی انتخاب شد (شکل c۴).

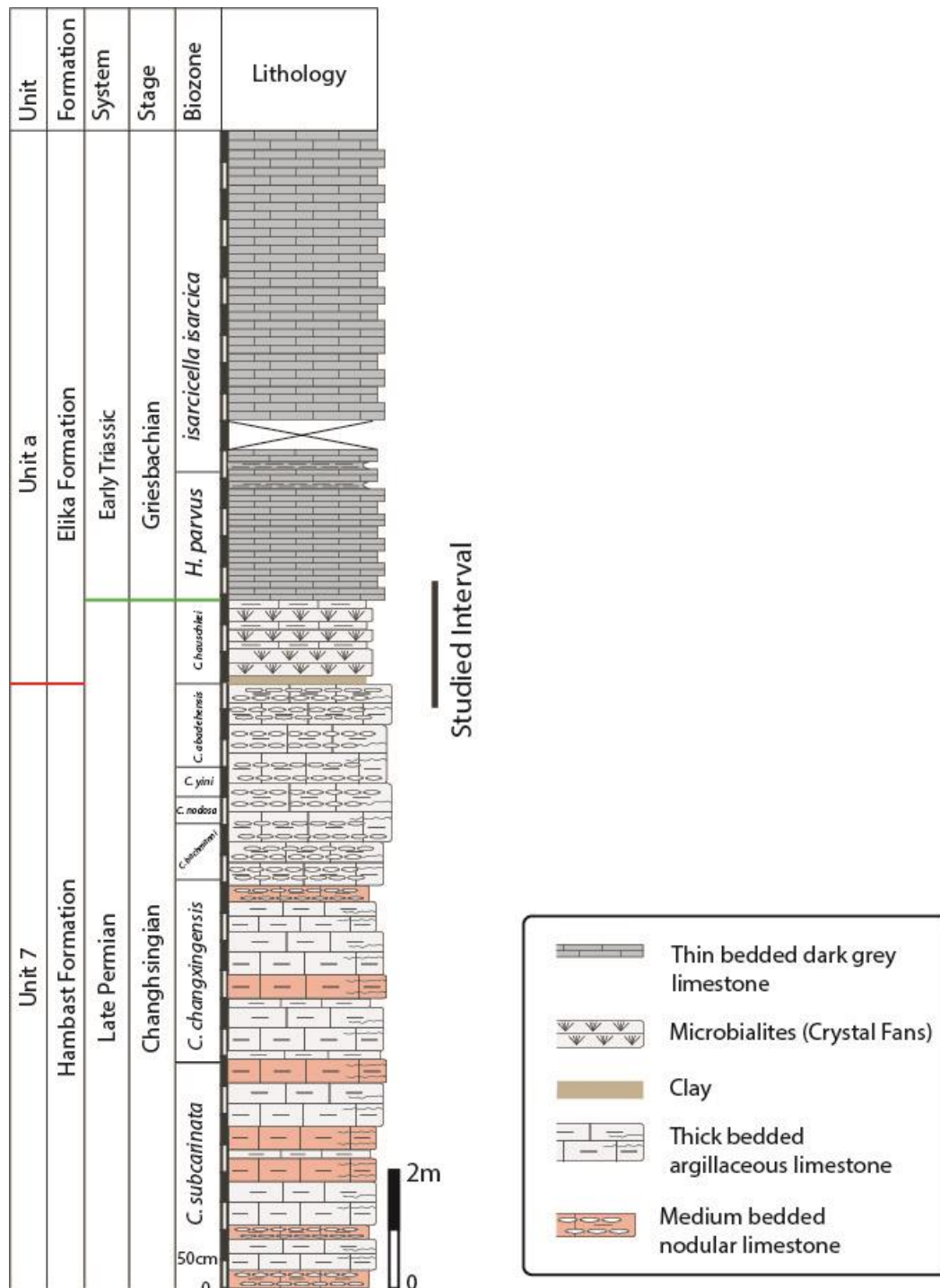
۲-۳- زیست چینه‌نگاری و سن برش مورد مطالعه

برش مورد مطالعه در این تحقیق منطبق بر برش مطالعه شده توسط Chen و همکاران (۲۰۲۰) می‌باشد، به همین دلیل بایوزون‌های معرفی شده توسط محققین، در این مطالعه نیز استفاده شده‌اند (شکل ۲ و ۳). مرز دو آشکوب ووچیاپینگین و چانگزینگین در سازند همبست بوسیله اولین حضور کنودونت *Clarkina wangi* در بالاترین قسمت واحد ۶ سازند مذکور مشخص می‌شود و واحد ۷ این سازند به ترتیب شامل زون‌های *Clarkina subcarinate*, *Clarkina changxingensis*, *Clarkina abadehensis*, *Clarkina yini*, *Clarkina nodosa* می‌باشد. محدوده میکروبو سنگ‌ها در بایوزون *Clarkina hauschkei* قرار گرفته که معرف بالاترین (جوانترین) رسوبات پرمین می‌باشد. آغاز تریاس در این مطالعه با اولین ظهور کنودونت *Hindeodus parvus* مشخص شده است. ۴ متر آغازین سازند الیکا مربوط به بایوزون *Hindeodus parvus* می‌باشند و انتهای این زون نیز با ظهور کنودونت *Isarcicella isarcica* مشخص می‌شود که معرف سن تریاس پیشین می‌باشد.



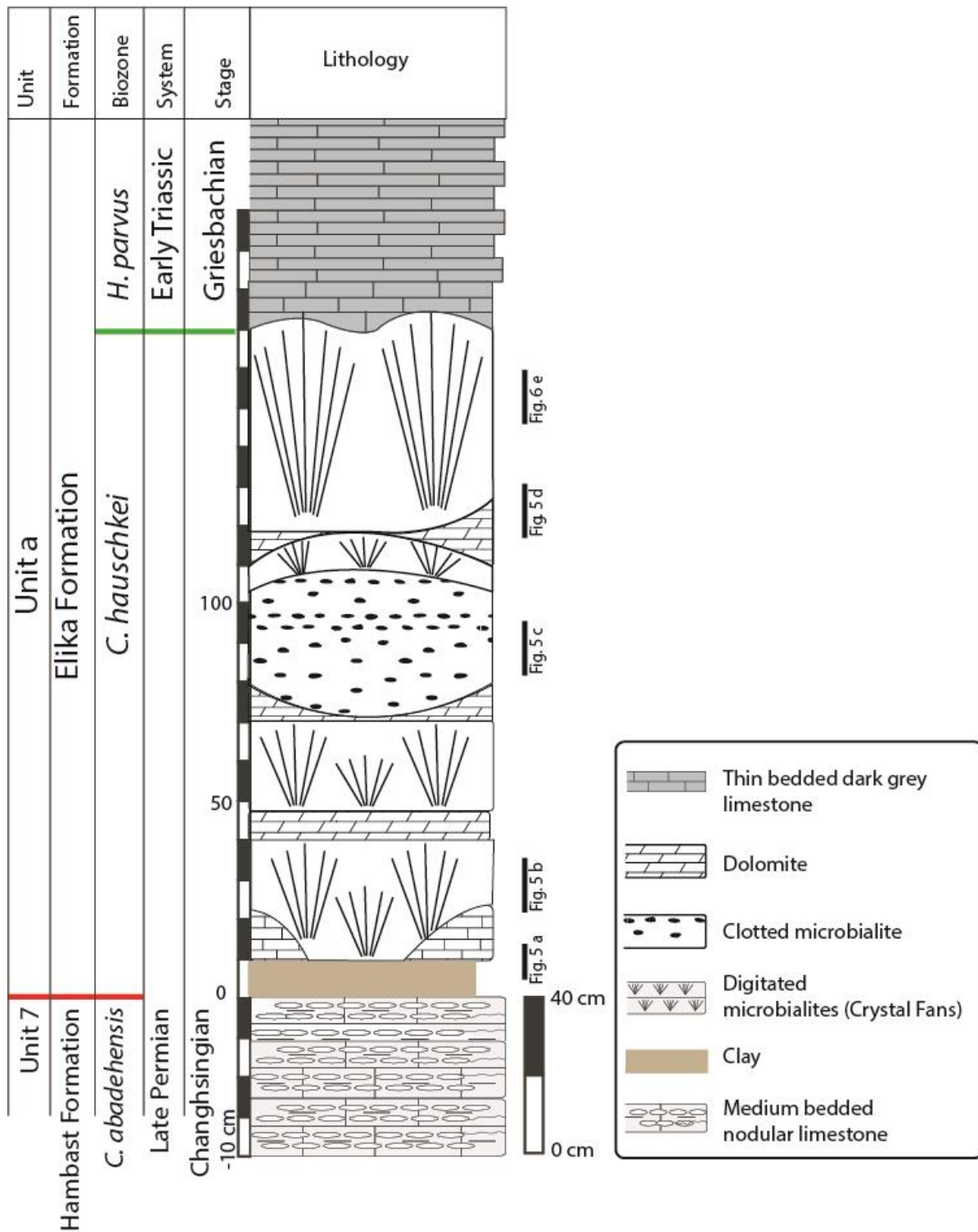
شکل ۱- نقشه منطقه مورد مطالعه. (a) موقعیت جغرافیای دیرینه منطقه مورد مطالعه در انتهای پرمین و ابتدای تریاس (after Stampfli and Borel, 2002). (b) موقعیت جغرافیایی دره همبست در جنوب شرق آباد، (c) نقشه راه‌های اصلی در محدوده مورد مطالعه و (d)، نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه و موقعیت دره همبست (برگرفته از Taraz et al., 1981)

