

האם חיידקים שחיים מתחת לאדמה יכולים לסייע בהפחתת שינויי האקלים?

Andre Mu^{1,2,3*}, John W. Moreau⁴

¹המחלקה למיקרוביולוגיה ואימונולוגיה במכון פֶטֶר דוהרטי לזיהום ולחיסון, אוניברסיטת מלבורן, מלבורן, ויקטוריה, אוסטרליה
²בֶּנְוִמִיקָה מיקרוביאלית יישומית על שם דוהרטי, המחלקה למיקרוביולוגיה ואימונולוגיה במכון פֶטֶר דוהרטי לזיהום ולחיסון, אוניברסיטת מלבורן, מלבורן, ויקטוריה, אוסטרליה
³היחידה לאבחון מיקרוביולוגי, מעבדה לבריאות הציבור, מלבורן, ויקטוריה, אוסטרליה
⁴בית הספר למדעי כדור הארץ, אוניברסיטת מלבורן, מלבורן, ויקטוריה, אוסטרליה

סוקרים צעירים

LUKAN

גיל: 11



TÉO

גיל: 14



שינויי אקלים מתרחשים כאשר כימיקלים שֶמְכִנִים גזי חממה נכנסים לאטמוספירה של כדור הארץ. פחמן דו-חמצני הוא אחד מגזי החממה החשובים. טכנולוגיה חדשה להפחתת גזי החממה שנכנסים לאטמוספירה מְעַרְבֶת אחסון כמויות גדולות של פחמן דו-חמצני מתחת לאדמה. מיקרובים, כמו למשל חיידקים, נמצאים כמעט בכל מקום על פני כדור הארץ, גם בעומק של קילומטרים רבים מתחת לאדמה. מדענים משלבים יכולות ממיקרוביולוגיה (חֶקֶר מיקרובים), מניאולוגיה ומכימיה כדי להבין כיצד חיידקים תת-קרקעיים יכולים לסייע בהפחתת גזי החממה באטמוספירה, ובשמירה על כדור הארץ במצב בריא.

ישנם חיידקים שחיים מתחת לאדמה ונחשפים לגזים מהאטמוספירה

אנשים זקוקים לבנזין ולחשמל כדי להסיע את המכוניות שלהם, לצפות בטלוויזיה או לשחק במשחקים בטאבלט שלהם. כימיקלים שנקראים **גזי חממה** מיוצרים כשאנחנו מפיקים בנזין

**גזי חממה
(Greenhouse gases)**

גזי חממה הם סוג של גז שתורם לשינויי האקלים. פחמן דו-חמצני הוא דוגמה לגז חממה.

**לכידה של פחמן ואחסון
(Carbon Capture and Storage - CCS)**

לכידה ואחסון של פחמן היא טכניקה שנחקרת על-ידי מדענים כדרך להפחתת ההשפעות של שינויי האקלים. הטכניקה מְעַרְבֶת "לכידה" של גזי חממה לפני כניסתם לאטמוספירה של כדור הארץ, ואחסון הגזים עמוק מתחת לאדמה.

**אקוויפר
(Aquifer)**

שכבה תת-קרקעית של סלע שמכיל מים.

**חיידקים
(Bacteria)**

חיידקים הם אורגניזמים מיקרוסקופיים, והם מכילים תא אחד בלבד בעל מבנים פשוטים.

