Al-Farouk journal of sciences
Volume (2), Issue (4) (Spt, 2026)
ISSN: 3135-2359

مجلة الفاروق للعلوم
المجلد (2) العدد 4 سبتمبر 2026
ردمد: 3135-2359

الميكروبيوم النباتي ومستقبل الإنتاج الزراعي المستدام: دراسة تحليلية نقدية للتطورات العلمية والاتجاهات الحديثة

فتحي رمضان المبروك كشكوش
المعهد العالي للتقنية الزراعية– الغيران – ليبيا

The Plant Microbiome and the Future of Sustainable Agricultural Production: A Critical Analytical Study of Scientific Developments and Emerging Trends

Fathi Almabrouk Ramadan kushksh
Higher Institute of Agricultural Technology – Al-Ghiran
Fathi1974ksh@gmail.com
Orcid// 0009-0006-7455-9722

تاريخ الاستلام:2026/9/16 تاريخ المراجعة 2026 /9/17 تاريخ القبول:2026/10/13- تاريخ النشر2026/11/16

الملخص

يتناول هذا البحث الميكروبيوم النباتي بوصفه أحد الاتجاهات العلمية الحديثة التي أسهمت في تطوير فهم العلاقة بين النبات والكائنات الدقيقة المرتبطة به، ودورها في دعم الإنتاج الزراعي المستدام. ويهدف إلى تحليل الأسس المفاهيمية والعلمية للميكروبيوم النباتي، والتعرف على مناطق استيطانه ومكونات مجتمعاته الميكروبية، وتوضيح آليات التفاعل بين النبات والكائنات الدقيقة ووظائفها الحيوية، إلى جانب استعراض التقنيات الحديثة المستخدمة في دراسته وتطبيقاته الزراعية. كما يناقش البحث أبرز التحديات العلمية والبيئية والتقنية التي تحد من كفاءة توظيف هذه المجتمعات في الأنظمة الزراعية المختلفة، ويستشرف الاتجاهات المستقبلية المرتبطة بهندسة المجتمعات الميكروبية وتطوير التطبيقات الحيوية. واعتمد البحث على المنهج الوصفي التحليلي النقدي من خلال مراجعة الأدبيات العلمية وتحليل التطورات والاتجاهات الحديثة في المجال، دون إجراء تجارب ميدانية أو مخبرية. وتوصل إلى أن الميكروبيوم النباتي يمثل مدخلاً واعداً لتحسين كفاءة التغذية النباتية وتعزيز تحمل الإجهادات البيئية وترشيد استخدام المدخلات الزراعية، إلا أن تحقيق الاستفادة المستدامة منه يتطلب فهماً أعمق للتفاعلات الميكروبية، وتطوير تطبيقات تتلاءم مع الظروف البيئية والزراعية المختلفة.

الكلمات المفتاحية: الميكروبيوم النباتي، الإنتاج الزراعي المستدام، التفاعلات النباتية الميكروبية، المجتمعات الميكروبية، الأسمدة الحيوية، التقنيات الحيوية.

Abstract

This study examines the plant microbiome as an emerging scientific field that has expanded our understanding of the relationships between plants and their associated microorganisms and their contribution to sustainable agricultural production. It aims to analyze the conceptual and scientific foundations of the plant microbiome, identify its

main ecological habitats and microbial components, and examine the interaction mechanisms and biological functions linking plants with their associated microorganisms. The study also reviews recent technologies used to investigate the plant microbiome and explores its potential agricultural applications. Furthermore, it discusses the major scientific, environmental, and technological challenges that limit the effectiveness of microbiome-based applications across different agricultural systems, while highlighting future research directions related to microbial community engineering and the development of biological agricultural products. The study adopts a descriptive, analytical, and critical approach based on reviewing and evaluating relevant scientific literature and recent developments in the field, without conducting original field or laboratory experiments. The findings indicate that the plant microbiome represents a promising approach to improving plant nutrient acquisition, enhancing tolerance to environmental stresses, and promoting more efficient use of agricultural inputs. However, achieving its sustainable application requires a deeper understanding of microbial interactions and the development of context-specific applications adapted to different environmental and agricultural conditions.

