التنوع البيولوجي
نُشر على الإنترنت بتاريخ: 31 يوليو 2025
doi: 10.3389/frym.2023.1052361-ar

جينوم المحيطات العالمي: «فهرس» الحياة في المحيطات

Elisa Laiolo[1,2,3*†], Intikhab Alam[3], Mahmut Uludag[3], Tahira Jamil[1,2,3], Susana Agusti[1,2], Takashi Gojobori[3], Silvia G. Acinas[4], Josep M. Gasol[4] و Carlos M. Duarte[1,2,3]

[1]برنامج علوم البحار، قسم العلوم والهندسة البيولوجية والبيئية بجامعة الملك عبد الله للعلوم والتقنية (كاوست)، ثول، المملكة العربية السعودية

[2]مركز أبحاث البحر الأحمر، جامعة الملك عبد الله للعلوم والتقنية(كاوست)، ثول، السعودية

[3]مركز أبحاث العلوم البيولوجية الحاسوبية بجامعة الملك عبد الله للعلوم والتقنية (كاوست)، ثول، المملكة العربية السعودية

[4]قسم البيولوجيا البحرية وعلوم المحيطات بمعهد العلوم البحرية التابع للمجلس الوطني الإسباني للبحوث (CSIC)، برشلونة، إسبانيا

[†]شارك المؤلفون بالتساوي في هذا العمل، ومن ثم يتقاسمون حقوق التأليف الأصلية

لقد تطورت الحياة في المحيطات لفترة أطول بكثير مما كانت عليه على اليابسة، ما أدى إلى وجود كائنات حية شديدة التنوع في المحيطات، لا سيما الميكروبات مثل البكتيريا والعتائق. وتؤدي ميكروبات المحيطات وظائف مهمة تؤثر على صحة المحيط وتؤثر في نهاية المطاف على مناخ الأرض. ولاستيعاب تنوع الكائنات البحرية ووظائفها، استخدم العلماء تقنية قوية تُسمى الميتاجينوميات لدراسة الحمض النووي *لجميع* الكائنات الحية الموجودة في عينة من مياه المحيط في آنٍ واحد. وقد دمجنا -في بحثنا- نتائج دراسات ميتاجينومية محيطية متعددة، مستمدة من مواقع ومناطق أعماق مختلفة في محيطات العالم، لإنتاج جينوم محيطات عالمي يتألف من 317.5 مليون مجموعة من الجينات المتشابهة - يمكن تصنيف نصفها تقريبًا حسب نوع الكائن الحي ووظيفته. توفر لنا هذه الكمية غير المسبوقة من

المراجعون الصغار

IGOR
العمر: 12

SEBASTIAN
العمر: 13

البيانات الكثير من المعلومات عن موائل المحيطات المتنوعة ويمكن أن تساعد العلماء في الإجابة عن العديد من الأسئلة حول الكائنات الحية في المحيطات ووظائفها.

المحيط: مهد الحياة

المحيط هو أكبر موئل في العالم؛ إذ تغطي المحيطات 71% من سطح كوكبنا وتحتوي على كمية هائلة للغاية من المياه تبلغ 1.335 مليار كيلومتر مكعب، أي حوالي 97% من إجمالي المياه على الأرض! والمحيط هو أيضًا مهد الحياة؛ فقد ظهرت أشكال الحياة الأولى على الأرض في هذا العالم المائي منذ قرابة 3.9 مليار سنة.

تعيش أنواع كثيرة من الكائنات الحية في المحيط، بدءًا من النباتات والحيوانات وصولًا إلى البكتيريا والفيروسات. ربما تعرف الحيوانات البحرية الكبيرة مثل الحيتان والدلافين والأخطبوط، إلا أن المحيط يحتوي في الواقع على مجموعة كبيرة من الحياة الحيوانية. نشأت أشكال الحياة الأولى على الأرض في المحيط، ثم تطورت لاحقًا لتغزو اليابسة. وتشير حقيقة أن من بين 34 شُعبة حيوانية رئيسية معروفة ثمة شُعبة واحدة فقط موجودة حصريًا على اليابسة (وهي شعبة الأونيكوفورا، التي تضم نوعًا من الديدان له أرجل وملمس مثل المخمل) إلى التاريخ التطوري الطويل للحياة في المحيطات [1]. وليس من المستغرب -بالنظر إلى طول فترة تطور الحياة في المحيط- أن يزخر بتنوع بيولوجي هائل - لا يزال جزء كبير منه غير مستكشف.

تُصنف جميع الحيوانات - سواء التي تعيش في المحيط أو التي تعيش على اليابسة على أنها حقيقي النواة مما يعني أن كل خلية من خلاياها تحتوي على نواة متميزة ووحدات وظيفية أخرى مُحاطة بالأغشية تسمى العضيات. ومع ذلك، فإن الكائنات الحية الأكثر وفرة في المحيط هي بدائي النواة، وهي ميكروبات المحيط التي لا تُرى بالعين المجردة. تشمل بدائيات النوى -وهي كائنات وحيدة الخلية بدون نوى أو عضيات متخصصة- نوعين من الكائنات الحية: البكتيريا، التي ربما تكون قد سمعت عنها، والعتائق، التي قد تكون أقل دراية بها. تشترك البكتيريا والعتائق في العديد من الأشياء، بيد أن إحدى السمات المهمة التي تميز هاتين المجموعتين عن بعضهما البعض هي أن الجدران الخلوية للعديد من البكتيريا تحتوي على مادة تسمى ببتيدوغليكان في حين تفتقر الجدران الخلوية للعتائق إلى هذه المادة تمامًا.