Fig. 1. Maps of the studied area. (a) Paleogeographic position of the Hambast Range during the Permian–Triassic transition (after Stampfli and Borel, 2002), (b) Geographic position of the Hambast valley, (c) Geographic position of the studied section near the Shiraz-Isfahan Road, and (d) Geologic map of the studied area (after Taraz et al., 1981).



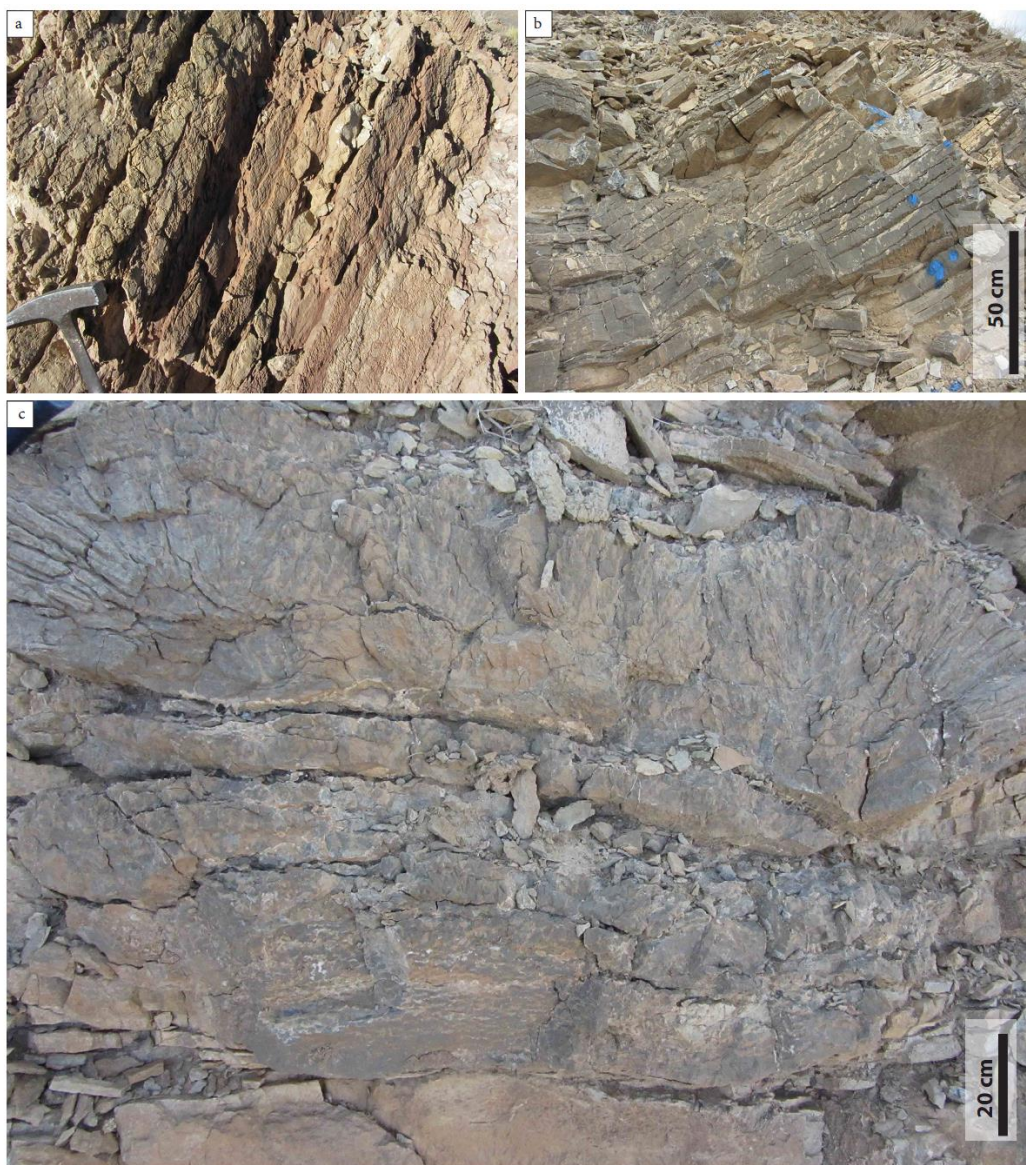
شکل ۲- برش چینه‌شناسی مقطع مورد مطالعه شامل بالاترین قسمت سازند همبست و قائده سازند الیکا. بایوزون‌های (کنودونت) شناسایی شده از Chen و همکاران (۲۰۲۰). آغاز تریاس بوسیله اولین حضور *Hindeodus parvus* مشخص شده است. بایوزون‌ها از پایین به بالا شامل زون‌های *Clarkina subcarinata*, *C. changxingensis*, *C. bachmanni*, *C. nodosa*, *C. yini*, *C. abadehensis*, *C. hauschkei*, *Hindeodus parvus* و *Isarcicella isarcica* می‌باشند.

Fig. 2. The stratigraphic section of the studied section includes the uppermost part of Hambast Formation and base of Elika Formation. Identified conodont biozones are from Chen et al. (2020). The beginning of the Triassic is marked by the first appearance of *Hindeodus parvus*. Biozones from bottom to top include *Clarkina subcarinata*, *C. changxingensis*, *C. bachmanni*, *C. nodosa*, *C. yini*, *C. abadehensis*, *C. hauschkei*, *Hindeodus parvus* and *Isarcicella isarcica*.



شکل ۳- برش چینه‌شناسی با دقت بالای محدوده میکروبو سنگ‌های پرمین-تریاس برش همبست.

Fig. 3. High-resolution stratigraphic section of the Permian-Triassic microbialites interval in the Hambast section.



شکل ۴- تصاویر صحرایی برش همبست. (a) لایه‌های متوسط لایه آهک نودول‌دار حاوی آمونیت پرمین (سازند همبست). (b) لایه‌های تیره و نازک لایه تریاس (سازند الیکا) و (c) توالی میکروب‌سنگ‌های قاعده سازند الیکا (محدوده مورد مطالعه).

Fig. 4. Field photograph of the Hambast section. (a) Medium-bedded nodular limestone containing abundant Permian ammonites (Hambast Formation). (b) Thin-bedded dark grey limestone of the Triassic Elika Formation and (c) Succession of the microbialites in the basal part of the Elika Formation (studied interval).