Keywords: Plant Microbiome, Sustainable Agricultural Production, Plant–Microbe Interactions, Microbial Communities, Biofertilizers, Biotechnology.

مقدمة البحث

شهدت العلوم الزراعية خلال العقود الأخيرة تحولاً ملحوظاً في فهم العلاقة بين النبات والبيئة المحيطة به، فلم يعد نمو النبات وإنتاجيته يُفسَّران بالاعتماد على خصائصه الوراثية وتوافر العناصر الغذائية والظروف البيئية وحدها، بل امتد الاهتمام العلمي إلى دراسة المجتمعات الميكروبية المرتبطة بالنبات، وما تؤديه من أدوار حيوية في تنظيم نموه وتحسين كفاءته الفسيولوجية وتعزيز قدرته على التكيف مع الظروف البيئية المختلفة. وفي هذا السياق، برز مفهوم الميكروبيوم النباتي (Plant Microbiome) باعتباره أحد الاتجاهات البحثية الحديثة في العلوم الزراعية، ويشير إلى مجموع الكائنات الحية الدقيقة المرتبطة بالنبات، بما في ذلك البكتيريا والفطريات والعتائق وغيرها من الكائنات المجهرية، التي تستوطن منطقة الجذور والأنسجة النباتية والأسطح المحيطة بها، وتدخل في تفاعلات معقدة تؤثر في صحة النبات ونموه وإنتاجيته (Compant et al., 2025).

وتنبع الأهمية العلمية للميكروبيوم النباتي من تعدد الوظائف التي تؤديها المجتمعات الميكروبية في المنظومة الزراعية؛ إذ تسهم بعض الكائنات الدقيقة في تثبيت النيتروجين وإذابة الفوسفات وتحسين إتاحة العناصر الغذائية، بينما تؤدي أنواع أخرى دوراً في تنظيم نمو النبات وتحفيز آليات مقاومته للأمراض والضغوط البيئية، ولا سيما الجفاف والملوحة والإجهاد الحراري. وقد أسهم التقدم في تقنيات التحليل الجزيئي وتسلسل الحمض النووي في توسيع المعرفة بالتنوع الميكروبي وآليات التفاعل بين النبات والكائنات الدقيقة، الأمر الذي أتاح الانتقال من دراسة الكائنات

الميكروبية بصورة منفردة إلى فهم المجتمعات الميكروبية بوصفها منظومات متكاملة تتفاعل فيما بينها ومع النبات والبيئة المحيطة به (Hanif et al., 2024).

وفي ضوء هذه التطورات، اتجهت البحوث الزراعية الحديثة إلى توظيف الميكروبيوم النباتي في تطوير أساليب أكثر استدامة للإنتاج الزراعي، من خلال استخدام اللقاحات الميكروبية والأسمدة الحيوية والمجتمعات الميكروبية الاصطناعية، بهدف تحسين كفاءة التغذية النباتية والحد من الاعتماد المفرط على المدخلات الكيميائية. كما برز اتجاه حديث يتمثل في هندسة الميكروبيوم النباتي، من خلال التأثير في تركيب المجتمعات الميكروبية ووظائفها وتوجيه التفاعلات بين مكوناتها بما يخدم احتياجات النبات الزراعية والإنتاجية (Dubey et al., 2025).

ومع ذلك، فإن الانتقال من النتائج البحثية والمخبرية إلى التطبيقات الزراعية الواسعة لا يزال يواجه تحديات علمية وبيئية، تتعلق بتباين كفاءة الكائنات الدقيقة باختلاف أنواع النباتات وخصائص التربة والظروف المناخية، فضلاً عن صعوبة ضمان استقرار المجتمعات الميكروبية المضافة وقدرتها على الاستمرار والتفاعل مع المجتمعات الأصلية في البيئة الزراعية. وقد أكدت مراجعة Compant وزملائه (2025) أن تفاوت فعالية التطبيقات الميكروبية في الظروف الحقلية يمثل أحد أبرز القيود التي تتطلب مزيداً من البحث والتقييم النقدي.

