علوم الأرض
نُشر على الإنترنت بتاريخ: 31 ديسمبر 2025
doi: 10.3389/frym.2023.1114471-ar

ارتفاع القارات وهبوطها

Donna L. Whitney[1*], *Jonas Vanardois*[1,2], *Jennifer M. Taylor*[1,3] و *Christian Teyssier*[1]

[1]قسم علوم الأرض والبيئة، جامعة مينيسوتا، مينيابوليس، مينيسوتا، الولايات المتحدة
[2]معهد ستراسبورغ للأرض والبيئة، جامعة ستراسبورغ، ستراسبورغ، فرنسا
[3]قسم الأحياء والجيولوجيا والعلوم البيئية، جامعة تينيسي، تشاتانوغا، تينيسي، الولايات المتحدة

تتحرّك القارات باستمرار، بل وتتصادم في بعض الأحيان. وعندما يحدث ذلك، تتجعد ويزداد سُمكها. وتتشكّل سلاسل جبلية في "منطقة التصادم" هذه. تكون الصخور العميقة في أسفل منطقة التصادم ساخنة لأنها عميقة جدًا. والمواد الساخنة، بما فيها الصخور، تصبح ضعيفة. ويمكن أن تتحرك الصخور الساخنة الموجودة في أعماق الأرض عن طريق التدفق، ولكنها تكون في حالة صلبة في الغالب. في البداية، تتدفق الصخور بشكل جانبي ثم للأعلى في شكل كتل كبيرة. وعندما تكون الكتل المتحركة للأعلى على بُعد بضعة كيلومترات فقط من سطح الأرض، تبرد وتتصلّب أكثر وتأخذ شكلاً جرسيًّا (قباب). تتسبب الصخور المتدفقة في انهيار منطقة التصادم وانتشارها. تستعيد القارات سُمكها قبل التصادم، ولكنها لا تعود إلى حالتها الأولية تمامًا، فبعض الصخور التي كانت أصلاً في أسفل القارات تصبح