איור 1

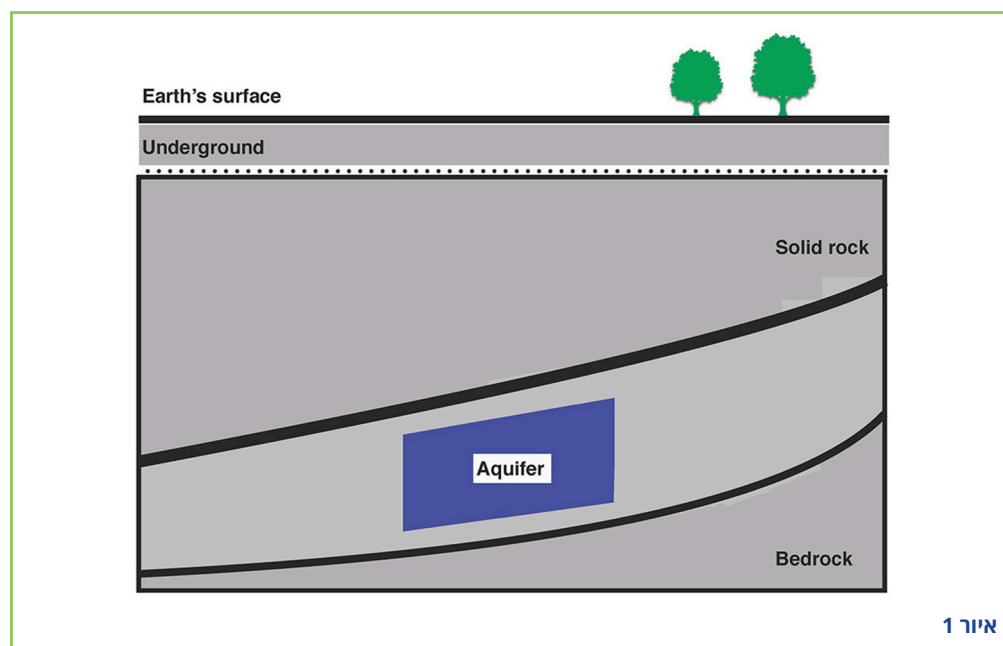
אקוויפרים ממוקמים עמוק מתחת לפני השטח של כדור הארץ. אקוויפר הוא שכבת סלע תת-קרקעית שמכילה מים (בכחול). האקוויפר שהשתמשו בו במחקר זה הוא בעומק של 1.4 קילומטרים מתחת לאדמה. דוגמיות מים שנאספו מאקוויפר זה נלקחו למעבדה כדי לחקור אם הזרקת CO₂ לתוך האקוויפר שינתה את אוכלוסיות החיידקים שחיו שם.

וחשמל עבור שימושים יומיומיים. גזי חממה יכולים להיות מסוכנים כאשר הם נכנסים בכמויות גדולות לאטמוספירה של כדור הארץ, והם יכולים לגרום לבעיות סביבתיות. גדילה משמעותית בכמות גזי החממה לאורך תקופת זמן קצרה יכולה לגרום לשינויים בתבניות מזג האוויר בעולם. השינויים האלה יכולים לגרום לקרחונים להִמָּס ולגובה פני הים לעלות, מה שעשוי לגרום להצפה של ערים שנמצאות סמוך לים ולהותיר אנשים רבים מחוסרי בית.

פחמן דו-חמצני (CO₂) הוא גז חממה חשוב. מדענים שמו לב לגדילה בכמויות CO₂ באטמוספירה כתוצאה מפעילות אנושית. דרך אחת שבה מדענים יכולים לסייע בהפחתת גזי החממה באטמוספירה ידועה בתור **לכידה של פחמן ואחסון**. מדענים יכולים להשתמש בציוד מיוחד כדי "ללכוד" CO₂ לפני שהוא נכנס לאטמוספירה, ואז לאחסן את הגז המזיק עמוק מתחת לאדמה.

ישנם מקומות תת-קרקעיים שיכולים לאחסן כמויות גדולות של גז CO₂. המקומות האלה הם חורים קטנטנים וכמעט אינסופיים בכמותם שקיימים בסלעים (איור 1). הסלעים התת-קרקעיים יוצרים שכבות שנמשכות קילומטרים רבים בכל הכיוונים, ויכולות להיות בעובי של מטרים רבים. השכבות האלה נקראות **אקוויפריים**. אקוויפריים מכילים מים שיכולים לנוע בסלעים באופן חופשי, דרך חורים קטנטנים. כאשר גז CO₂ מוזרק לתוך אחד האקוויפריים האלה, הוא יכול להיות מיוצב כך שלא "ידלוף" חזרה אל תוך האטמוספירה. ה-CO₂ מיוצב כשהוא כלוא בתוך החורים הקטנטנים שבסלעים. ניסויים גדולים הראו שהאקוויפריים האלה יכולים להישאר יציבים במשך זמן רב.

