البكتيريا المثبتة للنيتروجين

تواجه الزراعة الحديثة ضغوطًا لتقليل الاعتماد على الأسمدة الكيميائية مع الحفاظ على إنتاجية المحاصيل وصحة التربة. فعلى الرغم من فعالية الأسمدة النيتروجينية الكيميائية، إلا أنها تسهم بشكل كبير في تدهور البيئة من خلال انبعاثات الغازات الدفيئة، وتلوث المياه، وتحمض التربة. وتُشكّل الزراعة حوالي 78% من إجمالي انبعاثات الأمونيا عالميًا، وتُسهم بدرجة كبيرة في إنتاج أكسيد النيتروس، وهو أحد الغازات الدفيئة القوية. في الوقت ذاته، تتطلب صناعة الأسمدة الكيميائية كميات هائلة من الطاقة وتستهلك موارد الوقود الأحفوري المحدودة. وقد ظهرت البكتيريا المثبتة للنيتروجين كحل بيولوجي ثوري يعالج هذه المشكلات البيئية، مع تعزيز إنتاجية المحاصيل وخصوبة التربة في أنظمة الزراعة العضوية.

عملية تثبيت النيتروجين في الزراعة

تثبيت النيتروجين هو عملية بيولوجية يتم من خلالها تحويل غاز النيتروجين الجوي (N_2) إلى أمونيا (NH_3) أو مركبات أخرى يمكن للنباتات امتصاصها واستخدامها بسهولة. وتتم هذه العملية من خلال إنزيم النيتروجيناز، الذي يكسر الرابطة الثلاثية القوية في جزيئات النيتروجين الجوي تحت الظروف البيئية العادية.

وتنقسم البكتيريا المثبتة للنيتروجين إلى فئتين رئيسيتين، لكل منهما تطبيقات زراعية مميزة. فالمثبتات التكافلية للنيتروجين، مثل أنواع الريزوبيا (*Rhizobium*)، تُكوِّن علاقات وثيقة مع النباتات البقولية، حيث تُنشئ عُقدًا جذرية متخصصة يتم فيها تثبيت النيتروجين. وتوفر هذه البكتيريا النيتروجين المثبت مباشرةً للنباتات المضيفة مقابل الكربوهيدرات وعناصر غذائية أخرى.

أما البكتيريا الحرة المثبتة للنيتروجين، مثل أزوتوباكتر (*Azotobacter*) وأزوسبيريلم (*Azospirillum*) وكلوستريديوم (*Clostridium*)، فتعمل بشكل مستقل في التربة. وتُسهم هذه البكتيريا في إثراء النظام البيئي للتربة بالنيتروجين المثبت، مما يجعله متاحًا للنباتات المجاورة من خلال الامتصاص الجذري والتفاعلات الميكروبية.

البكتيريا المثبتة للنيتروجين

للنباتات البقولية عُقد جذرية (يسار الصورة) تحتوي على بكتيريا مثبتة للنيتروجين (الريزوبيا)، والتي تُوفّر النيتروجين للنبات.

البكتيريا المثبتة للنيتروجين بديل للأسمدة الكيميائية

1. **توفير مباشر للنيتروجين:** تقوم البكتيريا المثبتة للنيتروجين بتحويل النيتروجين الجوي إلى أشكال حيوية متاحة مباشرة في منطقة الجذور، مما يوفّر للنباتات مصدرًا مستمرًا من النيتروجين طوال موسم النمو. وتُغني هذه العملية البيولوجية عن الحاجة إلى استخدام الأسمدة النيتروجينية الكيميائية.

2. **كفاءة غذائية محسّنة:** على عكس الأسمدة الكيميائية التي يمكن أن تُفقد من التربة عن طريق الغسل أو التطاير، فإن النيتروجين المثبت بيولوجيًا يُطلق تدريجيًا مع نمو البكتيريا وتحللها. وتُحسّن هذه الآلية ذات الإطلاق المنضبط من كفاءة استخدام النيتروجين.

3. **تعزيز ميكروبيوم التربة:** تُشجّع البكتيريا المثبتة للنيتروجين على نمو المجتمعات الميكروبية المفيدة في منطقة الجذور (الريزوسفير)، مما يُكوِّن نظامًا بيئيًا للتربة أكثر تنوعًا وقدرة على التحمّل. وتُسهم هذه الشبكات الميكروبية في تحسين دورة العناصر الغذائية، ومكافحة الأمراض، وتعزيز صحة التربة بطرق لا يمكن للأسمدة الكيميائية تحقيقها.