ونحن نعلم أن ثمة أكثر من مليوني نوع من البكتيريا في المحيطات العالمية، إلا أننا ما زلنا لا نعرف الكثير عنها وعن الأنواع الأخرى من ميكروبات المحيطات. ومن الصعب للغاية دراسة هذه الكائنات الحية لأن أكثر من 99% منها لم يُزرع في المختبر!

حقيقي النواة (Eukaryote)

هو كائن حيّ تحتوي خلاياه على نواة ووحدات وظيفية أخرى مُحاطة بغشاء تُسمَّى العُضَيَّات. وتُعد الحيوانات والنباتات والفطريات أمثلة على حقيقيات النوى.

بدائي النواة (Prokaryote)

هو كائن حي وحيد الخلية لا يحتوي على نواة أو عضيات مميزة، والبكتيريا والعتائق من بدائيات النوى.

ببتيدوغليكان (Peptidoglycan)

هي مادة تُشكّل جدران خلايا العديد من البكتيريا.ولا توجد الببتيدوغليكانات في الجدران الخلوية للعتائق.

ما أهمية ميكروبات المحيطات؟

تتنوع الأنواع الفردية من البكتيريا والعتائق تنوعًا مذهلًا، والأهم من ذلك أن لديها العديد من الطرق الفريدة للحصول على الطاقة.

عملية الأيضهي مصطلح يُطلق على التفاعلات الكيميائية المُنتِجة للطاقة داخل معظم الخلايا. تستخدم هذه التفاعلات مصادر «الغذاء» لإنتاج الطاقة التي تحتاجها الخلايا للنمو والتكاثر والبقاء على قيد الحياة عمومًا. وتستفيد بعض البكتيريا والعتائق من أشعة الشمس في إنتاج الطاقة، بينما تحلِّل أو تحوِّل بعض البكتيريا والعتائق الأخرى المركَّبات التي تحتوي على الكربون أو النيتروجين أو الكبريت، وهي عناصر يمكن أن تؤثر على كيمياء المحيطات وتؤدي أيضًا أدوارًا حيوية في مناخ الأرض المتغير [2, 3].

عملية الأيض (Metabolism)

هي التفاعلات الكيميائية داخل الخلايا التي تحول «الغذاء» إلى طاقة.

وعلاوةً على ذلك، يمكن أن تكون ميكروبات المحيطات مصادر للجزيئات التي تضطلع بأدوار رئيسية في التكنولوجيا الحيوية. فقد عُزل -مثلًا- بروتين يُسمى تاك بوليميراز من بكتيريا تنمو في مياه المحيط فائقة الحرارة بالقرب من الفتحات الحرارية المائية، التي تشبه الينابيع الحارة في أعماق البحار. ويُعد هذا البروتين الآن جزءًا مهمًا من اختبار مخبري شائع يسمى تفاعل البوليمراز المتسلسل (PCR)، الذي يُستخدم في العديد من الدراسات العلمية والطبية بما في ذلك الكشف عن متحوّر فيروس كورونا - سارس-2 المُسبب لفيروس كورونا (كوفيد-19).

ومن خلال هذه الأمثلة فقط، يمكنك أن ترى أن ميكروبات المحيطات وخاصةً البكتيريا والعتائق -على الرغم من صغر حجمها- هي من الكائنات المهمة للغاية في المحيطات. والأمر الأكثر إثارة للاهتمام هو أن العديد من الكائنات الحية في المحيطات ووظائفها لم تُكتشف بعد. إذن، كيف يمكننا الحصول على صورة شاملة لجميع الكائنات الحية التي تعيش في المحيط، من حقيقيات النوى إلى أصغر بدائيات النوى وأصعبها في الدراسة؟ كم سيكون الأمر رائعًا إذا استطعنا ببساطة أخذ عينات من المياه أو الرواسب من المحيط وتحليلها بسرعة في المختبر لمعرفة أنواع الكائنات الحية التي تعيش هناك والوظائف التي تؤديها؟ حسنًا، بفضل تقنية جديدة وقوية تُدعى الميتاجينوميات، أصبح *بإمكان* الباحثين فعل ذلك!

دراسة الجينات لفهم الكائنات الحية

يحتوي كل كائن حي على الحمض النووي الذي يحمل التعليمات - أي الجينات - التي تُشفِّرُ بنية ذلك الكائن الحي ووظيفته. وتُسمى جميع جينات الكائن الحي مُجتمعة الجينوم.

الجينوم (Genome)

هو مجموعة تضم جميع جينات الكائن الحي.

وتتمثل إحدى الطرق الرئيسية التي يدرس بها العلماء جينومات الكائنات الحية (وهو مجال يسمى علم الجينوم) في تحديد التسلسل حمضها النووي. والتسلسل هو تقنية مختبرية تتيح للعلماء «قراءة» الشفرة الوراثية. ولسنوات عديدة، كان تسلسل الحمض النووي عملية مُعرضة للأخطاء وتستغرق وقتًا طويلًا، ولم يكن بإمكان العلماء سوى تحليل تسلسل أجزاء قصيرة من الحمض النووي في كل تجربة، وكان الأمر يستغرق وقتًا طويلًا للغاية لقراءة جينوم كائن حي. فعلى سبيل المثال، استغرق تحديد تسلسل الجينوم البشري بأكمله -المُسمى مشروع الجينوم البشري- 13 عامًا من العمل الذي اضطلع به العديد من العلماء في 20 مؤسسة في جميع أنحاء العالم [4].

التسلسل (Sequencing)

هو تقنية مختبرية تسمح للعلماء بـ«قراءة» الشفرة الوراثية، سواء على شكل مقاطع صغيرة أو جينوم الكائن الحي بأكمله.