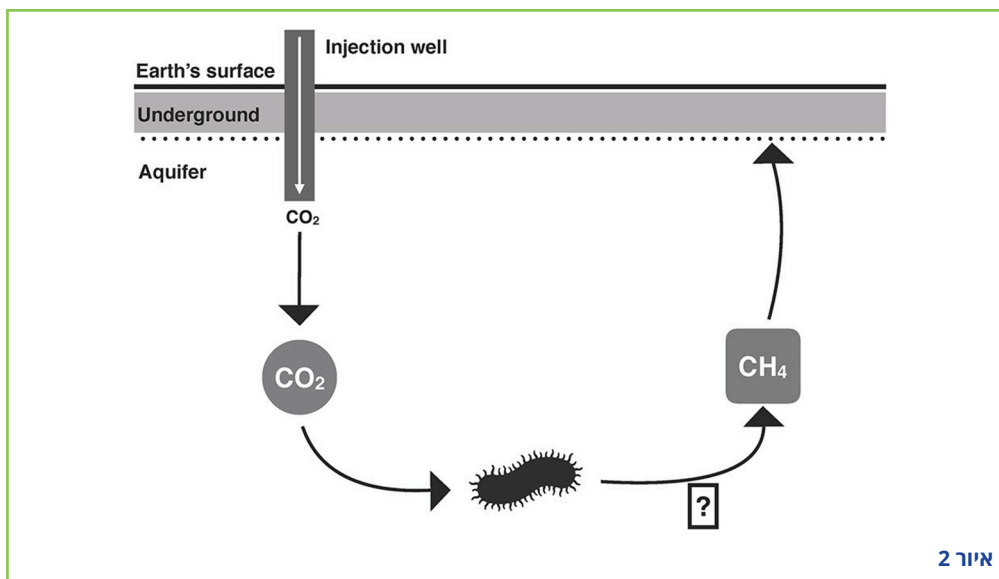
אולם מעט מאוד ידוע על האופן שבו CO₂ משפיע על מיקרובים שחיים מתחת לאדמה. מיקרובים הם אורגניזמים מיקרוסקופיים, כולל **חיידקים**, שהם סוג של מיקרובים שחקרנו בניסויים שלנו. חשוב להבין כיצד חיידקים מגיבים ל-CO₂ מתחת לאדמה מֵאַחַר שבאמצעות חילוף החומרים שלהם החיידקים יכולים להמיר גז CO₂ לגז חממה מסוכן יותר שנקרא מְתָאן.



איור 1

איור 2

כיצד חיידקים מגיבים ל- CO_2 ? אחת השאלות המרכזיות ששאלנו במחקר שלנו הייתה: "כיצד החיידקים באקוויפר יגיבו להזרקה של CO_2 ?" בעוד שהזרקה ה- CO_2 לתוך האקוויפר עשויה להסיר את גז החממה הזה מהאטמוספירה, ייתכן שחיידקים שחיים עמוק בתוך האקוויפר יוכלו להסב את ה- CO_2 לגז חממה מזיק יותר, מתאן (CH_4), שעשוי להשתחרר ולהגיע אל האטמוספירה.



איור 2

(איור 2). מדענים אינם רוצים שהחיידקים התת-קרקעיים האלה ייצרו מתאן, מאחר שמתאן יכול לברוח למעלה אל האטמוספירה ולגרום להחממה הגלובלית. לכן, מטרת המחקר שלנו הייתה להבין כיצד חיידקים שחיים מתחת לאדמה יכולים להגיב לגז CO_2 שמזרם אל תוך ה"בית" שלהם באקוויפר עמוק.

דנ"א מחיידקים מסייע למדענים להבין כיצד הם מגיבים ל- CO_2 בעומק של קילומטרים רבים מתחת לאדמה