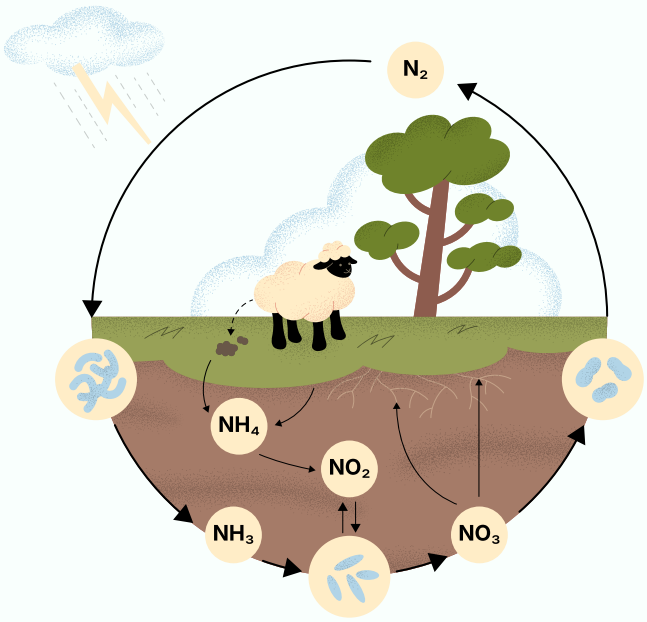
البكتيريا المثبتة للنيتروجين

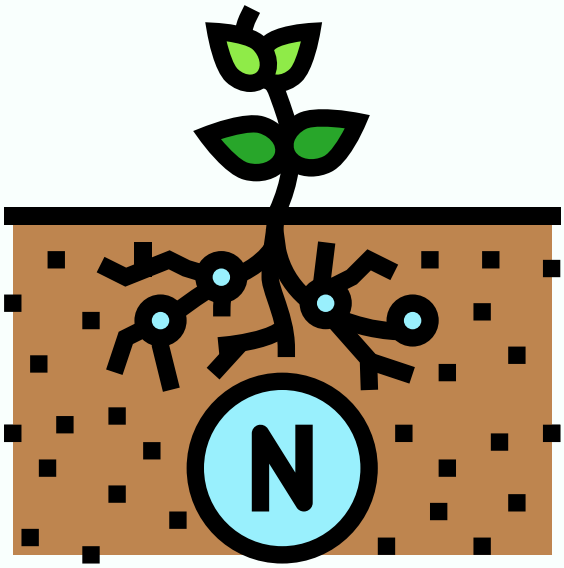
فوائد البكتيريا المثبتة للنيتروجين في الزراعة

1. **تحسين بنية التربة:** تُنتج البكتيريا المثبتة للنيتروجين أحماضًا عضوية وبوليسكاريدات تعمل على ربط جزيئات التربة معًا، مما يُحسّن تماسك التربة وقدرتها على الاحتفاظ بالماء. وتُسهم هذه البنية المحسّنة للتربة في دعم نمو الجذور وامتصاص المغذيات بشكل أفضل مقارنة بالترب المعاملة بالأسمدة الكيميائية.

2. **دورة المادة العضوية:** من خلال مشاركتها في تحلل وبناء المادة العضوية، تُسرّع البكتيريا المثبتة للنيتروجين تحويل بقايا النباتات والإضافات العضوية إلى دُبال مستقر. ويؤدي ذلك إلى زيادة محتوى المادة العضوية في التربة وتعزيز خصوبتها على المدى الطويل.

3. **تعزيز نمو النباتات:** تُنتج العديد من أنواع البكتيريا المثبتة للنيتروجين هرمونات نمو نباتية، مثل الأوكسينات والسيتوكينينات والجبريلينات، والتي تُحفّز نمو الجذور وحيوية النبات بشكل عام. وتُكمل هذه التأثيرات المُحفّزة للنمو عملية تثبيت النيتروجين لتعزيز أداء المحاصيل.





تلعب البكتيريا المثبتة للنيتروجين دورًا مهمًا في دورة النيتروجين.

البكتيريا المثبتة للنيتروجين

فوائد تطبيق البكتيريا المثبتة للنيتروجين

الاستدامة البيئية: يمكن أن تُقلّل البكتيريا المثبتة للنيتروجين من الحاجة إلى الأسمدة النيتروجينية الكيميائية بنسبة تتراوح بين 30 إلى 50%، مع الحفاظ على إنتاجية المحاصيل أو حتى تحسينها. ويُسهم ذلك في خفض البصمة الكربونية للأنشطة الزراعية.

تعزيز صحة التربة: تُحسّن عملية التثبيت البيولوجي للنيتروجين توازن درجة الحموضة (pH) في التربة، وتزيد من محتوى المادة العضوية، وتعزز التنوع الميكروبي المفيد.