۳- روش مطالعه

۳-۱- مطالعات صحرایی

در این تحقیق پس از انجام مطالعات صحرایی در دره همبست (شکل ۱d) یک برش که دقیقاً منطبق بر برش ارائه شده توسط Chen و همکاران (۲۰۲۰) می‌باشد، انتخاب شد. این برش که دارای ضخیم‌ترین توالی از میکروب‌سنگ‌ها بوده و بیشترین تنوع شکل‌شناسی آنها را نیز در بر می‌گیرد به صورت لایه به

لایه مطالعه شد (شکل ۳) و تعداد ۲۱ نمونه جهت تهیه مقاطع نازک میکروسکوپی برداشت گردید.

۳-۲- مطالعات میکروسکوپی

مقاطع نازک میکروسکوپی بوسیله یک میکروسکوپ Olympus BX 41 مورد بررسی قرار گرفتند. این رسوبات در چهار مقیاس (۱- مگا ۲- ماکرو ۳- مزو و ۴- ریزساختار) ارائه شده توسط Shapiro (۲۰۰۰) مورد بررسی قرار گرفتند. مقیاس‌ها بدین

قبلاً گفته شد مبنای بایواستراتیگرافی این مطالعه چهارچوب اخیر ارائه شده توسط Chen و همکاران (۲۰۲۰) می‌باشد که آغاز تریاس را دقیقاً مطابق با بالاترین افق میکروبو سنگ‌ها در نظر گرفته است.

ساختارهای بزرگ مقیاس از چند دسی‌متر تا یک متر تشکیل شده‌اند که عمدتاً ساختمان‌های گنبدی و یا کاسه‌ای (شکل d-b5) و در مواردی صفحه‌ای (شکل c5) را تشکیل می‌دهند. ساختمان‌های گنبدی با ساخت‌های درونی شعاعی را محققین مختلف به نام‌های استروماتولیت‌های شعاعی (Kershaw et al., 2007)، استروماتولیت‌های منشعب (Baud et al., 2007) و بادبزنی‌های تشکیل شده از بلورهای شعاعی (Heydari et al., 2013) نامیده‌اند. مطالعه دقیق‌تر این ساختارها در مقیاس میکروسکوپی که می‌تواند به صحت هر کدام از این توصیفات اشاره کند در بخش بعد ارائه شده است.

همانطور که در رخنمون (شکل ۴) (و همچنین مقاطع نازک شکل ۶) قابل مشاهده است، این بیوهرم‌ها از ستون‌های باریک و دارای لایه‌بندی نازک تشکیل شده‌اند که از یک پایه یا هسته مشترک بیرون زده و در کنار هم به عنوان استروماتولیت ستونی رشد می‌کنند. این ساختمان‌ها که بدون توجه به ساختارهای میکروسکوپی شبیه بلورهای شعاعی کربنات کلسیم هستند، توسط Heydari و همکاران (۲۰۰۳) و Leda و همکاران (۲۰۱۴) به عنوان "لایه‌های بلورهای شعاعی معمایی" در نظر گرفته می‌شوند.

لایه میانی (سومین لایه میکروبو سنگ، شکل ۳) ساختمانی محدب الطرفین تا مسطح را به نمایش می‌گذارد و تنها لایه‌ای می‌باشد که مزو ساختارهای لخته‌ای (شکل c5) را دارا می‌باشد. در این نوع ساختارها، لخته‌های (تیره رنگ) با اندازه چند میلی‌متر تا چند سانتی‌متر در یک زمینه با رنگ روشن‌تر قرار می‌گیرند و بطور کلی به صورت افقی جهت‌یافتگی دارند. حاشیه ساختارهای لخته‌ای بصورت کاملاً مشخص و نامنظم بوده و به سمت بالای لایه تعداد لخته‌ها افزایش پیدا می‌کند (شکل a7). برخلاف ساختارهای شعاعی که در میکروبو سنگ‌های ایران غالب هستند، میکروبو سنگ‌های لخته‌ای (ترومبولیت‌ها) ساختار غالب این رسوبات در قسمت شرقی تئیس (جنوب چین) می‌باشند (Bagherpour et al., 2017).

صورت توصیف می‌شوند که: ۱- مگا ساختارها به عنوان چشم‌اندازهای بزرگ میکروبو سنگ‌ها، ۲- ساختارهای ماکرو به عنوان شکل رشد میکروبو سنگ‌ها از ده‌ها سانتی‌متر تا چند متر (مثلاً مسطح، ستونی یا گنبدی) ۳- مزو ساختارها به عنوان بافت داخلی عناصر ساختاری بزرگ که با چشم غیرمسلح قابل مشاهده هستند (مثلاً لخته‌ای، دندریتی یا شعاعی) و ۴- ریزساختارها به عنوان فابریک‌هایی که در زیر میکروسکوپ مشاهده می‌شوند. در این طبقه‌بندی، سه نوع مزوساختار را می‌توان تشخیص داد: ساختارهای دارای لامیناسیون (استروماتولیت‌ها)، لخته‌ای (ترومبولیت‌ها) و شعاعی (دندرولیت‌ها و یا crystal fan میکروبو سنگ‌ها) (Bagherpour et al., 2017).

۴- نتایج

نتایج و تصاویر ارائه شده در زیر از بررسی‌های میدانی و میکروسکوپی نمونه‌های جمع‌آوری شده بدست آمده است.

۴-۱- توصیفات صحرائی

گذار پرمین-تریاس در رشته کوه همبست در ناحیه آباد، بلافاصله پس از انقراض (خط قرمز رنگ در شکل‌های ۲ و ۳)، لایه‌ای رسی (به نام لایه رس مرزی) با ضخامت ۱۰ سانتی‌متر (شکل a5) را نشان می‌دهد که توسط محدوده‌ای از رسوبات به ضخامت ۱،۶۰ متر از گنبد‌های (یا ستون‌های کم ارتفاع) متوالی با ساختارهای شعاعی متعدد پوشیده شده است. این لایه متشکل از تجمعات دسی‌متری است که در چهار سطح (لایه) متوالی توزیع شده و در زیر سنگ آهک‌های تیره صفحه‌ای با لایه‌بندی نازک قرار گرفته‌اند. در مقیاس مگاساختار، میکروبو سنگ‌ها به سرعت و بصورت جانبی تغییر رخساره و ضخامت می‌دهند، بصورتی که تنها در فاصله ۳۰ متری از برش مورد مطالعه تنها یک گنبد با ساخت شعاعی دیده می‌شود که در بین لایه‌های نازک عمدتاً دولومیتی قرار گرفته است (شکل f5).

هرچند مطالعات قدیمی‌تر از جمله Richoz و همکاران (۲۰۱۰) و Gallet و همکاران (۲۰۰۰) این رسوبات را جزیی از تریاس در نظر گرفته و مرز پرمین به تریاس را همزمان با پایین‌ترین افق میکروبو سنگ‌ها در نظر گرفته‌اند، همانطور که



شکل ۵- (a) لایه رس زیتونی قاعده میکروبیالیت‌ها. هیچگونه آثار فرسایشی در قاعده سازند الیکا دیده نمی‌شود. (b) اولین لایه میکروبیالیت قاعده سازند الیکا با ساخت شعاعی. (c) ساخت لخته‌ای. (d) ختم‌شدگی (termination) لایه دولومیتی در مجاورت میکروبیالیت گنبدی شکل. (e) ساخت شعاعی آخرین لایه میکروبیالیت زیر آهک‌های نازک لایه تیره سازند الیکا و (f) ساختار گنبدی و منفرد یک میکروبیالیت بدون گسترش جانبی. برای دیدن موقعیت چین‌شناسی هر تصویر به شکل ۳ مراجعه کنید.

Fig. 5. (a) Boundary clay in the base of the microbialites unit. Note the absence of any erosional feature (b) First microbialite bed with digitated structure in the base of the Elika Formation. (c) Clotted structure. (d) Termination of dolomitic bed next to the domical microbialites. (e) Digitated structure of the uppermost microbialite bed below the thin bedded dark grey limestone of the Elika Formation and (f) An individual domical microbialite without any lateral continuity. See fig 3 for the stratigraphic position of the figures.