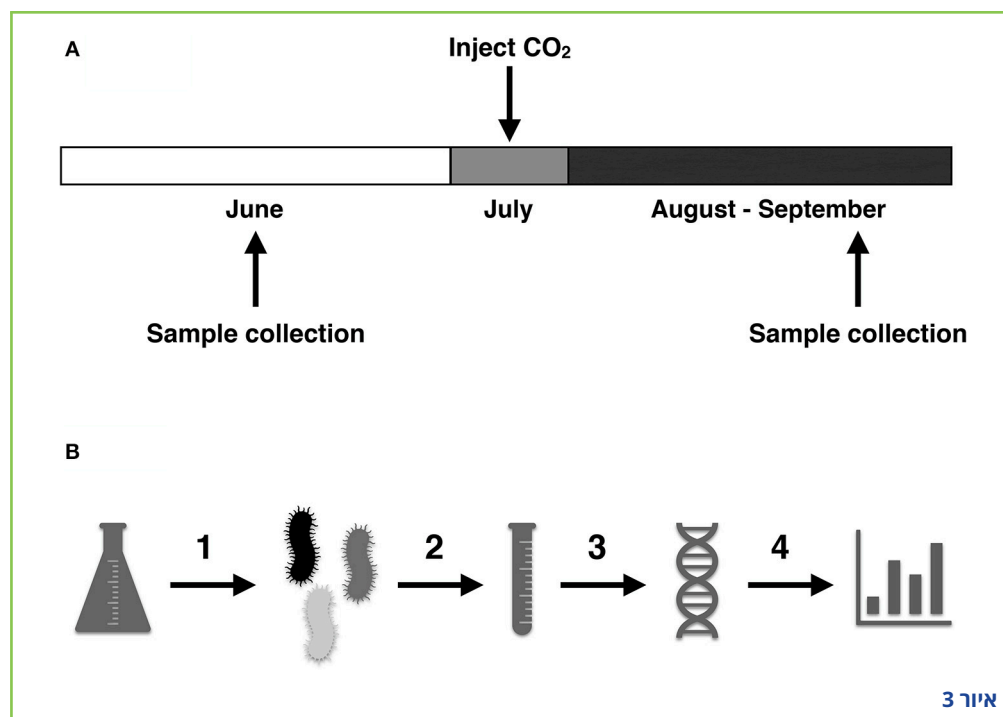
ג'ון מוראו ואנדרה מו הם חוקרים באוניברסיטת מלבורן באוסטרליה. ג'ון מתמחה בכימיה של הסביבה, בעוד שאנדרה הוא מיקרוביולוג שחוקר מיקרואורגניזמים, כולל חיידקים. יחד הם מתמחים בהבנת האופן שבו חיידקים מגיבים לכמויות גדולות של CO_2 מתחת לאדמה. ישנן שתי דרכים עיקריות לקבוע כיצד חיידקים מגיבים ל- CO_2 . אנו יכולים: (1) למדוד את השינויים בכימיית המים באקוויפרים; ו-(2) להסתכל על סוגי חיידקים שונים שנוכחים לפני הזרקה גז ה- CO_2 מתחת לאדמה ואחרי ההזרקה (איור 3). לעיתים קרובות קשה לגדל את החיידקים התת-קרקעיים האלה במעבדה מאחר שאיננו מבינים לחלוטין מהם תנאי הגידול הנדרשים. במקום זאת, אנו מסתכלים על **דנ"א** מהחיידקים האלה, שאפשר לאסוף ללא צורך לגדל אותם במעבדה. דנ"א הוא יחידת מבנה בסיסית של צורות החיים המצויות על פני כדור הארץ. מדענים יכולים להשתמש בתערובת כימיקלים, חרוזי זכוכית קטנים מאוד ומכונות כדי לפרק בזהירות את תאי החיידקים. לאחר מכן ה-דנ"א נאסף מהתאים האלה ונשלח לריצוף, שהוא טכניקה שבה משתמשים כדי לזהות את רצף ארבעת הכימיקלים (שִׁמְכָנִים C, T, A, G) אשר מרכיבים את ה-דנ"א (איור 3). הִבְנַת ה-דנ"א מהדגימות שלנו תיתן לנו מושג על סוגי החיידקים שחיים מתחת לאדמה. לכל חיידק יש רצף דנ"א ייחודי שאפשר להשתמש בו כדי לזהות את החיידק, כמו טביעת אצבע. החיידקים שזיהינו יכולים להיות מחולקים לקבוצות. למשל, חלק מהחיידקים הם אוטוטרופים, והם יכולים לייצר תרכובות אורגניות מורכבות מחומרים פשוטים, וחיידקים אחרים הם הֶטְרוֹטְרוֹפִים, והם משתמשים בתרכובות המורכבות שיוצרו על-ידי החיידקים האוטוטרופים כמקור מזון/אנרגיה. חשוב

דנ"א (DNA)

דנ"א – חומצה דאוקסיריבונוקלאית – היא מולקולה שנושאת הוראות גנטיות עבור צורות החיים השונות על פני כדור הארץ.