حماية جودة المياه: على عكس الأسمدة الكيميائية التي تُسبب تلوثًا بالنترات وتؤدي إلى ظاهرة الإثراء الغذائي، توفر البكتيريا المثبتة للنيتروجين إطلاقًا مضبوطًا للنيتروجين، مما يُقلّل من التلوث البيئي.

الكفاءة الاقتصادية: توفّر البكتيريا المثبتة للنيتروجين فوائد اقتصادية طويلة الأمد من خلال خفض تكاليف المدخلات الزراعية، وتحسين خصوبة التربة، والحفاظ على إنتاجية المحاصيل على مدى مواسم زراعية متعددة.

المراجع

- Bhardwaj, D., Ansari, M. W., Sahoo, R. K., & Tuteja, N. (2014). Biofertilizers function as key player in sustainable agriculture by improving soil fertility, plant tolerance and crop productivity. Microbial Cell Factories, 13(1), 66. https://doi.org/10.1186/1475-2859-13-66
- Hayat, R., Ali, S., Amara, U., Khalid, R., & Ahmed, I. (2010). Soil beneficial bacteria and their role in plant growth promotion: a review. Annals of Microbiology, 60(4), 579-598. https://doi.org/10.1007/s13213-010-0117-1
- Sharma, S. B., Sayyed, R. Z., Trivedi, M. H., & Gobi, T. A. (2013). Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. SpringerPlus, 2(1), 587. https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-587

Nitrogen-Fixing Bacteria

Modern agriculture faces pressure to reduce reliance on synthetic fertilizers while maintaining crop productivity and soil health. Synthetic nitrogen fertilizers, while effective, contribute significantly to environmental degradation through greenhouse gas emissions, water pollution, and soil acidification. The agricultural sector accounts for approximately 78% of global ammonia emissions and contributes substantially to nitrous oxide production, a potent greenhouse gas. Simultaneously, synthetic fertilizer production requires enormous energy inputs and depletes finite fossil fuel resources. Nitrogen-fixing bacteria have emerged as a revolutionary biotechnological solution that addresses these environmental concerns while enhancing crop yields and soil fertility in organic farming systems.

Nitrogen Fixation in Agriculture

Nitrogen fixation is the biological process by which atmospheric nitrogen gas (N_2) is converted into ammonia (NH_3) or related compounds that plants can readily absorb and utilize. This remarkable process occurs through the enzyme nitrogenase, which breaks the strong triple bond in atmospheric nitrogen molecules under ambient conditions.

Nitrogen-fixing bacteria fall into two main categories with distinct agricultural applications. **Symbiotic nitrogen fixers**, such as *Rhizobium* species, form intimate partnerships with leguminous plants, establishing specialized root nodules where nitrogen fixation occurs. These bacteria provide fixed nitrogen directly to their host plants in exchange for carbohydrates and other nutrients.

Free-living nitrogen fixers, including *Azotobacter*, *Azospirillum*, and *Clostridium* species, operate independently in the soil without forming direct partnerships with specific plants. These bacteria contribute fixed nitrogen to the soil ecosystem, making it available to surrounding plants through root uptake and microbial interactions.

Nitrogen-Fixing Bacteria

Legumes have root nodules (left) that contain nitrogen-fixing bacteria (*Rhizobium*), which provides Nitrogen to the plant.

Nitrogen Fixing Bacteria Replaces Synthetic Fertilizers

1. **Direct Nitrogen Provision:** Nitrogen-fixing bacteria convert atmospheric nitrogen into bioavailable forms directly in the root zone, providing plants with a continuous supply of nitrogen throughout the growing season. This biological process eliminates the need for synthetic nitrogen applications.

2. **Enhanced Nutrient Efficiency:** Unlike synthetic fertilizers that can be lost through leaching and volatilization, biologically fixed nitrogen is released gradually as bacterial populations cycle through growth and decay. This controlled release mechanism improves nitrogen use efficiency.

3. **Soil Microbiome Enhancement:** Nitrogen-fixing bacteria promote beneficial microbial communities in the rhizosphere, creating a more diverse and resilient soil ecosystem. These microbial networks improve nutrient cycling, disease suppression, and overall soil health in ways synthetic fertilizers cannot achieve.