ومن هذا المنطلق، تبرز الحاجة إلى تناول الميكروبيوم النباتي من منظور علمي تحليلي نقدي، لا يقتصر على استعراض فوائده وتطبيقاته، بل يتجاوز ذلك إلى تقييم الأسس العلمية التي يقوم عليها، وتحليل آليات تأثيره في نمو النبات وإنتاجيته، ومناقشة حدود فاعلية التقنيات الحديثة المرتبطة بتوظيفه، واستشراف إمكاناته المستقبلية في تطوير نظم إنتاج زراعي أكثر كفاءة واستدامة. وبذلك يمثل الميكروبيوم النباتي أحد المسارات الواعدة لإعادة النظر في أساليب إدارة الإنتاج النباتي، وتعزيز التكامل بين علوم النبات والتربة والأحياء الدقيقة والتكنولوجيا الحيوية الزراعية.

مشكلة البحث

أصبحت دراسة الميكروبيوم النباتي من الاتجاهات العلمية المتقدمة في العلوم الزراعية، في ظل تزايد الاهتمام بتطوير نظم إنتاج نباتي قادرة على تحقيق الكفاءة الإنتاجية والاستدامة البيئية. وعلى الرغم من التقدم في فهم طبيعة المجتمعات الميكروبية المرتبطة بالنبات والوظائف الحيوية التي تؤديها، فإن توظيف هذه المعرفة في الممارسات الزراعية لا يزال يواجه إشكالات علمية تتعلق بتعقيد التفاعلات بين النبات والكائنات الدقيقة، ومدى استقرار المجتمعات الميكروبية، وتباين استجابتها للظروف البيئية والزراعية المختلفة (Hanif et al., 2024).

وتتمثل إحدى الإشكاليات الرئيسة في وجود فجوة بين النتائج التي تحققها الدراسات المختبرية والظروف الفعلية للبيئات الزراعية؛ إذ لا تتسم الكائنات الدقيقة النافعة بالفاعلية نفسها في جميع أنواع التربة والمحاصيل والظروف المناخية، كما أن نجاح إدخال مجتمعات ميكروبية جديدة يتأثر بقدرتها على الاستقرار والتفاعل مع الكائنات الدقيقة الموجودة مسبقاً. وقد أشار Copeland et al. (2025) إلى أن فهم التفاعلات المجتمعية والخصائص البيئية للميكروبيوم يمثل شرطاً أساسياً للانتقال من المعرفة الوصفية إلى التطبيقات الزراعية الفاعلة.

وعليه تنطلق مشكلة الدراسة من وجود فجوة معرفية وتطبيقية بين التقدم في التعرف على المجتمعات الميكروبية المرتبطة بالنبات وفهم وظائفها من جهة، وبين القدرة على توظيف هذه المعرفة في تطبيقات زراعية مستقرة وقابلة للتكرار من جهة أخرى. ولا يرتبط هذا التحدي بمدى توافر الكائنات الدقيقة النافعة فحسب، بل يتصل بتعقيد التفاعلات داخل المجتمعات الميكروبية، وتأثرها بالعوامل النباتية والبيئية، ومحدودية القدرة على التنبؤ بأدائها في

الظروف الزراعية المتباينة. ومن هنا تبرز الحاجة إلى تحليل نقدي يربط بين الأسس العلمية والوظائف الحيوية والتطورات التقنية، ويقيّم حدود توظيف الميكروبيوم في دعم استدامة الإنتاج (Fadiji et al., 2025).

وبناءً على ذلك، تتمحور مشكلة الدراسة حول التساؤل الرئيس الآتي:

إلى أي مدى يمكن توظيف المعرفة العلمية الحديثة حول الميكروبيوم النباتي في تطوير نظم الإنتاج الزراعي المستدام، وما أبرز المحددات العلمية والبيئية والتقنية التي تتحكم في فاعلية هذا التوظيف؟

أسئلة البحث

تسعى الدراسة إلى الإجابة عن السؤال الرئيس من خلال مجموعة من الأسئلة الفرعية التي تغطي الجوانب العلمية والوظيفية والتطبيقية للميكروبيوم النباتي:

1. ما الأسس العلمية والمفاهيم الحديثة التي يقوم عليها مفهوم الميكروبيوم النباتي؟
2. ما أبرز آليات التفاعل بين النبات والكائنات الحية الدقيقة المرتبطة به؟
3. كيف يسهم الميكروبيوم النباتي في تحسين التغذية النباتية وتعزيز مقاومة الإجهادات الحيوية وغير الحيوية؟
4. ما دور التقنيات الحيوية الحديثة في تحليل المجتمعات الميكروبية وتوجيه وظائفها لخدمة الإنتاج الزراعي؟
5. ما أبرز التحديات العلمية والبيئية التي تحد من كفاءة التطبيقات الميكروبية في الظروف الزراعية المختلفة؟
6. ما الآفاق المستقبلية لتوظيف الميكروبيوم النباتي في بناء نظم إنتاج زراعي أكثر استدامة؟

أهداف البحث

تهدف الدراسة إلى تحقيق الأهداف الآتية:

1. توضيح الأسس العلمية والمفاهيم الحديثة للميكروبيوم النباتي ومكوناته وخصائصه.
2. تحليل آليات التفاعل بين النبات والكائنات الدقيقة وأثرها في العمليات الحيوية.
3. تقييم دور الميكروبيوم في تحسين التغذية النباتية وتعزيز تحمل الإجهادات البيئية.
4. تحليل التطورات التقنية الحديثة وتطبيقاتها في دراسة المجتمعات الميكروبية وتوجيه وظائفها.
5. نقد محددات توظيف الميكروبيوم واستشراف إمكاناته المستقبلية في تطوير الإنتاج الزراعي المستدام.

أهمية البحث

تنبع أهمية الدراسة من تناولها أحد الاتجاهات العلمية الحديثة التي تسهم في إعادة تشكيل المعرفة المتعلقة بالعلاقة بين النبات والكائنات الحية الدقيقة، ويمكن تحديد أهميتها في الجوانب الآتية:

- الأهمية العلمية: تسهم الدراسة في تعميق الفهم النظري للميكروبيوم النباتي، من خلال الربط بين علم الأحياء الدقيقة النباتية وفسيولوجيا النبات وعلوم التربة، وتقديم قراءة نقدية للتطورات المفاهيمية والمنهجية في هذا المجال.
- الأهمية المعرفية: تبرز أهمية المجتمعات الميكروبية بوصفها مكوناً وظيفياً مؤثراً في صحة النبات وتغذيته وقدرته على التكيف، بما يوسع النظرة التقليدية إلى محددات الإنتاج النباتي.
- الأهمية التقنية: توضح الدراسة إمكانات التقنيات الجزيئية وتحليل البيانات متعددة الأوميكس في الكشف عن الوظائف الميكروبية، وتقييم دورها في تطوير التطبيقات الزراعية الدقيقة.

- الأهمية البيئية: تناقش إمكانات الاستفادة من الكائنات الدقيقة النافعة في ترشيد استخدام المدخلات الزراعية الكيميائية، وتحسين كفاءة استغلال الموارد الطبيعية، مع مراعاة المخاطر البيئية المحتملة.
- الأهمية المستقبلية: توفر الدراسة أساساً معرفياً ونقدياً يمكن الاستفادة منه في توجيه البحوث الزراعية نحو تطوير حلول ميكروبية أكثر استقراراً وفاعلية وقابلية للتطبيق في بيئات زراعية متنوعة.

منهجية البحث

اعتمدت الدراسة على المنهج الوصفي التحليلي النقدي، من خلال مراجعة الأدبيات العلمية المنشورة حول الميكروبيوم النباتي، وتحليل المفاهيم والنظريات والنتائج البحثية المرتبطة بتكوينه ومكوناته وآليات تفاعله مع النبات ووظائفه الحيوية. كما استندت إلى المقارنة بين الاتجاهات العلمية والتقنية الحديثة، مع التركيز على تقييم حدود الدراسات القائمة، ومدى إمكانية نقل نتائجها من البيئات المختبرية إلى التطبيقات الزراعية. وشمل التحليل موضوعات التنوع الميكروبي، والتفاعلات النباتية الميكروبية، وتقنيات التحليل الجزيئي، وهندسة المجتمعات الميكروبية، والتطبيقات الحيوية والتحديات المرتبطة بها. واقتصرت الدراسة على تحليل الأدبيات العلمية المنشورة، دون إجراء تجارب حقلية أو مخبرية أو تحليلات إحصائية أصلية.