איור 3

מה עשינו ומתי?
(A) אספנו דוגמיות מים מהאקוויפר לפני הזרקת ה- CO_2 , במהלך חודש יוני, כדי להבין את תנאי הבסיס של האקוויפר. כמויות גדולות של CO_2 הוזרקו במהלך חודש יולי ושקעו מתחת לאדמה. דוגמיות לבחינה נאספו באוגוסט ובספטמבר כדי להבין מה ה- CO_2 עשה למי האקוויפר ולחיידקים שחיים שם. **(B)** דנ"א נשלף מתוך דוגמיות של חיידקים על-ידי: (1) סינון דוגמיות המים לשם איסוף החיידקים; (2) שימוש בתערובת של כימיקלים וחרוזי זכוכית כדי לשלוף את ה-דנ"א; (3) ריצוף ה-דנ"א ו- (4) שימוש במחשבים כדי לסייע למדענים להבין אלה חיידקים היו נוכחים לפני הזרקת ה- CO_2 ולאחר ההזרקה.



להבין ששתי קבוצות החיידקים האלה מתקשרות אחת עם השנייה במהלך אחסון של גז CO_2 באקוויפרים תת-קרקעיים.

ג'ון ואנדרה שיתפו פעולה עם קבוצת מדענים מומחים בגיאולוגיה ובהנדסה כדי לבצע ניסוי גדול באגן אוטווי שבדרום-מערב אוסטרליה. הניסוי כלל הזרקה של יותר מ-150 טונות של CO_2 אל תוך אקוויפר בעומק של יותר מקילומטר מתחת לפני הקרקע. זהו כמעט אותו המרחק כמו 10 מגרשי פוטבול (בפוטבול אוסטרלי), ומשקל של יותר מ-2,000 שחקני פוטבול! מים מהאקוויפר נאספו לפני הזרקת גז ה- CO_2 ולאחר ההזרקה. דוגמיות המים האלה נבחנו עבור כימיקלים ותנאים שונים, כמו למשל רמת חומציות וטמפרטורה. השתמשנו גם במחשבים חזקים כדי לחקור את ה-דנ"א של החיידקים שהיו נוכחים בשלבים שונים של הניסוי. רצינו לדעת אם אנו יכולים לראות את אותן קבוצות החיידקים, או אם קבוצות חדשות מופיעות אחרי שה- CO_2 הוזרק עמוק לתוך האקוויפר.

חלק מהחיידקים מגיבים בצורה טובה להזרקה של CO_2 , בעוד שאחרים אינם שמחים במיוחד

שני סוגי חיידקים היו נוכחים בדוגמיות המים בכמויות קטנות מאוד לפני הזרקת גז ה- CO_2 . החיידקים האלה נקראים *Comamonadaceae* ו-*Sphingomonadaceae*. שני סוגי החיידקים האלה נשארו במספרים קטנים עד שהוזרקו כמויות גדולות של גז CO_2 לתוך האדמה. שינויים בכימיות המים התרחשו אחרי הזרקת כל גז ה- CO_2 , ו-41 יום אחרי הזרקת ה- CO_2 מספרי ה-*Comamonadaceae* וה-*Sphingomonadaceae* עלו שניהם. שני סוגי החיידקים האלה מסוגלים לייצר אוכלוסיות דמויות ג'ל שמכנות ביופילמים, אשר מתפקדות כשכבת מגן שמגינה על תאי חיידקים מפני שינויים בסביבה. גדילת הכמויות היחסיות של *Comamonadaceae* ו-*Sphingomonadaceae* אחרי הזרקת גז ה- CO_2 מציעה שהחיידקים האלה יכולים להסתגל

לשינויים בכימיה של המים. מדענים מאמינים כי ביופילמים שמוצרים על-ידי חיידקים יכולים לחסום חורים קטנים ונקודות תורפה באקוויפר, מה שמונע מגז ה- CO_2 לדלוף החוצה אל האטמוספירה. דבר זה חשוב מאוד כדי ששיטה זו תהיה יעילה בהפחתה של כמויות ה- CO_2 אשר גורמות לשינויי האקלים.