المراجعون الصغار

CELINE
العمر: 13

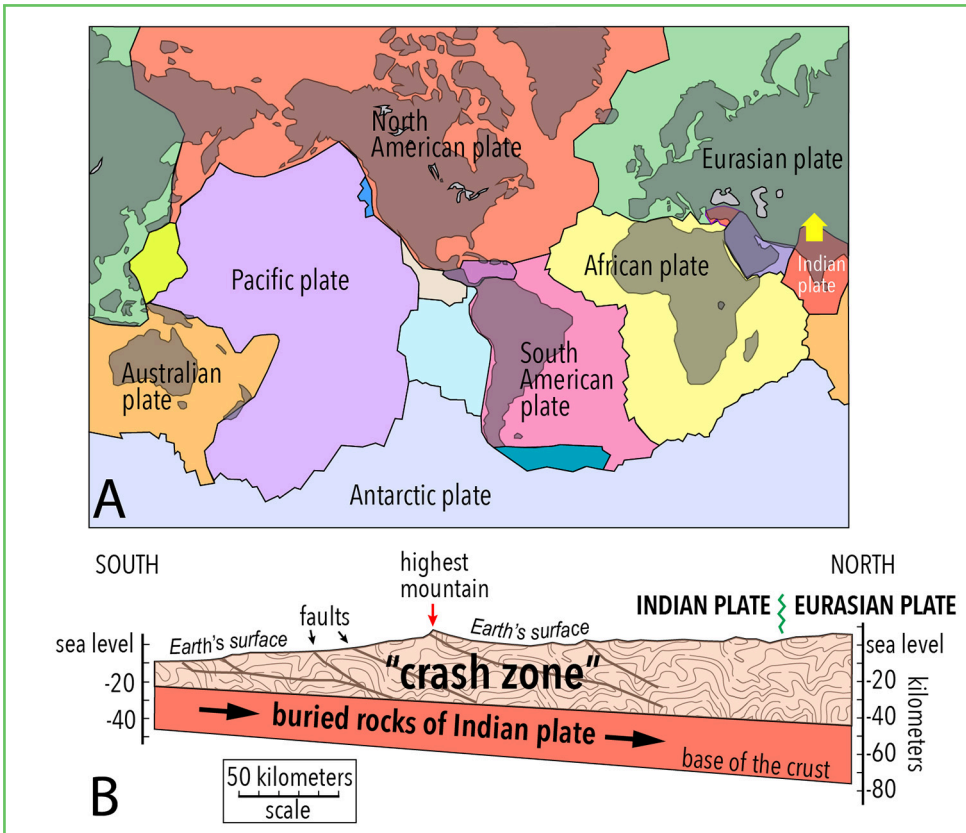
LEAF
العمر: 9

في الأعلى الآن. ويمكننا رؤية هذه الأجزاء العميقة سابقًا من القارات في القباب الصخرية في العالم كله.

التصادم القاري

افترضت الأبحاث الأخيرة أن العديد من الصخور التي نراها في السطح الخارجي للقارات كانت في الأصل في أعماق الأرض [1]. فكيف وصلت إلى السطح، أي هذا الجزء من الأرض الذي نعيش عليه؟ وما المعلومات التي يمكننا استمدادها من هذه الصخور حول تشكّل القارات والسلاسل الجبلية؟

للإجابة على هذه الأسئلة، يجب أن نفهم أولاً ما الذي يحدث عند تصادم القارات مع بعضها. تتحرك القارات ببطء حول الكوكب كجزء من الصفائح التكتونية (الشكل 1A). وفي بعض الأحيان، تصطدم القارات ببعضها. يشكّل التصادم القاري سلاسل جبلية كبيرة في "مناطق التصادم" التي تصطدم فيها القارتان ببعضهما (الشكل 1B). وبعيدًا عن مناطق التصادم، يبلغ سُمك القارات حوالي 30 كم. أما في مناطق التصادم مثل الهيمالايا، فيزيد سُمك القشرة الأرضية عن 70 كم. يكون سُمك القارات أكبر *مرتين* في مناطق التصادم. لنفكر الآن فيما يحدث في الأجزاء العميقة من مناطق التصادم القاري.



شكل 1

القارة (CONTINENT)

منطقة كبيرة من الأرض فوق مستوى سطح البحر، وهناك ست قارات اليوم ولكن كان هناك العديد من القارات المختلفة في الماضي.

الصفيحة التكتونية (TECTONIC PLATE)

لوح صخري صلب كبير يشكّل آخر طبقة خارجية صلبة من الأرض. وتحتوي الكثير من الصفائح على قارات بالإضافة إلى الصخور تحت المحيطات.

التصادم القاري (CONTINENT COLLISION)

عندما تتحرك قارتان باتجاه بعضهما وتصطدمان ببعضهما، وتتشكّل سلسلة جبلية.