الدراسات السابقة

تُعد الدراسات السابقة أساساً مهماً لتحديد المسار العلمي للبحث، والكشف عن التطورات التي شهدها موضوع الميكروبيوم النباتي، وتحديد الجوانب التي لا تزال بحاجة إلى مزيد من التحليل والتفسير. ونظراً لحداثة هذا المجال وتعدد تخصصاته، فقد اتجهت الدراسات إلى تناول مكوناته ووظائفه وآليات تفاعله مع النبات، إلى جانب بحث إمكانات توظيفه في تطوير الإنتاج الزراعي المستدام.

1. دراسة (Fitzpatrick et al., 2020)، بعنوان: The Plant Microbiome From Ecology to Reductionism and Beyond.، هدفت الدراسة إلى تحليل الأسس البيئية والوظيفية للميكروبيوم النباتي، مع التركيز على العوامل التي تتحكم في تكوين المجتمعات الميكروبية وتنوعها، والعلاقات المتبادلة بين النبات والكائنات الدقيقة والبيئة. وأكدت أهمية الجمع بين الدراسات البيئية والتحليلات التجريبية لفهم وظائف الميكروبيوم بصورة متكاملة.
2. دراسة (Gupta et al. ,2021)، بعنوان: Plant-microbiome interactions for sustainable agriculture: A review.، تناولت الدراسة التفاعلات بين النبات والميكروبات المرتبطة به، مع التركيز على دورها في تحسين النمو النباتي ومقاومة الأمراض وتعزيز كفاءة استخدام الموارد، كما ناقشت إمكانات الاستفادة من هذه التفاعلات في تطوير نظم زراعية مستدامة.
3. دراسة (Trivedi et al. ,2021)، بعنوان: Enabling sustainable agriculture through understanding and enhancement of microbiomes.، ركزت الدراسة على إمكانات تحسين الميكروبيوم النباتي لدعم الاستدامة الزراعية، وناقشت التفاعلات بين النبات والبيئة والمجتمعات الميكروبية، وأهمية توظيف التقنيات متعددة الأوميكس والأدوات الحاسوبية والأحياء التركيبية في فهم هذه المجتمعات وتعزيز وظائفها الزراعية.

4. دراسة (Trivedi et al. ,2022)، بعنوان: Plant–microbiome interactions under a changing world: responses, consequences and perspectives. بحثت الدراسة تأثير التغيرات البيئية والمناخية، خاصة ارتفاع درجات الحرارة والجفاف، في تركيب الميكروبيوم النباتي ووظائفه، كما ناقشت انعكاسات هذه التغيرات على قدرة النباتات على التكيف واستمرار إنتاجيتها، وأبرزت الحاجة إلى فهم التفاعلات بين النبات والميكروبات في ظل الظروف المناخية المتغيرة.
5. دراسة (Berg and Cernava ,2022)، بعنوان: The plant microbiota signature of the Anthropocene as a challenge for microbiome research. تناولت الدراسة تأثير الأنشطة البشرية والتحولات البيئية المرتبطة بالعصر الأنثروبوسيني في المجتمعات الميكروبية المرتبطة بالنبات، وناقشت التحديات التي تفرضها التغيرات البيئية على فهم تركيب الميكروبيوم ووظائفه، وأهمية مراعاة السياق البيئي عند دراسة المجتمعات الميكروبية وتطبيقاتها الزراعية. PubMed

أوجه التشابه بين الدراسات السابقة والدراسة الحالية

تتفق الدراسات السابقة مع الدراسة الحالية في عدد من الجوانب العلمية، أبرزها:

- الاهتمام بالميكروبيوم النباتي باعتباره أحد المكونات المؤثرة في صحة النبات ونموه وإنتاجيته.
- التأكيد على أهمية التفاعلات بين النبات والكائنات الدقيقة والظروف البيئية المحيطة.
- إبراز دور المجتمعات الميكروبية في تعزيز قدرة النباتات على مواجهة الإجهادات البيئية.
- الاهتمام بالتقنيات الحديثة في تحليل المجتمعات الميكروبية وفهم وظائفها.
- الربط بين توظيف الميكروبيوم النباتي ومتطلبات الاستدامة الزراعية.