۴-۲- توصیفات میکروسکوپی

مطالعه میکروبو سنگ‌های شعاعی (شکل a۶) در مقیاس میکروسکوپی حاکی از وجود لامیناسیون (هم جهت با لایه‌بندی) در هر یک از ستون‌ها می‌باشد (شکل d-b۶). این ستون‌ها (با عرض ۱ تا ۱۰ میلی‌متر و طول ۱ تا ۱۰ سانتی‌متر) که درون یک زمینه میکرایتی تیره قرار گرفته‌اند در بسیاری از مواقع بوسیله دسته‌ای از بلورهای کلسیت اسپاریتی به صورت پوشاننده (encrusting) و رشد مضاعف (overgrowth) عمدتاً در جهت عمود بر لایه‌بندی دیده می‌شوند (شکل d-c۶). این ستون‌ها در بسیاری از مواقع خمیده (هم در مقیاس مزو و هم در مقیاس میکروسکوپی) شده‌اند (شکل a۶). نکته جالب توجه این است که حاشیه ستون‌های میکروبو سنگ‌ها نسبت به بلورهای کلسیت اسپاری با ساختار شعاعی، بسیار مشخص‌تر می‌باشد. به عقیده Baud و همکاران (۲۰۲۱) این بلورهای کلسیت بلورهای آراگونیتی بوده‌اند که بعداً توسط کلسیت جایگزین شده‌اند. هر چند این رخساره در جنوب چین چندان گسترش نیافته است و تنها گزارش موجود از ساختار مشابه بوسیله Yang و همکاران (۲۰۱۹) ارائه شده است، اما همین رخساره با سن مشابه در اطراف خرده قاره سیمیرین در منطقه باغوک (Leda et al., 2014) و همچنین در جنوب ارمنستان (Friesenbichler et al., 2018) به وفور مشاهده و گزارش شده‌اند.

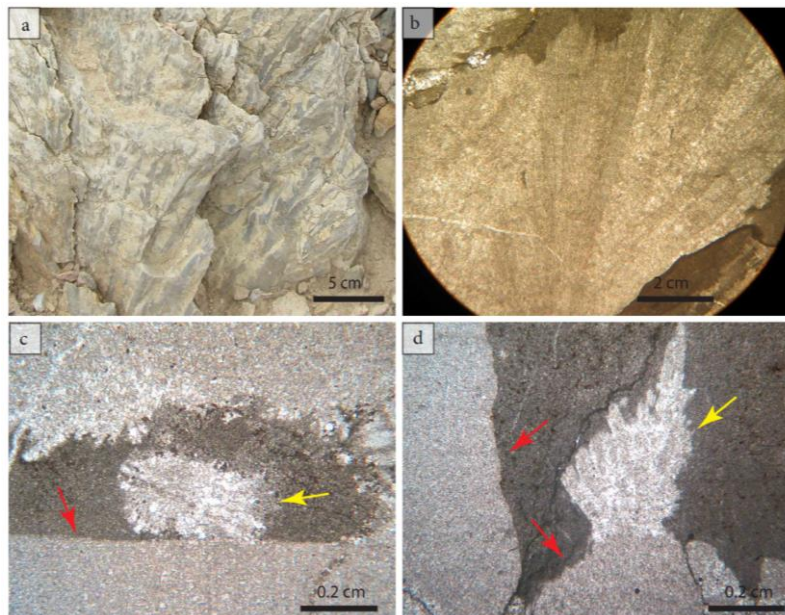
مطالعه میکروبو سنگ‌های لخته‌ای (شکل a۷) در مقیاس میکروسکوپی وجود لخته‌های (clotted structure) کلسیتی بدون ساختمان داخلی که در زمینه میکرایتی قرار گرفته‌اند را نشان می‌دهد. این لخته‌ها در اندازه‌های ۱ تا ۱۰ میلی‌متر دیده می‌شوند و دارای حاشیه مشخص و بدون شکل هندسی مشخص می‌باشند. این لخته‌ها عمدتاً بهم پیوسته بوده و کمتر بصورت مجزا دیده می‌شوند (شکل c-b۷). جهت‌گیری خاصی در لخته‌ها در مقیاس میکروسکوپی دیده نمی‌شود. Bagherpour و همکاران (۲۰۱۷) با مطالعه گسترده میکروبو سنگ‌های گذر پرمین به تریاس جنوب چین چهار ساختار میکروسکوپی شامل ساختارهای نقطه‌ای (spotted)، مارپیچی (labyrinthic)، لایه‌ای با ساخت فنسترال (Layered structure with stromatactis-type fenestral texture)، حفره‌ای و رگچه‌ای (vesicular) برای ترومبولیت‌ها معرفی کردند. از منظر این

طبقه‌بندی ترومبولیت‌های همبست عمدتاً در تقسیم‌بندی مارپیچی (labyrinthic) قرار می‌گیرند.

مطالعه میکروسکوپی رسوبات دانه ریز پرکننده فضای بین ستون‌ها و یا لخته‌های میکروبو سنگ‌ها، حضور باقی‌مانده اسفنج‌های (احتمالاً دمواسپونجیا) را تایید می‌کند (شکل ۸). این آثار که در هر دو نوع میکروبو سنگ ترومبولیت‌ها (شکل d-a۸) و استروماتولیت‌های ستونی (شکل f-e۸) به وفور دیده می‌شوند، برش‌های عرضی و طولی سوزنی (غیر شش جهتی) اسفنج‌ها و همچنین بافت فیبر مانند این نوع اسفنج‌ها را نشان می‌دهند. در بعضی موارد که حفظ شدگی اسفنج‌ها مناسب می‌باشد، فرم هندسی پشته مانند و گلوبولی اسفنج‌ها نیز در مقاطع نازک قابل مشاهده است (شکل a۸). حضور همزمان اسفنج‌ها به همراه میکروبو سنگ‌های گذر پرمین به تریاس توسط Baud و همکاران (۲۰۱۷) و همکاران (۲۰۱۴) و Friesenbichler و همکاران (۲۰۱۸) از ایران مرکزی و جنوب ارمنستان گزارش شده‌اند.