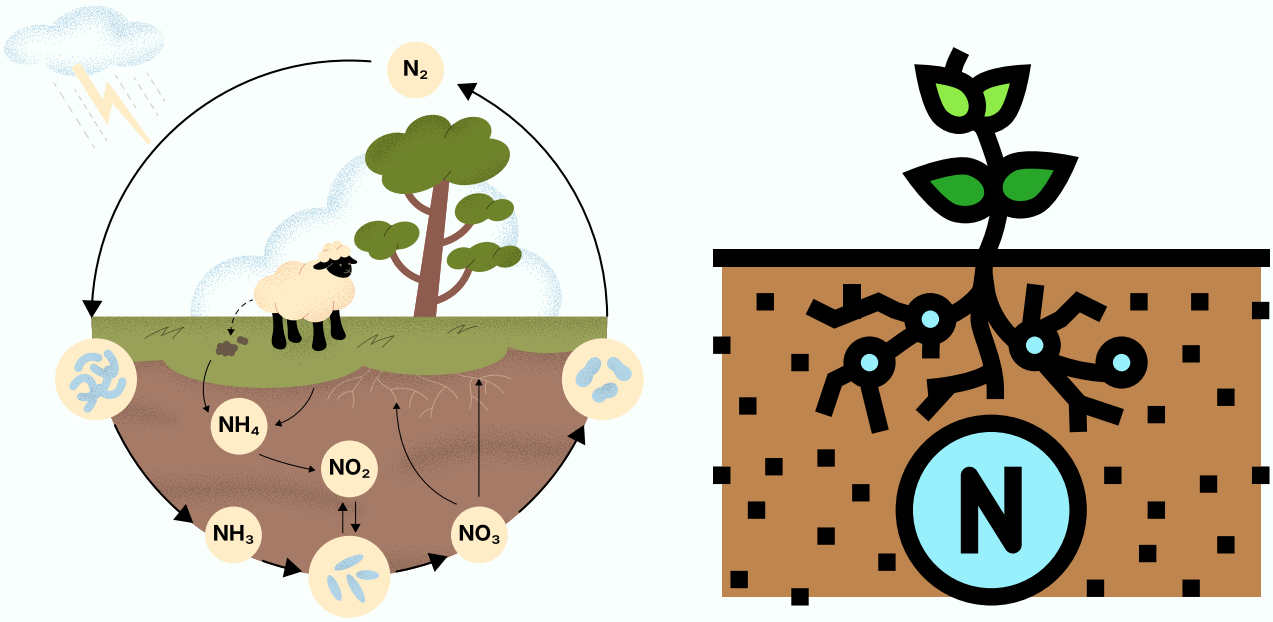
Nitrogen-Fixing Bacteria

Benefits of Nitrogen Fixing Bacteria in Agriculture

1. **Soil Structure Improvement:** Nitrogen-fixing bacteria produce organic acids and polysaccharides that bind soil particles together, improving soil aggregation and water retention. This enhanced soil structure supports better root development and nutrient uptake compared to chemically treated soils.

2. **Organic Matter Cycling:** By participating in organic matter decomposition and synthesis, nitrogen-fixing bacteria accelerate the conversion of plant residues and organic amendments into stable humus. This process increases soil organic matter content and long-term fertility.

3. **Plant Growth Promotion:** Many nitrogen-fixing bacteria produce plant growth hormones, including auxins, cytokinins, and gibberellins, which stimulate root development and overall plant vigor. These growth-promoting effects complement nitrogen fixation to enhance crop performance.



Nitrogen-fixing bacteria play an important role in the Nitrogen Cycle.

Nitrogen-Fixing Bacteria

Benefits of Nitrogen-Fixing Bacteria Implementation

Environmental Sustainability: Nitrogen-fixing bacteria can reduce synthetic nitrogen fertilizer requirements by 30-50% while maintaining or improving crop yields. This decreases the carbon footprint of agricultural operations.

Soil Health Enhancement: Biological nitrogen fixation improves soil pH balance, increases organic matter content, and promotes beneficial microbial diversity.

Water Quality Protection: Unlike synthetic fertilizers that contribute to nitrate pollution and eutrophication, nitrogen-fixing bacteria provide controlled nitrogen release that minimizes environmental contamination.

Economic Efficiency: Nitrogen-fixing bacteria provide long-term economic benefits through reduced input costs, improved soil fertility, and sustained crop productivity over multiple growing seasons.

References

- Bhardwaj, D., Ansari, M. W., Sahoo, R. K., & Tuteja, N. (2014). Biofertilizers function as key player in sustainable agriculture by improving soil fertility, plant tolerance and crop productivity. Microbial Cell Factories, 13(1), 66. https://doi.org/10.1186/1475-2859-13-66
- Hayat, R., Ali, S., Amara, U., Khalid, R., & Ahmed, I. (2010). Soil beneficial bacteria and their role in plant growth promotion: a review. Annals of Microbiology, 60(4), 579-598. https://doi.org/10.1007/s13213-010-0117-1
- Sharma, S. B., Sayyed, R. Z., Trivedi, M. H., & Gobi, T. A. (2013). Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. SpringerPlus, 2(1), 587. https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-587