غير أن بعض التطورات التقنية المذهلة في مجال تسلسل الحمض النووي -في العقود الماضية- ساهمت في جعل تسلسل الجينوم الكامل أسرع وأسهل وأقل تكلفة، مما ساهم في ازدهار علم الميتاجينوميات . يعني مقطع «ميتا» «أعلى» أو «ما وراء»، لذا، فإن علم الميتاجينوميات هو «ما وراء» دراسة جينوم كائن حي واحد، أي إنه دراسة المعلومات الوراثية *المجمعة من جميع* الكائنات الحية الموجودة في عينة من البيئة، مثل الماء أو التربة.

علم الميتاجينوميات (Metagenomics)

هو دراسة جينومات جميع الكائنات الحية في عينة معينة، مثل عينة من مياه المحيط أو الكائنات الموجودة على جلد الإنسان.

ويستطيع العلماء -باستخدام تقنيات الميتاجينوميات- تحديد تسلسل *كل* الحمض النووي في عينة من مياه المحيط لتحديد جينوم المحيطات العالمي؛ أي جميع الجينات من جميع الكائنات الحية الموجودة في تلك العينة. ويمكن لهذه المعلومات أن تحيط العلماء علمًا بأنواع الكائنات الحية الموجودة وأنواع الوظائف المهمة بيئيًا التي تؤديها في موائل المحيطات [5]!

قوة علم الميتاجينوميات: ما الكائنات التي تعيش في المحيط وما دورها؟

اضطلعت بعثة سورسير الثانية العالمية لأخذ عينات من المحيطات بإجراء أول دراسة ميتاجينومية للمحيطات، في الفترة من 2003 إلى 2004، حيث حللت مجتمع العوالق البحرية. وعلى مدى السنوات العشر الماضية، أُجريت بعثات استكشافية أخرى، منها بعثة تارا للمحيطات، التي جمعت 243 عينة من 68 موقعًا لأخذ العينات بين عامي 2009 و2013، معظمها من أعالي المحيط. وقد حدد تحليل الميتاجينوميات لهذه العينات 33.3 مليون جين! (في المقابل، يحتوي الجينوم البشري على نحو 30,000 جين - انظر هنا لمزيد من المعلومات.) وقد توسعت الدراسات الإضافية، بما في ذلك بعثة مالاسبينا، وبرنامج يوم أخذ العينات من المحيطات [6]، وسلسلة هاواي الزمنية للمحيطات في هذه النتائج، حيث أخذت عينات من محيطات أخرى، وموائل بحرية محددة، ومياه من أعماق مختلفة.

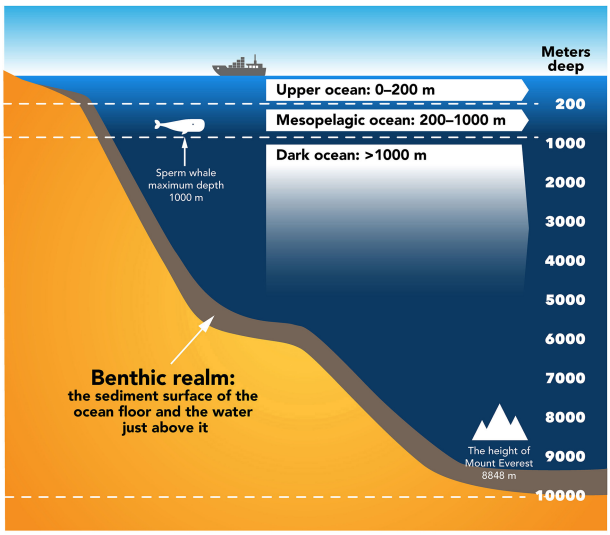
ومن المهم أن ندرك أن بيئة المحيط ليست متماثلة من السطح إلى قاع المحيط، بل يمكننا تقسيمها إلى أربع مناطق فريدة متميزة، على النحو الموضح في الشكل 1A. وقد دمجنا -في بحثنا- الكم الهائل من بيانات الميتاجينوم المُستقاة من 2112 عينة من المحيطات جُمعت من دراسات سابقة متعددة (الشكلان 1B, C)، لإنشاء «فهرس»

كامل لجينوم المحيطات العالي، يُسمى فهرس KMAP العالي لجينات المحيط 1.0. يحتوي هذا الفهرس على كمية مذهلة من المعلومات تعادل 317.5 مليون مجموعة جينية (مجموعات من الجينات المتشابهة المُجمعة معًا حسب الوظيفة)، نصفها تقريبًا مُصنَّف، أي صُنف وفقًا لنوع الكائن الحي الذي تنتمي إليه المجموعة ووظائف البروتينات التي تُشفِّرها.

مُصنَّف (Annotated)

أي مُصنف وفقًا لنوع الكائن الحي الذي تنتمي إليه الجينات ووظائف البروتينات التي تُشفِّرها.