شكل 1

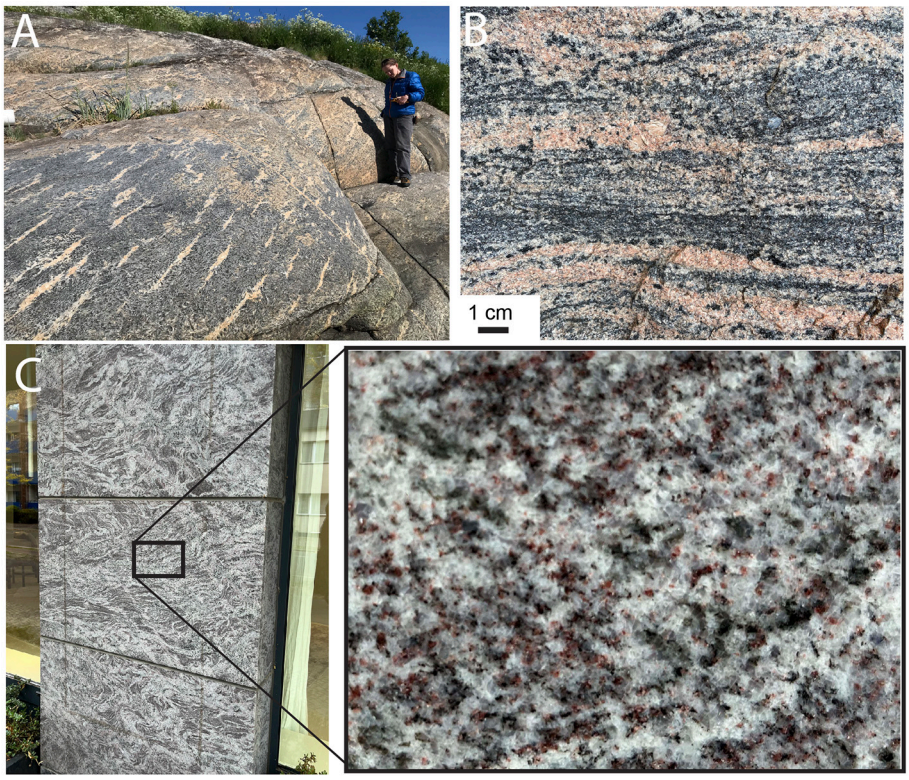
(A) خريطة للصفائح التكتونية الأرضية: يشير السهم الأصفر عند حدود الصفيحتين الهندية والأوراسية إلى تصادمهما، وتشكلت هناك جبال الهيمالايا التي ما زالت ترتفع حتى اليوم. **(B)** مشهد جانبي لمنطقة تصادم يبيّن ما الذي يحدث تحت الأرض. في هذا المثال، تتزحزح الصفيحة الهندية (باللون البرتقالي الداكن) تحت الصفيحة الأوراسية (باللون البرتقالي الفاتح). في منطقة التصادم، تنهار الصخور وتُدفن وترتفع درجة حرارتها (أي أنها تخضع لعملية التحوّل).

صخور تحت الضغط

ترتفع درجة الحرارة مع زيادة عمق الأرض. فما السبب؟ لأن مركز الأرض فائق الحرارة، وسطحها أكثر برودة. وبين السطح والمركز، تكون درجات الحرارة أكثر برودة بالقرب من السطح وأكثر سخونة في الأجزاء العميقة. ولذلك فإن الصخور في أعماق الأرض حيث مناطق التصادم تكون أكثر سخونة من الأجزاء الخارجية من الأرض التي نمشي عليها. والصخور في أعماق مناطق التصادم تتعرّض أيضًا للكثير من الضغط بسبب وزن كل الصخور فوقها. وهذا النوع من الصخور العميقة الساخنة اسمه الصخور المتحوّلة (الشكلان 2A ,C).

الصخور المتحوّلة (METAMORPHIC ROCK)

نوع من الصخور يتشكل عند درجات حرارة وضغوط أعلى من تلك الموجودة على سطح الأرض، ويحدث التحوّل في الصخور الصلبة ولكنها لا تذوب.



شكل 2

(A) صخور متحوّلة تظهر على سطح الأرض وتحتوي على كمية صغيرة من الصخور المذابة سابقًا (خطوط فاتحة اللون). وتوجد هذه الصخور في النرويج. **(B)** صخور متحوّلة في مينيسوتا في الولايات المتحدة الأمريكية. **(C)** صخور متحوّلة (نايس) على الجدار الخارجي لمبنى في برلين في ألمانيا. البقع الحمراء الصغيرة هي أحجار عقيق أحمر، وهي معروفة كأحجار كريمة حمراء.

يعني التحوّل التغيّر، والصخور المتحوّلة هي صخور تغيّرت بسبب التسخين والضغط. وهذا ما يحدث بالضبط في مناطق التصادم، فالصخور تندفن (تنضغط) وترتفع درجة حرارتها. تحتوي العديد من المباني على صخور متحوّلة على جدرانها، وأرضياتها، وأسطحها، وأعمدتها (الشكل 2C). ولذلك لست مضطرًا للسفر بعيدًا جدًّا لرؤية بعض الصخور المتحوّلة الرائعة. وفيما يلي بعض أمثلة الصخور المتحوّلة وموادها الأوّلية:

- الأردواز: صخر زيتي أو طيني متحوّل،
- والرخام: حجر جيري متحوّل،

- والكوارتزيت: حجر رملي متحوّل.