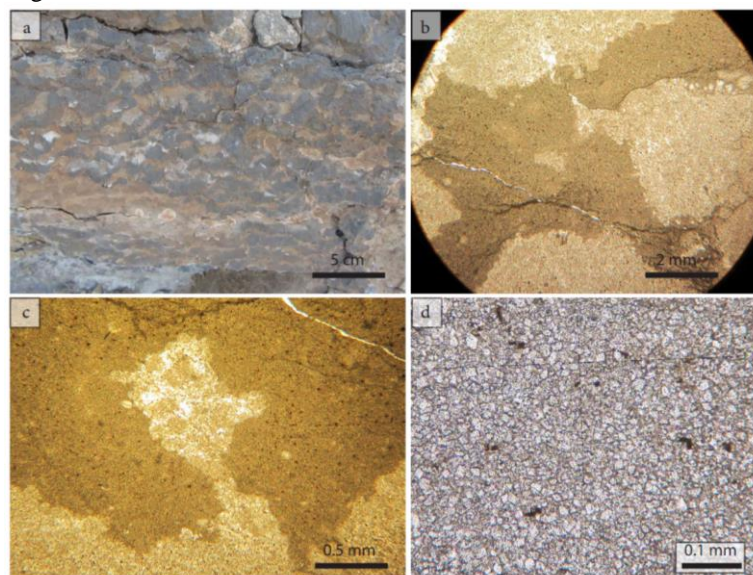
۵- بحث و نتیجه‌گیری

پسروی گسترده دریا در انتهای پرمین باعث ایجاد یک ناپیوستگی فرسایشی مهم تقریباً در تمام مناطق کم عمق دریایی در مقیاس جهانی شده است. این پایین‌رفتن سطح دریا که به همراه انحلال شیمیایی حاصل از اسیدی‌شدن اقیانوس‌ها باعث فرسایش فیزیکی بالاترین طبقات پرمین شده است، سطحی شدیداً ناهموار و غنی از اکسید آهن را بجا گذاشته است (Wignall et al., 2009; Lehrmann et al., 2015; Bagherpour et al., 2020). هر چند در مناطق عمیق‌تر دریا مانند برش معروف مرجع میشان در جنوب چین آثار فرسایش مشاهده نمی‌شود و مطالعات ژئوشیمیایی و دیرینه‌شناسی حاکی از رسوب‌گذاری پیوسته در این زمان می‌باشد (Shen et al., 2013). در مناطق کم عمق دریایی چین که پرمین بالایی از رسوبات سکوه‌های کربناته با فسیل‌های کفزی فراوان تشکیل شده‌اند، بالاترین سطح پرمین شدیداً فرسایش یافته بوده و مرز بین رسوبات پرمین و میکروبو سنگ‌ها تقریباً در تمام برش‌های موجود متشکل از یک لایه رسی غنی از مواد آتشفشانی و بدون مواد کربناته می‌باشد. Bagherpour و همکاران (۲۰۱۷) حضور این لایه بدون مواد کربناته را به عنوان عاملی مقاوم در مقابل فرسایش شیمیایی (حاصل از کاهش Ph آب اقیانوس‌ها) در



شکل ۶- میکروپسنگ‌های شعاعی برش همبست. (a) نمای نزدیک از شاخه‌های شعاعی میکروبی (تیره) در زمینه گلی (روشن). (b) تصویر میکروسکوپی یکی از ستون‌های میکروپسنگ‌های شعاعی در زمینه گل آهکی. (c و d) ستون میکروپسنگ‌های شعاعی (فلش قرمز) و کلسیت اسپاری (که احتمالاً جایگزین سوزن‌های آراگونیتی (فلش زرد) در زمینه گلی شده‌اند).

Fig. 6. Digitated microbialites of the Hambast section. (a) Close-up photograph of a digitated microbialite. Darker branches represent microbial columns in the lighter micritic groundmass. (b) Microphotograph of a microbial column in micritic groundmass. (c and d) photomicrograph of microbial column (red arrow) and overgrowth sparitic calcite (yellow arrow) that probably replacing aragonite needles.

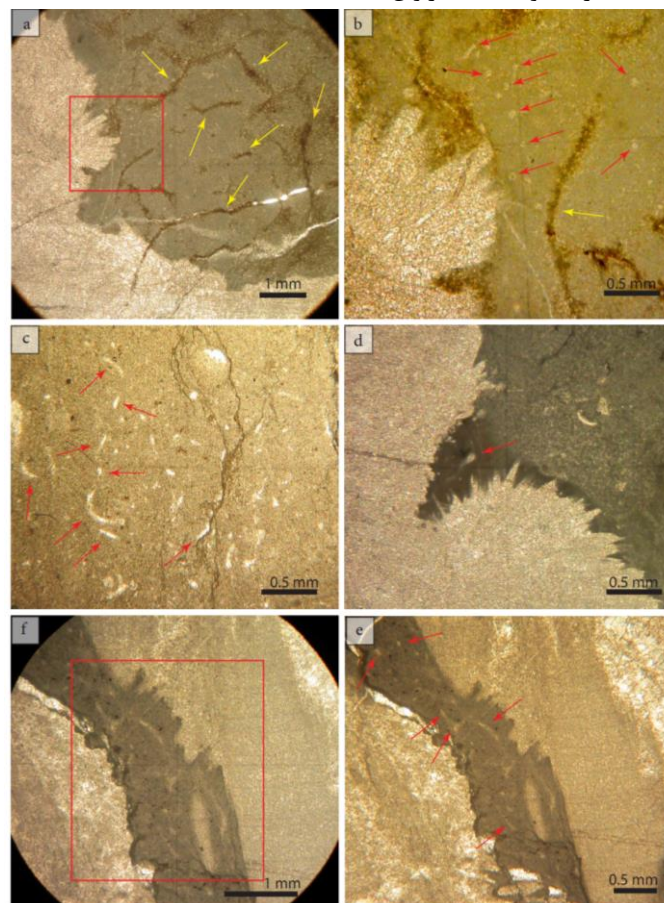


شکل ۷- ترومبولیت‌های برش همبست. (a) نمای نزدیک از توده‌های لخته‌های میکروبی (تیره) در زمینه گلی (روشن). (b و c) تصویر میکروسکوپی لخته‌های میکروبی (روشن) در زمینه گل آهکی (تیره). فابریک دقیقاً مشابه توسط Bagherpour و همکاران (۲۰۱۷) از جنوب چین گزارش شده است و (d) تصویر میکروسکوپی دولومیت‌های ریز دانه در لایه‌های غیرمیکروبی همراه با میکروپسنگ‌های برش همبست.

Fig. 7. Thrombolites of the Hambast section. (a) Close-up photograph of mesoclots (dark patches) in (light) micritic groundmass. (b and c) Photomicrographs of mesoclots (dark patches) in (light) micritic groundmass. A similar structure is described by Bagherpour et al. (2017) form PTB thrombolite in South China and (d) Photomicrograph of fine dolomite crystals of non-microbial bed associated with microbialites of the Hambast section.

می‌باشد که نشان‌دهنده قسمت‌های عمیق‌تر حوضه رسوبگذاری می‌باشد. از همین منظر این رسوبگذاری پیوسته را می‌توان به محیط نسبتاً عمیق دریایی در انتهای پرمین نسبت داد. به نظر می‌رسد که حضور یک لایه رسی با مقدار کم مواد کربناته دقیقاً در موقعیت چینه‌شناسی لایه رسی/آتشفشانی جنوب چین می‌تواند به عنوان شاهدهی بر وجود شرایط اسیدی در تمام تتیس باشد.

زمان انقراض تفسیر کرده‌اند. همانطور که قبلاً توصیف شد مطالعات گسترده صحرایی و میکروسکوپی ما در این تحقیق هیچگونه آثار فرسایش و ناپیوستگی در مرز رسوبات پرمین و میکروب‌سنگ‌ها را نشان نمی‌دهد که همین مورد در کنار پیوستگی بایوزوناسیون با دقت بالای این برش (Chen et al., 2020) حاکی از رسوبگذاری پیوسته در این مرز می‌باشد. همانگونه که در توصیفات ارائه شد، رسوبات پرمین بالایی در منطقه همبست دارای فسیل‌های شناگر (آمونیت‌ها) فراوان



شکل ۸- تصاویر میکروسکوپی بقایای اسفنج‌های همراه میکروب‌سنگ‌ها. (a و b) شواهد حضور بقایای اسفنج‌ها در زمینه گلی قرار گرفته بین بلورهای کلسیت و ستون‌های میکروب‌سنگ‌های شعاعی. فلش‌های قرمز باقی مانده رشته‌ها/سوزن‌های اسفنج‌ها را نشان می‌دهند. فلش‌های زرد رنگ احتمالاً ساخت سه بعدی گلوبولی حاصل رشد اسفنج‌ها را نشان می‌دهد. چهارگوش قرمز در شکل b بزرگنمایی شده است، (c) باقی مانده رشته‌ها/سوزن‌های اسفنج‌ها در زمینه گلی میکروب‌سنگ‌ها، (d) باقی مانده رشته‌ها/سوزن‌های اسفنج‌ها در بین بلورهای کلسیت میکروب‌سنگ‌های شعاعی و (e و f) شواهد حضور زمینه گلی قرار گرفته در بین بلورهای کلسیت و ستون‌های میکروب‌سنگ‌های لخته‌ای. چهارگوش قرمز در شکل e با بزرگنمایی در f نمایش داده شده است.