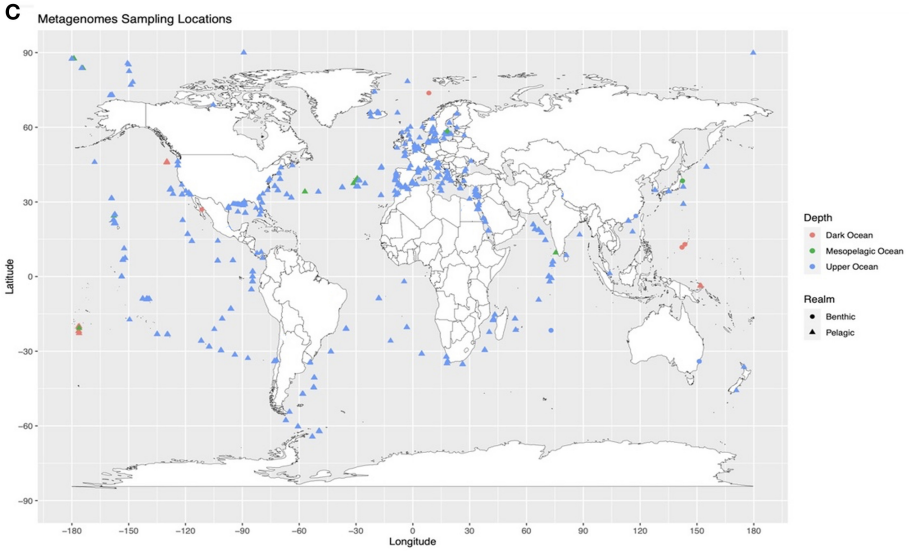
A



B

Depth Zone/Realm	Arctic Ocean	Atlantic Ocean	Indian Ocean	Pacific Ocean	Southern Ocean	Mediterranean Sea	Total
Upper Ocean	64	498	246	571	29	241	1649
Mesopelagic Ocean	22	44	26	56	3	1	152
Dark Ocean	24	2	0	188	0	1	215
Benthic Realm	3	45	8	40	0	0	96
Total	113	589	280	855	32	243	2112

C

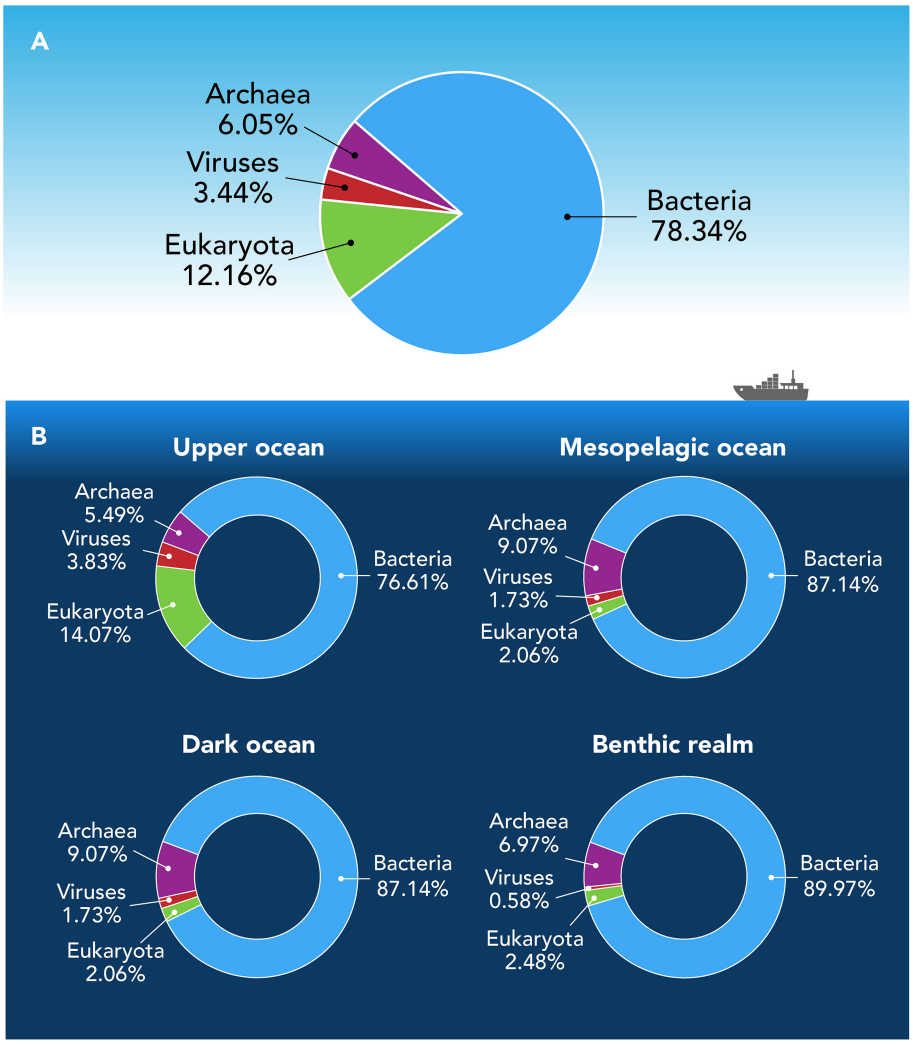


شكل 1

العينات المُجمعة لدراستنا. **(A)** مناطق المحيط وأعماقها. **(B)** مواقع ومناطق عمق العينات المُستخدمة في بحثنا. ويمكنك أن ترى أن بعض المحيطات، مثل المحيط الجنوبي، وبعض مناطق الأعماق، مثل المحيط المظلم والنطاق القاعي، ممثلة تمثيلًا غير كافٍ في هذه العينات. **(C)** المواقع التي جُمعت منها الميتاجينومات المُستخدمة في بحثنا في النطاق القاعي والمنطقة المفتوحة. وتُوضَّح مناطق العمق من خلال ألوان الدوائر.

البكتيريا: القوى المؤثرة في المحيط

بالتركيز على مجموعات الجينات المُصنفة - تلك التي يمكننا ربطها بنوع معين من الكائنات الحية والتي لدينا معلومات وظيفية عنها - تبين لنا أن 78.34% من الجينات المُصنفة في جميع عينات المحيطات، كانت من البكتيريا، تليها حقيقيات النوى (12.16%) ثم العتائق (6.05%) والفيروسات (3.44%) (الشكل 2A). وكانت جينات البكتيريا هي المهيمنة في جميع مناطق العمق، ومع ذلك، لم تكن جينات هذه الأنواع الأربعة الرئيسية من الكائنات الحية في المحيطات مُوزعة بالتساوي في جميع المناطق؛ فقد احتوى النطاق القاعي ومناطق الأعماق المختلفة في المنطقة المفتوحة على نسب مختلفة من كل نوع من الكائنات الحية (الشكل 2B).