أوجه الاختلاف بين الدراسات السابقة والدراسة الحالية

على الرغم من التقاطع الموضوعي بين الدراسات السابقة والدراسة الحالية، فإن الاختلاف يظهر في طبيعة المعالجة العلمية ونطاق التحليل، وذلك على النحو الآتي:

- ركزت بعض الدراسات على الأسس البيئية والتركيبية للميكروبيوم النباتي، بينما تتجه الدراسة الحالية إلى الربط بين هذه الأسس ووظائفها في تطوير الإنتاج الزراعي.
- اهتمت دراسات أخرى بالتفاعلات الميكروبية أو تأثير التغيرات المناخية بصورة محددة، في حين تتناول الدراسة الحالية هذه الجوانب ضمن إطار علمي متكامل.
- ركزت بعض الأدبيات على إمكانات التقنيات الحيوية الحديثة، بينما توسع الدراسة الحالية المناقشة لتشمل تقييم حدود هذه التقنيات ومحددات نجاحها.
- تتميز الدراسة الحالية بتبني منظور نقدي مقارن، لا يقتصر على عرض فوائد الميكروبيوم، بل يناقش التحديات التي تواجه توظيفه في البيئات الزراعية المختلفة.
- تسعى الدراسة الحالية إلى الجمع بين الأسس النظرية والآليات الوظيفية والتطبيقات المستقبلية ضمن رؤية واحدة مرتبطة باستدامة الإنتاج الزراعي.

الفجوة البحثية

تتمثل الفجوة البحثية في الحاجة إلى معالجة تحليلية تربط بين التكوين البيئي والوظائف الحيوية للميكروبيوم النباتي، وبين التطورات التقنية المستخدمة في دراسته وإمكانات توظيفه زراعيًا. فعلى الرغم من تناول الأدبيات السابقة لهذه الجوانب بصورة منفصلة أو من زوايا تخصصية محددة، تظل الحاجة قائمة إلى تحليل نقدي يوضح العلاقة بين التركيب الميكروبي والوظيفة، ويفسر أسباب التباين في كفاءة التطبيقات الميكروبية، ويحدد الشروط العلمية والبيئية اللازمة لتحويل الإمكانات البحثية إلى حلول تدعم استدامة الإنتاج الزراعي.

موقع الدراسة الحالية من الدراسات السابقة

تأتي الدراسة الحالية استكمالاً للاتجاهات البحثية السابقة، مع التركيز على تقديم معالجة نظرية نقدية متكاملة لموضوع الميكروبيوم النباتي، من خلال الربط بين مكوناته وآليات عمله وتأثيراته في العمليات الحيوية للنبات، وتحليل التطورات التقنية المرتبطة بدراسته وتوظيفه.

كما تسعى إلى تجاوز المعالجة الوصفية للتطبيقات الميكروبية، من خلال تقييم مدى فاعليتها واستقرارها، ومناقشة التحديات التي تحد من تعميم استخدامها، وصولاً إلى استشراف إمكانات توظيف الميكروبيوم في تطوير نظم إنتاج زراعي أكثر كفاءة واستدامة.

الإطار النظري

المبحث الأول: الإطار المفاهيمي والعلمي للميكروبيوم النباتي

يهدف هذا المبحث إلى تحديد الأسس العلمية التي يقوم عليها مفهوم الميكروبيوم النباتي، وبيان مكوناته وخصائصه والعوامل المتحكمة في تكوينه، بما يمهد لفهم أدواره الوظيفية في المباحث اللاحقة.

المطلب الأول: مفهوم الميكروبيوم النباتي وتطوره العلمي

يشير الميكروبيوم النباتي إلى المنظومة التي تضم الكائنات الحية الدقيقة المرتبطة بالنبات، بما تشمله من بكتيريا وفطريات وعتائق وفيروسات وأوليات، إضافة إلى مادتها الوراثية ووظائفها والتفاعلات التي تنشأ بينها وبين النبات والبيئة المحيطة. وقد تطور المفهوم من حصر الكائنات الدقيقة المرتبطة بالنبات إلى دراسة مجتمعاتها بوصفها منظومات بيئية متفاعلة تؤثر في خصائص العائل النباتي وتتأثر بالظروف المحيطة به (Fitzpatrick et al., 2020).