Fig. 8. Photomicrographs of sponge remains associated with microbialites. (a and b) Sponge remains in the micritic sediments filling between calcite crystals and microbial columns. Red arrows indicating fibers/spicules and yellow arrows indicate the potential globular structure of sponge growth. Red rectangle in (a) is illustrated with higher magnification in (b), (c) Sponge remains in the micritic groundmass, (d) Sponge remains in the micritic groundmass between calcite crystals and (e and f) Sponge remains in the micritic groundmass of the thrombolites. Red rectangle in (e) is illustrated with higher magnification in (f).

سیمرین از جمله در ایران و ارمنستان (Leda et al., 2014; Friesenbichler et al., 2018; Baud et al., 2021)، حضور این موجودات را گزارش و مستندسازی کردند. به علاوه حضور اسفنج‌ها در حاشیه شمالی گندوانا یعنی زاگرس (کوه سرمه) و تاوروس (ترکیه) (Heindel et al., 2018; Foster et al., 2019) گزارش شده‌اند. بر اساس مطالعات پیشین و داده‌های ارائه شده در مطالعه حاضر، حضور همزمان میکروب‌سنگ‌ها (استروماتولیت‌ها و ترومبولیت‌ها) و متازوئ‌های (اسفنج‌ها) همراه، حاکی از وجود ریف‌هایی با اکوسیستم پیچیده بلافاصله پس از انقراض انتهای پرمین می‌باشد. از آنجا که تاکنون در هیچ نقطه از جهان وجود ریف‌ها به تنهایی بلافاصله پس از انقراض پرمین مشاهده نشده‌اند، این نکته مهم باید در نظر گرفته شود که توسعه این اکوسیستم‌های ریفی وابسته به وجود اسفنج‌ها نمی‌باشد. بلکه احتمالاً حضور میکروب‌ها (سیانوباکتری‌ها) به صورت محلی شرایطی را جهت رشد اسفنج‌ها و شکل گرفتن ریف‌های میکروبی-اسفنجی ایجاد کرده‌اند. یکی از این شرایط می‌تواند فراهم آوردن اکسیژن در اثر فتوسنتز در نزدیکی توده‌های میکروبی باشد. این مورد که قبلاً نیز توسط Bagherpour و همکاران (۲۰۱۷) و Forel و همکاران (۲۰۱۳) مطرح شده است، به شکل گرفتن عدسی‌های غنی از موجودات کفزی در بین گنبدهای میکروبی در مناطق با محیط رسوبی کم عمق (ترکیه، جنوب چین) منجر شده است. این مطالعات به روشنی اهمیت و نقش رشد میکروب‌سنگ‌ها را در کمک به بازیابی حیات پس از بزرگ‌ترین انقراض تاریخ زمین نشان می‌دهد.

میکروب‌سنگ‌های منطقه مورد مطالعه عمدتاً از ساختمان‌های گنبدی/کاسه‌ای شکل با ساخت شعاعی تشکیل شده‌اند و فقط در یک لایه ساختمان مسطح با ساخت لخته‌ای و فابریک مارپیچی (labyrinthic) دیده می‌شود. هرچند در مورد ترومبولیت بودن لایه دارای ساخت لخته‌ای توافق وجود دارد ولی منشأهای متفاوتی برای ساخت‌های شعاعی در نظر گرفته شده است. مطالعات میکروسکوپی ما در این منطقه به روشنی وجود لامیناسیون افقی در تمام شاخه‌های میکروب‌سنگ‌ها را نشان می‌دهد. از این رو، همانند Baud و همکاران (۲۰۲۱)، میکروب‌سنگ‌های شعاعی منطقه همبست را می‌توان به رشد همزمان با رسوبگذاری استروماتولیت‌های ستونی نسبت داد. یک ویژگی جالب توجه این میکروب‌سنگ‌ها خمیدگی ستون‌های استروماتولیت‌ها به اطراف می‌باشد که خود می‌تواند تأییدی بر این تفسیر باشد. این میکروب‌سنگ‌ها تنوع شکل‌شناسی به مراتب کمتر از رسوبات مشابه از جنوب چین نشان می‌دهند که احتمالاً حاکی از پایدارتر بودن محیط زندگی و رسوبگذاری در مناطق عمیق‌تر می‌باشد. حائز اهمیت است که تغییر قائم ترومبولیت‌ها به میکروب‌سنگ‌های شعاعی در جنوب چین به عمق بیشتر دریا در زمان شکل‌گیری ساخت‌های شعاعی نسبت داده شده‌اند که این مورد نیز مستقلاً می‌تواند تأییدی به عمق زیاد دریا، فراوانی میکروب‌سنگ‌های شعاعی، و تنوع کم میکروب‌سنگ‌ها در منطقه مورد مطالعه باشد.

بدلیل حفظ‌شدگی نه چندان خوب اسفنج‌ها و قابل تشخیص بودن آن‌ها فقط در مقیاس میکروسکوپی، حضور این ارگانیسم‌ها بلافاصله پس از بزرگ‌ترین انقراض فانروزوئیک تا مدت‌ها ناشناخته بود. اما مطالعات جدیدتر در اطراف خرده‌قاره

مراجع

- Angiolini, L., Crippa, G., Shen, S.Z., Zhang, H., Zhang, Y.C., Ghorbani, M., Ghorbani, M., Ovissi, M., 2017. Report of the Chinese, Italian, Iranian working group: The Permian- Triassic boundary sections of Abadeh revisited. *Permophiles* 65, 24-27.
- Awramik, S.M., 1990. Stromatolites. In: Briggs, D.E.G., Crowther, P.R. (Eds.), *Palaeobiology: A Synthesis*. Blackwell Scientific Publications, London. pp. 336-341.
- Bagherpour, B., Bucher, H., Baud, A., Brosse, M., Vennemann, T., Martini, R., Guodun, K., 2017. Onset, development, and cessation of basal Early Triassic microbialites (BETM) in the Nanpanjiang pull-apart Basin, South China Block. *Gondwana Research* 44, 178-204. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2016.11.013>
- Bagherpour, B., Bucher, H., Vennemann, T., Schneebeli-Hermann, E., Yuan, D.X., Leu, M., Zhang, C., Shen, S.Z., 2020. Are Late Permian carbon isotope excursions of local or of global significance? *Geological Society of America Bulletin* 132(3-4), 521-544. <https://doi.org/10.1130/B31996.1>
- Baud, A., Cirilli, S., Marcoux, J., 1997. Biotic response to mass extinction: the lowermost Triassic microbialites. *Facies* 36, 238-242. <https://doi.org/10.1007/bf02536885>