لماذا من المهم دراسة الصخور المتحوّلة؟

هناك أسباب عملية لأهمية دراسة تركيب الصخور المتحوّلة وظروفها. ويعتمد نوع المعادن التي تتكوّن على مدى سخونة وعمق الصخور. تُستخدم المعادن الموجودة في الصخور المتحوّلة لبناء المواد والتكنولوجيات (للكمبيوتر والهاتف) والعديد من الأشياء الأخرى. وفهم كيفية ومكان تشكّل الصخور المتحوّلة يساعدنا أيضًا في معرفة آلية عمل الكوكب. سنستكشف هذا الجانب في باقي المقالة.

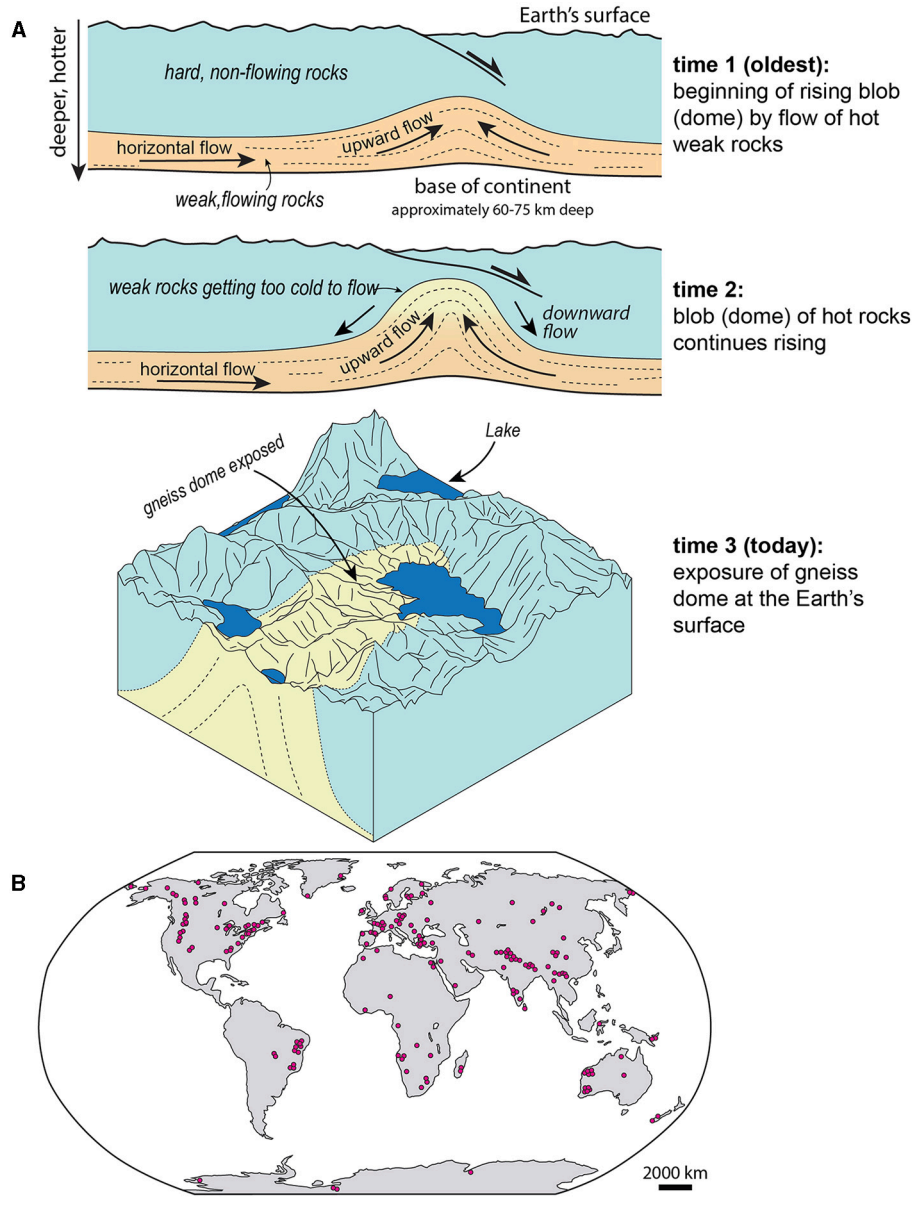
يحدث التحوّل عند درجات حرارة أعلى من أكثر يوم حارٍّ على سطح الأرض. ومكان حدوثه هو تحت الأرض كما عرفت. لذا، عندما نرى صخورًا متحوّلة على سطح الأرض، نعلم أنها تحركت للأعلى وبردت. وهذا يثير الكثير من الأسئلة حول ما يحدث للصخور قبل أن تصعد إلى سطح الأرض. يدرس علماء الجيولوجيا الصخور المتحوّلة للإجابة عن أسئلة كالتالي: *ما أكبر عمق* تواجدت عنده الصخور *وما مدى السخونة* التي تعرضت لها؟ *متى* كانت الصخور تحت أعماق الأرض *ومتى* صعدت إلى السطح؟ *ما مقدار السرعة* التي تحركت بها (تدفقت) من تحت أعماق الأرض إلى سطحها؟ *ما المسافة* التي يمكن أن تقطعها الصخور تحت الأرض؟ *لماذا* تتدفق الصخور المتحوّلة؟ *وما مساحة أجزاء* القارة التي كانت أصلاً تحت أعماق الأرض ولكنها الآن على سطحها؟