شكل 2

شكل 2

(A) الوفرة الإجمالية للجينات من الأنواع الأربعة الرئيسية للكائنات الحية في جميع عينات المحيطات. **(B)** تختلف وفرة الجينات من كل نوع من أنواع الكائنات الحية بين مناطق العمق في المنطقة المفتوحة (الطبقة المحيطية العليا والمنطقة المتوسطية من المحيط والمحيط المظلم) والنطاق القاعي. ونستفيد من هذا أن كل منطقة من المحيط تشكل موئلًا فريدًا من نوعه ذا ظروف نمو محددة، مما يسمح بازدهار أنواع معينة من الكائنات الحية.

وهذا ليس مفاجئًا نظرًا لاختلاف الظروف في مناطق الأعماق، خاصةً من حيث كمية الضوء المتاحة، مما يؤدي إلى تكوين مجموعة متنوعة من المكامن الإيكولوجية الفريدة التي يمكن أن تزدهر فيها أنواع محددة من الكائنات الحية.

عملية الأيض لدى الميكروبات وتأثيرها على مناخ الأرض

تحافظ عملية الأيض لدى الميكروبات على صحة المحيطات من خلال التحكم في تدفق العناصر الغذائية والطاقة.

وكما ذكرنا سابقًا، تؤثر بعض عمليات الأيض لدى الميكروبات على دورة العناصر -مثل الكربون- التي يمكن أن تؤثر على مناخ الأرض. ونظرًا لأهمية عملية الأيض لدى الميكروبات، فقد ألقينا نظرة متعمقة على الجينات المرتبطة بعملية الأيض في فهرسنا. ففي العينات المأخوذة من النطاق القاعي، شاركت 41.3% من المجموعات الجينية المُصنفة في عمليات الأيض، مقارنةً بـ 25% فقط من المجموعات الجينية من المجتمعات البحرية المفتوحة. يشير هذا إلى أن ثمة العديد من العمليات الحيوية التي تشهدها هذه المنطقة من المحيط، والتي غالبًا ما تكون مهملة ولا تحظى بالدراسة الكافية!

عندما فرزنا الجينات المُصنفة المرتبطة بعملية الأيض الموجودة في جميع عينات المحيط حسب المواد المُستَقلَبة، تبين لنا أن 50% من تلك الجينات شاركت في شكل من أشكال الأيض المرتبط بالكربون (الشكل 3). وتُعد الجزيئات التي تحتوي على الكربون -مثل ثاني أكسيد الكربون (CO_2) والميثان (CH_4)- من غازات الدفيئة التي تساهم في الاحترار العالمي. وتستطيع بعض البكتيريا والطحالب استخدام عملية البناء الضوئي لتحويل ثاني أكسيد الكربون إلى كربوهيدرات، مُستعينةً بضوء الشمس، ومن ثمّ إزالة ثاني أكسيد الكربون (CO_2) من الغلاف الجوي. بيد أن عملية البناء الضوئي ليست المسار الوحيد الذي تستخدمه الكائنات الحية في المحيطات لاستقلاب\ أيض الكربون!

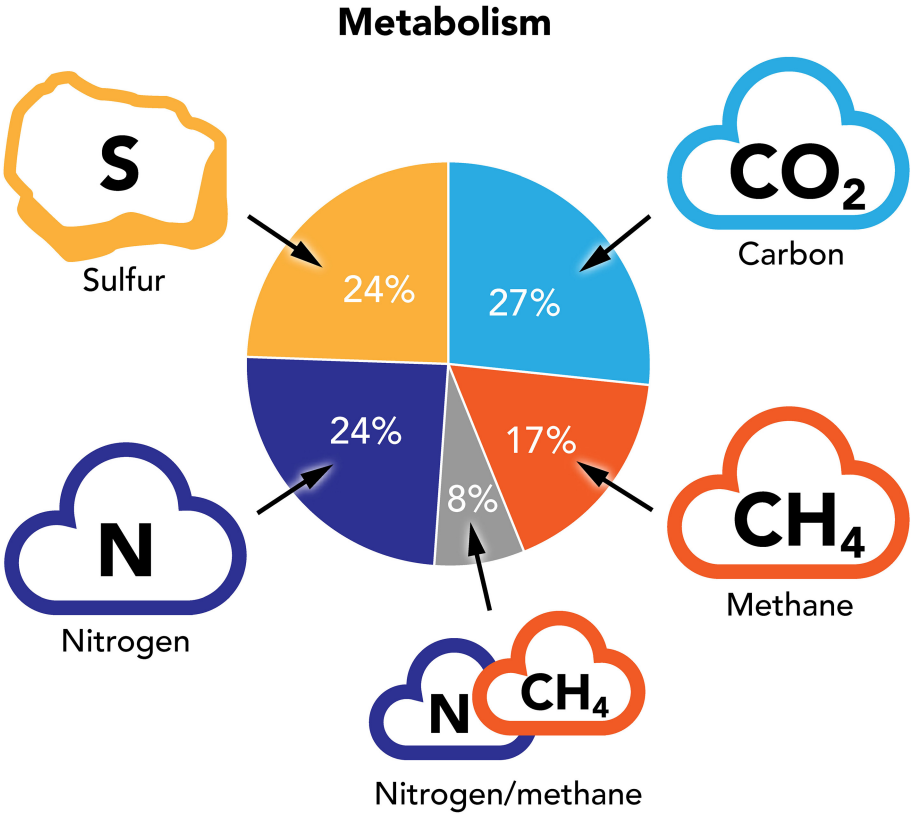
فلا تحتاج مسارات استقلاب الميثان -مثلًا- إلى الضوء ويمكن أن تعمل في أعماق المحيطات والنطاق القاعي، حيث لا يصل الضوء. وقد اكتُشفت بعض هذه المسارات مؤخرًا ولا يزال أمام العلماء الكثير ليتعلموه عنها.