מצאנו בדוגמיות המים מהאקוויפר סוג נוסף של חיידקים שנקרא *Carboxydocella*. *Carboxydocella* גדל טוב בתנאים של האקוויפר, היכן שכמעט אין חמצן, הלחץ של הסלעים מלמעלה גדול פי 137 יותר ממה שאנו מרגישים על פני כדור הארץ, והטמפרטורה עומדת על כ- 60°C צלזיוס. *Carboxydocella* הוא גם סוג של אוטוטרופ. החיידקים האלה יכולים להמיר פחמן חד-חמצני (CO) מהסביבה ל- CO_2 , והם גם יכולים לייצר מולקולות מימן (H_2). ה- CO_2 והמימן נמצאים בשימוש על-ידי חיידקים הטרוטרופים אחרים כמקורות של אנרגיה. כשהסתכלנו על ה-דנ"א שאספנו מהדוגמיות שלנו, גילינו שאחוז ה-*Carboxydocella* ירד ונותר בכמויות נמוכות אחרי שגז ה- CO_2 הוזרק לתוך אגן אוטוטרופי. ירידה ב-*Carboxydocella* יכולה לשנות את הקהילה החיידקית באופנים שמשבשים את אחסון גז ה- CO_2 , ועשויה להשפיע בצורה שלילית על האקוויפר. זהו תחום מחקר שצריך להיחקר בִּיְתֵר שְׁאֵת על-ידי תכנון ניסויים מסוימים במעבדה. הניסויים האלה עשויים לכלול גידול של *Carboxydocella* בריכוזים שונים של גז CO_2 במעבדה כדי לקבוע מה קורה לחיידקים האלה – האם הם יכולים להסתגל בהדרגה לריכוזים גדולים של CO_2 , או שבמקרה כזה הם ייעלמו? מה שברור אולם הוא שהחיידק *Carboxydocella* מְשַׁחֵק תפקיד חשוב במעגל הפחמן, ותומך בגדילה של חיידקים אחרים שחיים באקוויפר.

חיידקים עובדים יחד כצוות כדי לתמוך בקהילה

סוגים שונים של חיידקים בסביבה נוטים לעבוד יחד כצוות. חיידקים תומכים זה בזה באמצעות יצירת תרכובות שהם חולקים זה עם זה כדי להישאר בחיים. מהנתונים שלנו שֶׁעָרְנוּ שכאשר מי תהום נעשים חומציים יותר כתוצאה מערבוב של CO_2 בתוכם, הסביבה החומצית מקדמת את הגדילה של קבוצת חיידקים שיכולה להשתמש בתרכובת גופרית אשר נקראת סולפיד, כמקור אנרגיה. כשהתגובה הזו משתלבת עם כימיקלים אחרים באקוויפר, התנאים התת-קרקעיים משתנים ומעודדים את הגדילה של קבוצת חיידקים אחרת שנקראת חיידקים מְחַזְרֵי-סולפט. מחזורי-סולפט זקוקים למימן כדי לייצר אנרגיה. אוטוטרופים, כמו למשל *Carboxydocella*, הם גם מקור של מימן עבור מחזורי-סולפט. *Carboxydocella* אף יכולים לְסַפֵּק לקבוצת חיידקים מייצרי מתאן את ה- CO_2 והמימן שהם צריכים כדי לייצר מתאן. הזרקה ה- CO_2 אל תוך האקוויפרים עשויה לשנות את אוכלוסיית החיידקים שחיה שם. לדוגמה, *Carboxydocella* עשויים להיעלם. אם *Carboxydocella* ייעלמו, יכולת התפקוד של חיידקים מייצרי-מתאן ומחזורי-סולפט עשויה להיאבד כליל. זה עשוי לגרום לשינוי באופן שבו CO_2 מאוחסן לטווח ארוך בתוך האקוויפר.

מה הלאה?

על-ידי עריכת ניסויים גדולים בסביבה אנו יכולים להבין מה קורה בעולם האמיתי. אנו יכולים להשתמש בִּיְדֵעַ הזו כדי ליצור ניסויים פשוטים במעבדה במטרה להבין טוב יותר מה קורה לגז CO_2 , וכיצד חיידקים מגיבים ל- CO_2 שמוזרק מתחת לאדמה. הצעדים הבאים במחקר הזה הם

ערכת ניסויים במעבדה שבהם אנו מְגַדְלִים קבוצות מסוימות של חיידקים שנמצאו באקוויפריים רבים שונים, וחשיפתם ללחצים גבוהים, לטמפרטורות גבוהות ולכמויות גדולות של גז CO_2 .