يمكن الإجابة عن هذه الأسئلة بتحديد المعادن التي تشكّل الصخور وتحليل كميات العناصر المختلفة التي تحتويها. على سبيل المثال، في بعض المعادن، تدلّ نسبة الحديد والمغنيسيوم على مدى سخونة الصخور أثناء حدوث التحوّل. ويمكن الاستدلال على العمر من خلال نسبة اليورانيوم والرصاص في بعض المعادن. ومن هذه الطرق، ندرك أن العديد من الصخور المتحوّلة الموجودة على سطح الأرض اليوم أتت من أبعد وأعمق وأسخن أجزاء القارات. وبالتالي، لدينا إجابة على سؤال "العمق": أتت بعض الصخور الموجودة حاليًا على سطح الأرض من قرب قاعدة الأجزاء الأكثر سُمكًا في مناطق التصادم القاري: تحت الأرض بمسافة 70 كم تقريبًا. ولدينا أيضًا إجابة على سؤال "مدى السخونة". فمعرفة درجة الحرارة مهمة لأنها تساعدنا في فهم المكان الذي كانت فيه الصخور ومدى ضعفها. وهذا يحدد المسافة التي يمكن أن تقطعها الصخور. تصل درجة حرارة بعض الصخور المتحوّلة إلى 800 درجة مئوية. وهذه حرارة كافية لبدء ذوبان أغلب أنواع الصخور.

الصخور المتحرّكة

الصخور الساخنة ضعيفة ويمكن أن تتحرك بالتدفق. وهذه الصخور الساخنة ليست حممًا بركانية، بل تتحرك في الغالب في حالة صلبة. وقد تحتوي بداخلها على بعض الأجزاء الصخرية الذائبة (الشكلان 2A, B)، ما يجعلها أضعف ويساعدها على التدفق. ولكن لماذا تتحرك؟ تخيّل لو جمعت كومة كبيرة من شيء ضعيف مثل المربى أو العصيدة.

ستجدها تتدفق بعيدًا عن الكومة. يحدث شيء مشابه في مناطق التصادم الكثيفة التي تحتوي على صخور ضعيفة وساخنة تحتها (الشكل 3A). تتدفق الصخور الساخنة جزئيًا بشكل جانبي، أي أنها تبقى عند نفس العمق تقريبًا. ويحدث بعض التدفق للأعلى إذا كانت الصخور أقل كثافة مما يحيط بها. يمكن أن تتدفق الصخور الساخنة بسرعة كبيرة جدًّا بالنسبة للصخور العادية [2]. و"السرعة" في حالة الصخور المتحوّلة تكون بطيئة جدًا بالنسبة للبشر. فالصخور المتحوّلة التي تتحرك مسافة سنتيمتر واحد أو اثنين في العام هي الأسرع بين أقرانها.