غازات الدفيئة (Greenhouse gases)

هي الغازات الموجودة في الغلاف الجوي للأرض التي تحتجز حرارة الشمس، مما يمنعها من التبدد إلى الفضاء.

الاحترار العالمي (Global warming)

هو ارتفاع متوسط درجة حرارة الأرض الناجم عن غازات الاحتباس الحراري في الغلاف الجوي.



شكل 3

شكل 3

تبيَّن لنا -في جميع عينات المحيطات- أن أكثر من 50% من جينات الأيض المُصنَّفة التي حددناها في تحليلنا الميتاجينومي مرتبطة بشكل من أشكال استقلاب الكربون (ثاني أكسيد الكربون (CO_2) أو الميثان (CH_4). كما احتوت العينات على الجينات المشاركة في استقلاب النيتروجين والكبريت.

هل علم الميتاجينوميات هو مستقبل أبحاث المحيطات؟

يتألف فهرس KMAP العالمي لجينات المحيط 1.0 من نحو 163 مليون مجموعة جينية مُصنفة تزودنا بكمية غير عادية من المعلومات حول أنواع الكائنات الحية التي تعيش في أعماق مختلفة من المحيط والوظائف التي تؤديها. ويتجاوز جينوم المحيطات العالمي كونه مجرد فهرس بسيط للكائنات الحية العديدة التي تعيش فيه ووظائفها؛ فهو يعمِّق فهمنا للمحيط ويوفر لنا «خط أساس» لتقييم آثار الأنشطة البشرية التي يمكن أن تخل بالتوازن الدقيق للمحيط، مثل التلوث والإفراط في الصيد والتعدين في المحيطات.

ويجري تسلسل جينوم المحيطات العالمي ودراسته منذ فترة، إلا أن ثمة عاملين حدّا من حجم تلك الدراسات، هما التكنولوجيا والتكلفة. وقد أسفرت الإنجازات الحديثة في تقنيات التسلسل عن أنظمة أسرع وأدق وأكثر قابلية للحمل [7].

وتُعد قابلية الحمل ذات أهمية خاصة لعلماء البحار لأن الأنظمة المحمولة يمكن استخدامها على متن سفن الأبحاث التي تجوب المحيطات. كما أدت هذه التطورات في تكنولوجيا التسلسل إلى خفض تكلفتها إلى حد كبير. ففي الماضي، كان العلماء مضطرين لطرح أسئلة محدودة واختيار تجارب التسلسل التي سيجرونها بعناية بسبب التكلفة الباهظة لهذه الأبحاث. واليوم، وبفضل تكنولوجيا التسلسل الحديثة

وغير المكلفة، بات جمع بيانات الجينوم على نطاق لم يسبق له مثيل أمرًا سهلًا نسبيًا. ويمكن أن تساعد هذه البيانات العلماء في الإجابة عن أسئلة حول النطاق الهائل من خدمات النظام البيئي التي توفرها الكائنات الحية في المحيطات للحفاظ على صحة كوكبنا وصحتنا نحن أيضًا.

هل *لديك* أسئلة عن الكائنات الحية في المحيطات ووظائفها؟ ربما توفر الدراسات الميتاجينومية المستقبلية لجينوم المحيطات العالمي إجابات عليها!

شكر وتقدير

تلقى هذا البحث الدعم من جامعة الملك عبد الله للعلوم والتقنية من خلال تمويل تنافسيّ للمراكز قُدِّم إلى مركز أبحاث العلوم البيولوجية الحاسوبية. وشاركت في كتابته سوزان ديباد الحاصلة على درجة الدكتوراة وخريجة كلية الدراسات العليا في العلوم الطبية الحيوية بجامعة ماساتشوستس (الولايات المتحدة الأمريكية) وكاتبة/محررة علمية في شركة إس جي دي للاستشارات ذ.م.م.

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

Laiolo, E., Alam, I., Uludag, M., Jamil, T., Agusti, S., Gojobori, T., et. al. 2024. Metagenomic probing toward an atlas of the taxonomic and metabolic foundations of the global ocean genome. *Front. Sci.* 1:1038696. doi: 10.3389/fsci.2023.1038696

المراجع

1. Jaume D., and Duarte C. M. 2006. *General Aspects Concerning Marine and Terrestrial Biodiversity. The Exploration of Marine Biodiversity–Scientific and Technological Challenges*. Bilbao: Fundación BBVA.
2. Venter, J. C., Remington, K., Heidelberg, J. F., Halpern, A. L., Rusch, D., Eisen, J. A., et al. 2004. Environmental genome shotgun sequencing of the Sargasso Sea. *Science* 304:66–74. doi: 10.1126/science.1093857
3. Rusch, D. B., Halpern, A. L., Sutton, G., Heidelberg, K. B., Williamson, S., Yooseph, S., et al. 2007. The sorcerer II global ocean sampling expedition: Northwest

Atlantic through eastern tropical pacific. *PLoS Biol.* 5:e77. doi: 10.1371/journal.pbio.0050077