- Baud, A., Richoz, S., Cirilli, S., Marcoux, J., 2002. Basal Triassic carbonate of the Tethys: a microbialite world, in Proceedings of the 16th International Sedimentological Congress, Johannesburg, RAU University, Abstract Vol. 24-25, (Johannesburg: RAU University).
- Baud, A., Richoz, S., Marcoux, J., 2005. Calcimicrobial cap rocks from the basal Triassic units: western Taurus occurrences (SW Turkey). *Comptes Rendus Palevol* 4, 569–582. <https://doi.org/10.1016/j.crpv.2005.03.001>
- Baud, A., Richoz, S., Pruss, S., 2007. The lower triassic anachronistic carbonate facies in space and time. *Global Planetary Change* 55, 81–89. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.06.008>
- Baud, A., Richoz, S., Brandner, R., Krystyn, L., Heindel, K., Mohtat, T., Mohtat-Aghai, P., Horacek, M., 2021. Sponge Takeover from End-Permian Mass Extinction to Early Induan Time: Records in Central Iran Microbial Buildups. *Frontiers in Earth Science* 9:586210. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.586210>
- Brayard, A., Vennin, E., Olivier, N., Bylund, K.G., Jenks, J., Stephen, D.A., Bucher, H., Hofmann, R., Goudemand, N., Escarguel, G., 2011. Transient metazoan reefs in the aftermath of the end-Permian mass extinction. *Nature Geoscience* 4, 693–697. <https://doi.org/10.1038/ngeo1264>
- Burgess, S.D., Bowring, S., Shen, S.Z., 2014. High-precision timeline for Earth's most severe extinction. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111, 3316–3321. <https://doi.org/10.1073/pnas.1317692111>
- Burne, R.V., Moore, L.S., 1987. Microbialites: organosedimentary deposits of benthic microbial communities. *Palaios* 2, 241–254. <https://doi.org/10.2307/3514674>
- Chen, J., Shen, S.Z., Zhang, Y.C., Angiolini, L., Gorgij, M.N., Crippa, G., Wang, W., Zhang, H., Yuan, D., Li, X., Xu, Y., 2020. Abrupt warming in the latest Permian detected using high-resolution in situ oxygen isotopes of conodont apatite from Abadeh, central Iran. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 560, 109973. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2020.109973>
- Ezaki, Y., Liu, J., Nagano, T., Adachi, N., 2008. Geobiological aspects of the earliest Triassic microbialites along the southern periphery of the tropical Yangtze Platform: initiation and cessation of a microbial regime. *Palaios* 23, 356–369. <https://doi.org/10.2110/palo.2007.p07-035r>
- Forel, M.B., Crasquin, S., Kershaw, S., Collin, P.Y., 2013. In the aftermath of the end-Permian extinction: the microbialite refuge? *Terra Nova* 25, 137–143. <https://doi.org/10.1111/ter.12017>
- Foster, W.J., Heindel, K., Richoz, S., Gliwa, J., Lehrmann, D.J., Baud, A., Kolar-Jurkovšek, T., Aljinović, D., Jurkovšek, B., Korn, D., Martindale, R.C., Peckmann, J., 2019. Suppressed competitive exclusion enabled the proliferation of Permian/Triassic boundary microbialites. *Depositional Record* 2020, 62–74. <https://doi.org/10.1002/dep2.97>
- Friesenbichler, E., Richoz, S., Baud, A., Krystyn, L., Sahakyan Sahakyan, L., Vardanyan, S., Peckmann, J., Reitner, J., Heindel, K., 2018. Sponge-microbial buildups from the lowermost Triassic Chanakhchi section in southern Armenia: microfacies and stable carbon isotopes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 490, 653–672. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2017.11.056>
- Gallet, Y., Krystyn, L., Besse, J., Saidi, A., Ricou, L.E., 2000. New constraints on the Upper Permian and Lower Triassic geomagnetic polarity timescale from the Abadeh section (central Iran). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 105, 2805–2815. <https://doi.org/10.1029/1999jb900218>
- Ghaderi, A., Leda, L., Schobben, M., Korn, D., Ashouri, A.R., 2014. High-resolution stratigraphy of the Changhsingian (Late Permian) successions of NW Iran and the Transcaucasus based on lithological features, conodonts and ammonoids. *Fossil Record* 17, 41–57. <https://doi.org/10.5194/fr-17-41-2014>
- Hassanzadeh, J., Wernicke, B.P., 2016. The Neotethyan Sanandaj-Sirjan zone of Iran as an archetype for passive margin-arc transitions. *Tectonics* 35, 586–621. <https://doi.org/10.1002/2015TC003926>
- Heindel, K., Richoz, S., Birgel, D., Brandner, R., Klügel, A., Krystyn, L., Baud, A., Horacek, M., Mohtat, T., Peckmann, J., 2015. Biogeochemical formation of calyx-shaped carbonate crystal fans in the shallow subsurface of the Early Triassic seafloor. *Gondwana Research* 27, 840–861. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.11.004>
- Heindel, K., Foster, W.J., Richoz, S., Birgel, V.J., Roden, D., Baud, A., Brandner, R., Krystyn, L., Mohtat, T., Koşun, E., Twitchett, R.J., Reitner, J., Peckmann, J., 2018. The formation of microbial-metazoan bioherms and biostromes following the latest Permian mass extinction. *Gondwana Research* 61, 187–202. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2018.05.007>

- Heydari, E., Hassanzadeh, J., Wade, W.J., 2000. Geochemistry of central Tethyan upper Permian and lower Triassic strata, Abadeh region, Iran. *Sedimentary Geology* 137, 85–99. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(00\)00138-X](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(00)00138-X)
- Heydari, E., Arzani, N., Safaei, M., Hassanzadeh, J., 2013. Ocean's response to a changing climate: clues from variations in carbonate mineralogy across the Permian–Triassic boundary of the Shareza Section, Iran. *Global Planetary Change*. 105, 79–90. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.12.013>
- Horacek, M., Brandner, R., Abart, R., 2007. Carbon isotope record of the P/T boundary and the Lower Triassic in the Southern Alps: evidence for rapid changes in storage of organic carbon. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 252, 347–354. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2006.11.049>
- Insalaco, E., Virgone, A., Courme, B., Gaillot, J., Kamali, M., Moallemi, A., Lotfpour, M., Monibi, S., 2006. Upper Dalan Member and Kangan Formation between the Zagros Mountains and offshore Fars, Iran: depositional system, biostratigraphy and stratigraphic architecture. *GeoArabia* 11(2), 75–176. <https://doi.org/10.2113/geoarabia110275>
- Jiang, H., Lai, X., Sun, Y., Wignall, P.B., Liu, J., Yan, C., 2014. Permian–Triassic conodonts from Dajiang (Guizhou, South China) and their implication for the age of microbialite deposition in the aftermath of the End-Permian mass extinction. *Journal of Earth Science* 25(3), 413–430. <https://doi.org/10.1007/s12583-014-0444-4>
- Kershaw, S., Zhang, T., Lan, G., 1999. A? microbialite carbonate crust at the Permian–Triassic boundary in South China, and its palaeoenvironmental significance. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 146(1-4), 1-18. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(98\)00139-4](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(98)00139-4)
- Kershaw, S., Li, Y., Crasquin, S.S., Feng, Q., Mu, X., Collin, P.Y., Reynolds, A., Guo, L., 2007. Earliest Triassic microbialites in the South China block and other areas: controls on their growth and distribution. *Facies* 53, 409–425. <https://doi.org/10.1007/s10347-007-0105-5>
- Kershaw, S., Crasquin, S., Li, Y., Collin, P.Y., Forel, M.B., Mu, X., Baud, A., Wang, Y., Xie, S., Mauer, F., Guo, L., 2012. Microbialites and global environmental change across the Permian–Triassic boundary: a synthesis. *Geobiology* 10, 25–47. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4669.2011.00302.x>
- Korte, C., Kozur, H.W., Joachimski, M.M., Strauss, H., Veizer, J., Schwark, L., 2004. Carbon, sulfur, oxygen and strontium isotope records, organic geochemistry and biostratigraphy across the Permian/Triassic boundary in Abadeh, Iran. *International Journal of Earth Sciences* 9, 565–581. <https://doi.org/10.1007/s00531-004-0406-7>
- Kozur, H.W., 2004. Pelagic uppermost Permian and the Permian-Triassic boundary conodonts of Iran. Part I: Taxonomy. *Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften* 18, 39–68.
- Kozur, H.W., 2005. Pelagic uppermost Permian and the Permian–Triassic boundary conodonts of Iran. Part II: investigated sections and evaluation of the conodont faunas. *Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften* 19, 49–86.
- Kozur, H.W., 2007. Biostratigraphy and event stratigraphy in Iran around the Permian Triassic Boundary (PTB): implications for the causes of the PTB biotic crisis. *Global Planetary Change* 55(1–3), 155–176. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.06.011>
- Leda, L., Korn, D., Ghaderi, A., Hairapetian, V., Struck, U., Reimold, W.U., 2014. Lithostratigraphy and carbonate microfacies across the Permian–Triassic boundary near Julfa (NW Iran) and in the Baghuk Mountains (Central Iran). *Facies* 60 (1), 295–325. <https://doi.org/10.1007/s10347-013-0366-0>
- Lehrmann, D.J., 1999. Early Triassic calcimicrobial mounds and biostromes of the Nanpanjiang Basin, South China. *Geology* 27, 359–362. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1999\)027%3C0359:ETCMAB%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1999)027%3C0359:ETCMAB%3E2.3.CO;2)
- Lehrmann, D.J., Bentz, J.M., Wood, T., Goers, A., Dhillon, R., Akin, S., Li, X., Payne, J.L., Kelley, B.M., Meyer, K.M., Schaal, E.K., Suarez, M.B., Yu, M., Qin, Y., Li, R., Minzoni, M., Henderson, C.M., 2015. Environmental controls on the genesis of marine microbialites and dissolution surface associated with the end-Permian mass extinction: new sections and observations from the Nanpanjiang basin, South China. *Palaios* 30, 529–552. <https://doi.org/10.2110/palo.2014.088>
- Lehrmann, D.J., Payne, J.L., Felix, S.V., Dilleit, P.M., Wang, H., Yu, Y.Y., Wei, J.Y., 2003. Permian–Triassic boundary sections from shallow marine carbonate platforms of the Nanpanjiang Basin, South China:

- implications for oceanic conditions associated with the end-Permian extinction and its aftermath. *Palaios* 18, 138–152. [https://doi.org/10.1669/0883-1351\(2003\)18%3C138:PBSFSC%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1669/0883-1351(2003)18%3C138:PBSFSC%3E2.0.CO;2)
- Liu, X.C., Wang, W., Shen, S.Z., Gorgij, M.N., Ye, F.C., Zhang, Y.C., Furuyama, S., Kano, A. Chen, X.Z., 2013. Late Guadalupian to Lopingian (Permian) carbon and strontium isotopic chemostratigraphy in the Abadeh section, central Iran. *Gondwana Research* 24(1), 222-232. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.10.012>
- Muttoni, G., Kent, D.V., 2019. Adria as promontory of Africa and its conceptual role in the Tethys Twist and Pangea B to Pangea A Transformation in the Permian. *Rivista, Italiana di Paleontologia e Stratigrafia* 25, 249–269. <https://doi.org/10.13130/2039-4942/11437>
- Payne, J.L., Lehrmann, D.J., Follett, D., Seibel, M., Kump, L.R., Riccardi, A., Altiner, D., Sano, H., Wei, J., 2007. Erosional truncation of uppermost Permian shallow-marine carbonates and implications for Permian–Triassic boundary events. *Geological Society of America Bulletin* 119, 771–784. <https://doi.org/10.1130/B26091.1>
- Pruss, S.B., Bottjer, D.J., Corsetti, F.A., Baud, A., 2006. A global marine sedimentary response to the end-Permian mass extinction: examples from southern Turkey and the western United States. *Earth-Science Reviews* 78, 193–206. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.05.002>
- Raup, D.M., 1979. Size of the Permo-Triassic bottleneck and its evolutionary implications. *Science* 206, 217–218. <https://doi.org/10.1126/science.206.4415.217>
- Richoz, S., Krystyn, L., Baud, A., Brandner, R., Horacek, M., Mohtat-Aghai, P., 2010. Permian Triassic boundary interval in the Middle East (Iran and N. Oman): progressive environmental change from detailed carbonate carbon isotope marine curve and sedimentary evolution. *Journal of Asian Earth Sciences* 39, 236–253. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2009.12.014>
- Schubert, J.K., Bottjer, D.J., 1992. Early Triassic stromatolites as post-mass extinction disaster forms. *Geology* 20, 883–886. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1992\)020<0883:ETSAPM>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1992)020<0883:ETSAPM>2.3.CO;2)
- Sepkoski, J.J.Jr., 1984. A kinetic-model of Phanerozoic taxonomic diversity 3. Post-Paleozoic families and mass extinctions. *Paleobiology* 10, 246–267. <https://doi.org/10.1017/S0094837300008186>
- Sepkoski J.J.Jr., Bambach, R.K., Droser, M.L., 1991. Secular changes in Phanerozoic event bedding and the biological overprint. In: Einsele, G., Ricken, W., Seilacher, A. (Eds.), *Cycles and Events in Stratigraphy*. Springer, Berlin, 298–312.
- Shapiro, R.S., 2000. A comment on the systematic confusion of thrombolites. *Palaios* 15, 166–169. <https://doi.org/10.2307/3515503>
- Shen, S.Z., Gorgij, M.N., Wang, W., Zhang, Y.C., Khamar, H.R., Tanatabaei, S.H., 2009. Report of field trip of the Permian stratigraphy in Central and Eastern Iran. *Permophiles* 53, 2–5.
- Shen, S.Z., Cao, C.Q., Zhang, H., Bowring, S.A., Henderson, C.M., Payne, J.L., Davydov, V.I., Chen, B., Yuan, D.X., Zhang, Y.C. Wang, W., 2013. High-resolution $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ chemostratigraphy from latest Guadalupian through earliest Triassic in South China and Iran. *Earth and Planetary Science Letters* 375, 156-165. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.05.020>
- Song, H.J., Tong, J.N., Chen, Z.Q., Yang, H., Wang, Y.B., 2009. End-Permian mass extinction of foraminifers in the Nanpanjiang Basin, South China. *Journal of Paleontology* 83, 718–738. <https://doi.org/10.1666/08-175.1>
- Stampfli, G.M., Borel, G.D., 2002. A Plate Tectonic Model for the Paleozoic and Mesozoic Constrained by Dynamic Plate Boundaries and Restored Synthetic Oceanic Isochrons. *Earth and Planetary Science Letters*, 196, 17-33. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(01\)00588-X](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00588-X)
- Taraz, H., Golshani, F., Nakazawa, K., Shimizu, D., Bando, Y., Ishii, K.I., Murata, M., Okimura, Y., Sakagami, S., Nakamura, K., Tokuoka, T., 1981. The Permian and the Lower Triassic systems in Abadeh region, central Iran. *Memoir of the Faculty of Education, Kyoto University, Series of Geology and Mineralogy* 47, 62–133. <https://doi.org/hdl.handle.net/2433/186643>
- Wang, W., Kano, A., Okumura, T., Ma, Y., Matsumoto, R., Matsuda, N., Ueno, K., Chen, X., Kakuwa, Y., Gharaie, M.H.M. Ilkhchi, M.R., 2007. Isotopic chemostratigraphy of the microbialite-bearing Permian–Triassic boundary section in the Zagros Mountains, Iran. *Chemical Geology* 244(3-4), 708-714. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.07.018>

- Wang, W.Q., Garbelli, C., Zhang, F.F., Zheng, Q.F., Zhang, Y.C., Yuan, D.X., Shi, Y.K., Chen, B. Shen, S.Z., 2020. A high-resolution Middle to Late Permian paleotemperature curve reconstructed using oxygen isotopes of well-preserved brachiopod shells. *Earth and Planetary Science Letters* 540, 116245. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116245>
- Wei, W., Matsumoto, R., Kakuwa, Y., Mahmudy Gharai, M.H., Yue, L. Kano, A., 2005. Isotopic chemostratigraphy of the Permian-Triassic boundary in Zagros Mountains, Aligoudarz, Iran. *Permophiles* 45, 31-36.
- Wignall, P.B., Kershaw, S., Collin, P.Y., Crasquin, S.S., 2009. Erosional truncation of uppermost Permian shallow-marine carbonates and implications for Permian-Triassic boundary events: comment. *Geological Society of America Bulletin* 121(5-6), 954-956. <https://doi.org/10.1130/B26424.1>
- Yang, H., Chen, Z.Q., Wang, Y., Tong, J., Song, H., Chen, J., 2011. Composition and structure of microbialite ecosystems following the end-Permian mass extinction in South China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 308, 111-128. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2010.05.029>
- Yang, H., Chen, Z. Q., Kershaw, S., Liao, W., Lü, E., Huang, Y., 2019. Small microbialites from the basal Triassic mudstone (Tieshikou, Jiangxi, South China): geobiologic features, biogenicity, and paleoenvironmental implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 519, 221-235. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2018.06.030>
- Yin, H.F., Jiang, H.S., Xia, W.C., Feng, Q.L., Zhang, N., Shen, J., 2014. The end-Permian regression in South China and its implication on mass extinction. *Earth-Science Reviews* 173, 19-33. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.06.003>