شكل 3

شكل 3

(A) مشهد جانبي للصخور المتحوّلة المتدفقة التي ترتفع لتشكّل قباب النايس، مع توضيح لرحلة تطوّر القبة بمرور الوقت. تعرض اللوحة العلوية مرحلة أولية، وهي بدء الصخور الساخنة في الارتفاع. تبيّن اللوحة الوسطى مرحلة لاحقة، حيث تقترب القبة من سطح الأرض. في اللوحة الأخيرة، نرى كيف تبدو قبة النايس حاليًا. يمكننا فقط رؤية الجزء العلوي الذي ظهر من القبة. يخمّن الجيولوجيون الشكل المحتمل لباقي القبة بدراسة الصخور المتحوّلة التي تظهر على السطح. **(B)** بعض مواقع التي توجد فيها قباب صخور النايس اليوم.

أدلة تدفق الصخور: القباب

تتدفق الصخور الساخنة للأعلى في شكل كتل كبيرة باتجاه السطح الخارجي لكوكب الأرض. لتصوّر الكتل الصخرية هذه، تخيّل الفقاقيع الصاعدة في مصباح على شكل بركان أو البالونات الضخمة التي تطير للأعلى.

عندما تتدفق الصخور الساخنة للأعلى في شكل كتل، لا تصل إلى سطح الأرض. فهي تزداد برودة عندما تبدأ في الاقتراب من سطح الأرض. وعندما تنخفض درجة حرارتها كثيرًا، تتوقف عن التدفق. ولكن الكتل الصاعدة يمكنها الاقتراب بضعة كيلومترات من سطح الأرض. ومع مرور الوقت، تتآكل التربة وتظهر الصخور أعلى تلك الكتل (الشكل 3A). ويمكننا حينها رؤيتها.

قبة النايس (GNEISS DOME)

تضاريس على شكل قبة مكوّنة من صخرة متحوّلة اسمها "نايس"، ويتراوح عرض القباب بين بضعة كيلومترات وأكثر من مئة كيلومتر.

تُسمّى القباب الصخرية التي نراها على سطح الأرض قباب النايس. وصخرة النايس هي نوع شائع جدًّا من الصخور المتحوّلة التي تتعرض للكثير من الحرارة والضغط. وتعني "القبة" الكتلة الجرسية التي تتكوّن مع تدفّق صخرة النايس للأعلى. وتوجد قباب النايس في قارات العالم كله (الشكل 3B) [1, 3]. وهي تحتوي على أدلة حول ما يحدث في أعماق الأرض عندما تتصادم القارات وتتشكّل سلاسل جبلية.

من الطرق المُستخدَمة لدراسة هذه الأجزاء العميقة من القارات العثور على أماكن تدفقت فيها هذه الكتل الصخرية للأعلى وظهرت على السطح. فهذا يتيح لنا رؤية الصخور التي تشكلت في أعماق الأرض في الأماكن التي تصادمت فيها القارات وتشكّلت السلاسل الجبلية. وقد تعلمنا الكثير من الأشياء من قباب النايس، وإليك بعضها. أولاً، إن الكثير من الصخور على سطح القارات اليوم كانت في الأصل تحت أعماق الأرض [1]. ثانيًا، قد لا تبدو قباب النايس على شكل قبة إذا أدى التآكل إلى نحت سطح الأرض وتكوين القمم والوديان (الشكل 3A). ومع ذلك، ما زال الجيولوجيون يكتشفون قباب النايس من خلال النظر إلى مدى ميل طبقات الصخور عن بعضها لتكوين قبة. ثالثًا، تعلمنا أن الصخور في بعض قباب النايس تتدفق للأعلى من قرب قاعدة القارة إلى قرب السطح. وتتحرك للأعلى بطول سُمك القارة بأكملها تقريبًا، من حوالي 70 كم إلى بضعة كيلومترات من سطح الأرض. وفي النهاية، قبل أن تتدفق الصخور في قباب النايس للأعلى، فإنها قد تتدفق بشكل أفقي في شكل صفائح كبيرة لمسافة تتراوح بين عشرات ومئات الكيلومترات [4]. تخيّل نهرًا واسعًا وعميقًا من الصخور المتدفقة تحت الأرض.