4. Wikipedia. 2022. *Human Genome Project.* Available online at: https://en.wikipedia.org/wiki/Human_Genome_Project (accessed January 18, 2023).
5. Escobar-Zepeda, A., Godoy-Lozano, E. E., Raggi, L., Segovia, L., Merino, E., Gutiérrez-Rios, R. M., et al. 2018. Analysis of sequencing strategies and tools for taxonomic annotation: defining standards for progressive metagenomics. *Sci. Rep.* 8:12034. doi: 10.1038/s41598-018-30515-5
6. Kopf, A., Bicak, M., Kottmann, R., Schnetzer, J., Kostadinov, I., Lehmann, K., et al. 2015. The ocean sampling day consortium. *GigaSci.* 4:27. doi: 10.1186/s13742-015-0066-5
7. Tyler, A. D., Mataseje, L., Urfano, C. J., Schmidt, L., Antonation, K. S., Mulvey, M. R., et al. 2018. Evaluation of oxford nanopore's MinION sequencing device for microbial whole genome sequencing applications. *Sci. Rep.* 8:10931. doi: 10.1038/s41598-018-29334-5

نُشر على الإنترنت بتاريخ: 31 يوليو 2025

المحرر: Pedro Morais

مرشدو العلوم: Luisa I. Falcon و Gustavo Fonseca

الاقتباس: Laiolo E, Alam I, Uludag M, Jamil T, Agusti S, Gojobori T, Acinas SG, Gasol JM و Duarte CM (2025) جينوم المحيطات العالمي: «فهرس» الحياة في المحيطات. Front. Young Minds. doi: 10.3389/frym.2023.1052361-ar

مُترجَم ومقتبس من: Laiolo E, Alam I, Jamil T, Uludag M, Agusti S, Gojobori T, Acinas SG, Gasol JM and Duarte CM (2023) The Global Ocean Genome: A "Catalog" of Ocean Life. Front. Young Minds 11:1052361. doi: 10.3389/frym.2023.1052361

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 Laiolo, Alam, Uludag, 2025 © Duarte و Gasol, Acinas, Gojobori, Agusti, Jamil. 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

IGOR، العمر: 12
أعيش في البرازيل على الشاطئ. وأحب اللعب بالليغو والسفر وركوب الأمواج والقراءة. وفي المستقبل، سأصبح مهندسًا معماريًا وأحب العلوم. ولديّ في منزلي ساحة كبيرة مع بيت شجرة.

SEBASTIAN، العمر: 13
أحب ممارسة الرياضة، والقراءة، والرياضيات، والفيزياء، وكل ما يتعلق بالفضاء!

المؤلفون

ELISA LAIOLO
Elisa طالبة دكتوراة في جامعة الملك عبد الله للعلوم والتقنية (كاوست)، تحت إشراف الأستاذ Carlos M. Duarte. وقد حصلت على درجة البكالوريوس في العلوم البيولوجية من جامعة ماركي للفنون التطبيقية في أنكونا بإيطاليا عام 2018، وعلى درجة الماجستير في علم الأحياء البحرية من الجامعة نفسها عام 2020. بدأت Elisa خلال دراستها للبكالوريوس والماجستير باستخدام علم الميتاجينوميات لدراسة أنماط التنوع الميكروبي في مجموعة كبيرة من البيئات المائية وفهم وظائف تلك الميكروبات، سواء من حيث عملية الأيض أو المواد التي تنتجها. ولطالما كان علم البيئة الميكروبية مجال الاهتمام الرئيسي لدى Elisa، وتركز دراساتها الحالية على استخدام علم الميتاجينوميات لدراسة وظائف المجتمعات الميكروبية في الرواسب، مع إيلاء اهتمام خاص لموائل الكربون الأزرق الساحلية؛ وهي النظم البيئية التي يمكنها تخزين الكربون داخل نباتاتها ورواسبها. elisa.laiolo@kaust.edu.sa*

INTIKHAB ALAM
يشغل Intikhab منصب عالم أحياء حاسوبي في مركز أبحاث العلوم البيولوجية الحاسوبية بجامعة الملك عبد الله للعلوم والتقنية منذ عام 2010. وقد حصل على درجة الدكتوراة في علم الأحياء الحاسوبي (المعلوماتية الحيوية) من جامعة بيليفيلد بألمانيا عام 2004، وحصل على درجة الماجستير في علم الأحياء الجزيئي من مركز التميز في الأحياء الجزيئية بجامعة البنجاب في باكستان. يطوّر Intikhab طرقًا لتحديد معلومات تصنيفية ووظيفية للجينات المُستخلصة من جينومات أو ميتاجينومات جديدة، لمقارنتها بقواعد البيانات المرجعية باستخدام الحواسيب الفائقة مثل شاهين ومجموعات الحواسيب المرتبطة بها. وهو يعمل على تطوير فهارس الجينات الميتاجينومية من بيانات علم الميتاجينوميات المتاحة للجمهور.

MAHMUT ULUDAG
Mahmut Uludag مطور برمجيات في جامعة الملك عبد الله للعلوم والتقنية. وهو مهتم بتحسين إمكانية الوصول إلى نتائج الأبحاث وتفسيرها باستخدام تقنيات البرمجيات مفتوحة المصدر، مثل منصة البحث سولر ومكتبة ويكا للتعلم الآلي.

TAHIRA JAMIL

Tahira Jamil باحثة في جامعة الملك عبد الله للعلوم والتقنية (كاوست). ولديها شغف بعلوم البيانات وتحليل البيانات الضخمة. وأثناء عملها في أمستردام، طورت ونفذت شفرة نماذج بايزيّة للبيانات النوعية في حزم البرامج الإحصائية مفتوحة المصدر. وعملت في جامعة الملك عبد الله للعلوم والتقنية على مشاريع مختلفة لتحليل البيانات البيئية والبيولوجية. وحللت تأثير عوامل الإجهاد المتعددة على النظام البيئي للشعاب المرجانية في البحر الأحمر. وهي تستخدم الموجات الحرارية البحرية كنهج جديد للكشف عن مناطق الشعاب المرجانية المعرضة للتبييض، باستخدام البحر الأحمر كنظام نموذجي. وقد عملت على تسلسل بيانات الجينومات، وتعاونت في وضع فهرس جينات المحيط الحيوي العالي، وأجرت تحليلًا ميتاجينوميًا على فيروس سارس والإنزيمات المُحللة للبلاستيك، وجينات مقاومة المضادات الحيوية.