באמצעות הניסויים האלה אנו לומדים כיצד ביופילמים של *Comamonadaceae* ושל *Sphingomonadaceae* מגיבים ל- CO_2 . כשנבין טוב יותר את האופן שבו גז CO_2 מגיב עם החיידקים האלה נוכל להתקדם מהר יותר לְעֵבֶר הפיכת הכיוון של ההשפעות המזיקות של שינויי האקלים.

תודות

המחברים מודים על תמיכתו של ארגון CO2CRC, ועל המימון של אַמַת אוסטרליה דרך תוכנית CO2CRC עבור ניסוי המקור.

מאמר המקור

Mu, A., Boreham, C., Leong, H. X., Haese, R. R., and Moreau, J. M. Changes in the deep subsurface microbial biosphere resulting from a field-scale CO_2 geosequestration experiment. *Front. Microbiol.* (2014) 5:209. doi: 10.3389/fmicb.2014.00209

פורסם אונליין: 31 במאי 2019

נערך על ידי: Mark A. Brandon, The Open University, United Kingdom

ציטוט: Mu A and Moreau JW (2019) האם חיידקים שחיים מתחת לאדמה יכולים לסייע בהפחתת שינויי האקלים? *Front. Young Minds* doi: 10.3389/frym.2018.00077-he

תורגם והותאם:

Mu A and Moreau JW (2019) Can Bacteria Living Underground Help Fight Climate Change? *Front. Young Minds* 6:77. doi: 10.3389/frym.2018.00077

הצהרת ניגוד אינטרסים: המחברים מצהירים כי המחקר נערך בהעדר כל קשר מסחרי או פיננסי שיכול להתפרש כניגוד אינטרסים פוטנציאלי.

COPYRIGHT © 2018 © Mu and Moreau 2019. זהו מאמר בנישה פתוחה שמופץ תחת תנאי רישיון Creative Commons Attribution License (CC BY). השימוש, ההפצה או ההעתקה מותרים לשימוש בפורומים אחרים ובלבד שיינתן קרדיט למחברים (המקוריים ולבעל זכויות היוצרים, ושהפרסום המקורי בעיתון זה מצוטט בהתאם למקובל באקדמיה). השימוש, ההפצה או ההעתקה אינם מותרים אם הם אינם עומדים בתנאים אלה.

סוקרים צעירים

LUKAN, גיל: 11

אני אוהב סוף ומשחקי וידאו.





14 גיל: Téo

אני אוהב בָּדְמִינְטוֹן, פינג פונג, קריאה ומשחקי וידיאו.

הכותבים

ANDRE MU

אנדרה הוא מיקרוביולוג. הוא מתעניין בחקירת מיקרובים שנמצאים במעיים שלנו, וגם עמוק מתחת לפני השטח של כדור הארץ. כיום הוא עובד באוניברסיטת מלבורן (אוסטרליה), והתמזל מזלו לבלות זמן כאיש סֶגֶל אורח גם באוניברסיטת קליפורניה בסן דייגו (ארצות הברית). אנדרה עורך ניסויים במעבדה, וגם מעבד קבצי נתונים גדולים באמצעות המחשב הנייד שלו שֶׁמְתַקְשֵׁר עם מחשבים חזקים אחרים. אנדרה נהנה לרכב על אופניים, לשחק קְטָרְגֶל, לצפות בפוטבול אוסטרלי וללכת לקונצרטים. האומן האהוב עליו הוא אולאפור אַרְנֶלְדֶס. *andre.mu@unimelb.edu.au

JOHN W. MOREAU

ג'ון הוא גיאולוג שהפך למיקרוביולוג, או – "גיא-מיקרוביולוג". הוא נהנה לחקור את עולם הטבע ואת האופן שבו תהליכים קטנטנים יכולים ליצור השפעה עצומה על כדור הארץ והחיים שבו. הוא אוהב לטייל, לשחק ולבלות עם משפחתו. ג'ון גדל בפיניקס, אריזונה, וְתוֹה את ההדר של הגיאולוגיה של דרום-מערב ארצות הברית. הגיבורים שלו הם אַגְסֶל אַדְאָמָס (צלם אמריקאי), רוֹנְרֶ פֶדְרֶר (טניסאי שוויצרי) ויֹדָה (דמות ראשית מהסרט מלחמת הכוכבים).

Hebrew version
provided by

מוזיאון המדע ע"ש בלומפילד ירושלים (ער.)
متحف العلوم على اسم بلومفيلد القدس
Bloomfield Science Museum Jerusalem