الملخص

الصخور المتحوّلة هي السبيل لمعرفة ما يحدث في أعماق مناطق التصادم القاري. توضح الدراسات الأخيرة أن الصخور التي كانت في الأصل تحت أعماق الأرض وكانت ساخنة جدًّا تحركت بسرعة في شكل كتل باتجاه السطح. وقد تدفقت تلك الكتل في الغالب في

حالة صلبة. في العديد من الأماكن حول العالم اليوم، يمكننا رؤية هذه الكتل في شكل قباب مكوّنة من صخور متحوّلة. تحركت هذه الصخور بعيدًا جدًّا عن أعماق الأرض. تساعدنا القباب الصخرية (النايس) في فهم المسافة التي تقطعها الصخور إلى سطح الأرض. وبدراسة هذه القباب، يمكننا فهم كيفية تشكّل القارات وتغيّرها بمرور الوقت.

شُكر وتقدير

تم إجراء هذا البحث بتمويل من مؤسسة العلوم الوطنية في الولايات المتحدة الأمريكية، من خلال المنحة رقم NSF-EAR-1946911 المُقدّمة إلى DW وCT.

إفصاح أدوات الذكاء الاصطناعي

تم إنشاء النص البديل (alt text) المرفق بالأشكال في هذه المقالة بواسطة "فرونتيرز" (Frontiers) وبدعم من الذكاء الاصطناعي، مع بذل جهود معقولة لضمان دقته، بما يشمل مراجعته من قبل المؤلفين حيثما كان ذلك ممكناً. في حال تحديدكم لأي خطأ، نرجو منكم التواصل معنا.

مقال المصدر الأصلي

Whitney, D. L., Hamelin, C., Teyssier, C., Raia, N. H., Korchinski, M. S., Seaton, N. C. A., et al. 2020. Deep crustal source of gneiss dome rocks revealed by coeval eclogite and migmatite in the Montagne Noire dome, French Massif Central. *J. Metamor. Geol.* 38:297–327. doi: 10.1111/jmg.12523

المراجع

1. Whitney, D. L., Hamelin, C., Teyssier, C., Raia, N. H., Korchinski, M. S., Seaton, N. C. A., et al. 2020. Deep crustal source of gneiss dome rocks revealed by coeval eclogite and migmatite in the Montagne Noire dome, French Massif Central. *J. Metamor. Geol.* 38, 297–327. doi: 10.1111/jmg.12523
2. Guevara, V. E., Smye, A. J., Caddick, M. J., Searle, M. P., Olsen, T., Whalen, L., et al. 2022. A modern pulse of ultrafast exhumation and diachronous crustal melting in the Nanga Parbat Massif. *Sci. Adv.* 8:2689. doi: 10.1126/sciadv.abm2689
3. Teyssier, C., and Whitney, D. L. 2002. Gneiss domes and orogeny. *Geology* 30:1139–1142. doi: 10.1130/0091-7613(2002)030%3C1139:GDAO%3E2.0.CO;2
4. Clark, M. K., and Royden, L. H. 2000. Topographic ooze; building the eastern margin of Tibet by lower crustal flow. *Geology* 28:703–706. doi: 10.1130/0091-7613(2000)28%3C703:TOBTEM%3E2.0.CO;2

نُشر على الإنترنت بتاريخ: 31 ديسمبر 2025

المحرر: Antonio Olita

مرشدو العلوم: Xiaoming Wan و Jacqueline C. Y. Lai

الاقتباس: Whitney DL, Vanardois J, Taylor JM و Teyssier C (2025) ارتفاع القارات وهبوطها. Front. Young Minds.
doi: 10.3389/frym.2023.1114471-ar

مُترجَم ومقتبس من: Whitney DL, Vanardois J, Taylor JM and Teyssier C (2023) The Rise and Fall of Continents. Front. Young Minds 11:1114471.
doi: 10.3389/frym.2023.1114471

إقرار تضارب المصالح: يعلن المؤلفون أن البحث قد أُجري في غياب أي علاقات تجارية أو مالية يمكن تفسيرها على أنها تضارب محتمل في المصالح.