SUSANA AGUSTI

Susana Agusti أستاذة متفرغة في علوم البحار بجامعة الملك عبد الله للعلوم والتقنية، في مركز أبحاث البحر الأحمر (المملكة العربية السعودية). وقد عملت سابقًا أستاذة في معهد المحيطات وكلية بيولوجيا النبات بجامعة غرب أستراليا والمجلس الوطني الإسباني للبحوث، وأستاذة مساعدة في جامعة ترومسو (النرويج). وهي حاصلة على درجتي البكالوريوس والدكتوراة من جامعة مدريد المستقلة. وشاركت في بعثات محيطية في المحيطات القطبية الشمالية والجنوبية (أنتاركتيكا)، بالإضافة إلى المحيطات الأطلسي والهندي والهادئ. وهي تدرس أيضًا البحر الأحمر، أحد أكثر البحار دفئًا على وجه البسيطة. كما تدرس الأستاذة Agusti العوالق الضوئية والتوازن الأيضي للمحيطات، بهدف تقييم تأثير تغير المناخ على المحيطات. كما تدرس حساسية الكائنات البحرية لزيادة درجة حرارة المياه وغيرها من عوامل الإجهاد، مثل الأشعة فوق البنفسجية - ب والملوثات الثابتة ومجموعات من عوامل الإجهاد.

TAKASHI GOJOBORI

الأستاذ Gojobori هو أستاذ متميز في جامعة الملك عبد الله للعلوم والتقنية. تتنوع اهتماماته البحثية من علم الجينوم المقارن والتعبير الجيني للخلايا العصبية في الأعضاء الحسية لمختلف الكائنات الحية إلى الميتاجينوميات البحرية لمجموعة متنوعة من الكائنات الحية الدقيقة. ويهدف إلى توضيح الأصل التطوري للجينوم وكيف يمكن استخدامه لتطوير الطاقة الحيوية. وهو حاصل على عدد من العضويات الأكاديمية المرموقة.

SILVIA G. ACINAS

Silvia G. Acinas عالمة أبحاث في معهد علوم البحار في برشلونة. وهي تحب العمل مع أصغر الميكروبات الحية على سطح الأرض، أي بدائيات النوى (البكتيريا والعتائق). وحصلت على درجة الدكتوراة في أليكانتي بإسبانيا، حيث درست تنوع البكتيريا والعتائق في النظم البيئية البحرية. وبعد حصولها على درجة الدكتوراة، انتقلت Silvia إلى الولايات المتحدة الأمريكية لمدة 7 سنوات، قضت خمس سنوات منها في العمل في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا، حيث تعلّمت مدى اختلاف الجينومات الميكروبية، حتى بين الأنواع المتقاربة. وقد حفز هذا شغفها بآليات التطور التي تقود عملية نشوء الأنواع في الميكروبات. وهي تعمل الآن على فهم التطور والتنوع الجيني والوظيفي للبكتيريا في النظم الإيكولوجية البحرية القطبية، المهددة بتغير المناخ.

JOSEP M. GASOL

Josep M. Gasol هو أستاذ باحث في معهد علوم البحار في برشلونة. وقد بات مفتونًا بالكائنات الميكروبية التي تعيش في البيئات المائية أثناء دراسته لعلم الأحياء، وبدأ العمل على بحيرة حمراء صغيرة (بعرض 20 مترًا فقط!) في كاتالونيا. كانت هذه البحيرة صغيرة بعض الشيء، لذلك انتقل إلى العديد من البحيرات حول مونتريال وجنوب كيبيك أثناء عمله في مرحلة ما بعد الدكتوراة. وعندما أصبحت تلك البحيرات صغيرة جدًا، قرر أن المحيط هو أكبر نظام بيئي على الأرض وأصبح مفتونًا بميكروبات المحيطات. ولا يزال يحب بيئات المياه العذبة، وقد عمل أيضًا في البحيرات الجبلية والمالحة، الصغيرة والكبيرة، في أمريكا الجنوبية وأفريقيا وجبال البرانس. الآن مهتم بالمياه الجوفية في السطح البيني بين اليابسة والمحيط. ويجمع عمله في مجال المحيطات بين الأبحاث في موقع ساحلي طويل الأمد (مرصد بلانيس باي الميكروبي) الرحلات الاستكشافية المحيطية الكبرى (مثل رحلة مالاسبينا)، وتتراوح مناهجه التجريبية بين الدراسات الرصدية والتجريبية. كما أنه يحب مشاهدة الطيور، ولكن ليس إجراء الأبحاث عليها!

CARLOS M. DUARTE

Carlos هو أستاذ متميز في جامعة الملك عبد الله للعلوم والتقنية. ويريد Carlos أن يبذل جُهدًا علميًا عالميًا لإعادة بناء ثروة الحياة البحرية، وهذا بعد ما يقرب من أربعة عقود من توثيقه لمدى تأثير الضغوط البشرية على الحياة البحرية. وتتسم أبحاثه بالاستقلالية والإبداع والقدرة على الاستفادة من الاكتشافات غير المتوقعة والربط بين تخصصات متعددة، بالإضافة إلى القدرة على التنظيم والتعاون مع فِرق كبيرة متعددة التخصصات. وهو يُحب الكلابَ ويستمتع بوجوده في عرض البحر، كما يهوى القراءة، وممارسة السباحة، والغوص الحر والتريض، واللعب مع حفيده أوليفر.

النسخة العربية مقدمة من
Arabic version provided by

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