حقوق الطبع والنشر © 2023 2025 Teyssier و Whitney, Vanardois, Taylor.
هذا مقال مفتوح الوصول يتم توزيعه بموجب شروط ترخيص المشاركة الإبداعية Creative Commons Attribution License (CC BY). يُسمح بالاستخدام أو التوزيع أو الاستنساخ في منتديات أخرى، شريطة أن يكون المؤلف (المؤلفون) الأصلي أو مالك (مالكو) حقوق النشر مقيدًا وأن يتم الرجوع إلى المنشور الأصلي في هذه المجلة وفقًا للممارسات الأكاديمية المقبولة. لا يُسمح بأي استخدام أو توزيع أو إعادة إنتاج لا يتوافق مع هذه الشروط.

المراجعون الصغار

CELINE، العمر: 13
مرحبًا، اسمي Celine من فانكوفر في كولومبيا البريطانية وأنا في مرحلة الثانوية. أستمتع حقًا بدراسة الكيمياء والأحياء في وقت فراغي. أحب أيضًا ممارسة الأنشطة الرياضية في الخارج مع أصدقائي للترفيه عن أنفسنا. تشمل هواياتي الأخرى القراءة والرسم وتصفّح الإنترنت.

LEAF، العمر: 9
أنا في الصف الثالث والمادتان المفضلتان لي هما التربية الفنية والعلوم. أحب ملاحظة التغيرات في العالم. يعجبني العمل في فريق المراجعين الصغار لأنه يتيح لي ملاحظة الكثير من التغيرات باستخدام معدات العلماء. في وقت فراغي، أحب المشي لمسافات طويلة والسباحة وركوب الدراجة مع أصدقائي.

المؤلفون

DONNA L. WHITNEY
أستاذة جامعية في قسم علوم الأرض والبيئة في جامعة مينيسوتا حيث تقوم بالتدريس وإجراء الأبحاث حول كيفية تحويل التكتونيات للكوكب على امتداد الزمن الجيولوجي. وهي مهتمة على وجه الخصوص بتحليل الصخور المتحوّلة لفهم العمليات الكيميائية والفيزيائية

التي تحدث في أعماق القشرة الأرضية أثناء العمليات التكتونية، على سبيل المثال عند تكوّن الجبال وانهيارها. وتحب القيام برحلات ميدانية لدراسة الصخور وجمعها ثم إحضارها إلى المختبر لتحليل المعادن فيها. dwhitney@umn.edu*

JONAS VANARDOIS

باحث في مرحلة ما بعد الدكتوراة في قسم علوم الأرض والبيئة بجامعة مينيسوتا، ومُدرّس في جامعة ستراسبورغ. يركز في أبحاثه على كيفية تشكّل الجبال ونموّها وانهيارها. ويعمل في الغالب على الصخور العميقة التي تظهر الآن على سطح الأرض، حيث يريد فهم آثارها على تطوّر الجبال. ولذلك يدرس بنيتها وعمرها وتركيبها من المعادن من خلال القيام برحلات ميدانية وتحاليل في المختبر.

JENNIFER M. TAYLOR

أستاذة مساعدة في جامعة تينيسي في تشاتانوغا. تركّز أبحاثها على كيفية صعود الصخور العميقة إلى سطح الأرض والحالات التي يحدث فيها ذلك. وتدرس كيفية تغيّر المشاهد الطبيعية عبر العمليات التكتونية والتآكل من خلال القيام برحلات ميدانية واستخدام أدوات تحديد العمر والنماذج الحاسوبية. وتجري أبحاثًا أيضًا حول مناطق الصدوع العميقة التي تكون فيها الصخور مشوّهة جدًّا. ومن المجالات الأخرى التي تهتم بها استخدام الفن لتدريس عمليات العلوم الأرضية.

CHRISTIAN TEYSSIER

أستاذ جامعي في قسم علوم الأرض والبيئة بجامعة مينيسوتا. يدرّس دورات ويجري أبحاثًا حول كيفية تشوّه أجزاء الأرض الصلبة. من المجالات الرئيسية التي يهتم بها دراسة الصخور المشوّهة والمعادن التي تتكوّن منها. فباستخدام طرق مختلفة، يمكن تحديد العديد من الأشياء حول التشوّه: كيفية ووقت حدوثه والعمق ودرجة الحرارة في موقع حدوثه.

النسخة العربية مقدمة من
Arabic version provided by

جامعة الملك عبدالله للعلوم والتقنية
King Abdullah University of Science and Technology