ويختلف مفهوم الميكروبيوم عن الميكروبيوتا؛ إذ تشير الأخيرة إلى مجموع الكائنات الدقيقة الموجودة في بيئة محددة، بينما يتسع مفهوم الميكروبيوم ليشمل مادتها الوراثية ووظائفها والتفاعلات المرتبطة بها. ويكتسب هذا التمييز أهمية في الدراسات الزراعية؛ لأن تحديد أنواع الكائنات الدقيقة لا يكفي وحده لفهم تأثيرها، بل يتطلب تحليل وظائفها وعلاقاتها المتبادلة (Fitzpatrick et al., 2020).

المطلب الثاني: المكونات والتنوع الحيوي للميكروبيوم النباتي

يتكون الميكروبيوم النباتي من مجموعات متنوعة من الكائنات الدقيقة، تختلف في خصائصها ووظائفها، وتتمثل أبرز مكوناته في:

- البكتيريا: تسهم بعض أنواعها في تثبيت النيتروجين وإذابة العناصر الغذائية وتحفيز نمو النبات، بينما ترتبط أنواع أخرى بالأمراض النباتية.
- الفطريات: تشمل الفطريات التكافلية، مثل فطريات الميكوريزا، والفطريات الممرضة التي تؤثر في صحة النبات.
- العتائق: تشارك بعض مجموعاتها في العمليات الحيوية المرتبطة بدورات العناصر في التربة.
- الفيروسات: تشمل الفيروسات النباتية والعاثيات التي تؤثر في الكائنات الدقيقة وتوازن المجتمعات الميكروبية.
- الأوليات: تسهم في تنظيم أعداد الكائنات الدقيقة والتفاعلات الغذائية داخل البيئة الترابية.

ولا ترتبط أهمية هذا التنوع بعدد الأنواع الموجودة فحسب، بل بطبيعة العلاقات الوظيفية بينها؛ فقد تتكامل بعض الكائنات في أداء وظائف حيوية، بينما تتنافس مجموعات أخرى على الموارد ومواقع الاستيطان. ومن ثم فإن التنوع الميكروبي لا يمثل مؤشراً كافياً بمفرده للحكم على كفاءة الميكروبيوم أو أثره في النبات (Lemanceau et al., 2017).

المطلب الثالث: الخصائص البيئية للميكروبيوم النباتي ومناطق استيطانه

يتميز الميكروبيوم النباتي بالديناميكية والتغير تبعاً لنوع النبات ومرحلته العمرية والظروف المحيطة به، كما تختلف المجتمعات الميكروبية من منطقة نباتية إلى أخرى نتيجة اختلاف الظروف الفيزيائية والكيميائية ومصادر التغذية.

وتتمثل أبرز خصائصه في التخصص المرتبط بنوع النبات، والتباين المكاني بين الأجزاء النباتية، والقدرة على التغير استجابة للعوامل البيئية، فضلاً عن الترابط الوظيفي بين مكوناته. وتوضح هذه الخصائص أن الميكروبيوم لا يمثل مجتمعاً موحداً، بل يتكون من مجموعات متباينة ترتبط كل منها ببيئة نباتية محددة.

وتتأثر هذه المنظومة بعوامل متعددة، أهمها الخصائص الوراثية للنبات، ودرجة حموضة التربة، والرطوبة، والحرارة، وتوافر العناصر الغذائية، والإفرازات الجذرية، والممارسات الزراعية. ويؤدي تداخل هذه العوامل إلى اختلاف تركيب المجتمعات الميكروبية حتى بين النباتات التي تنتمي إلى النوع نفسه (Trivedi et al., 2020).

المطلب الرابع: مصادر الميكروبات وآليات انتقالها إلى النبات

تصل الكائنات الدقيقة إلى النبات من مصادر بيئية متعددة، أبرزها التربة والبذور والمياه والهواء والنباتات المجاورة. وتختلف أهمية هذه المصادر باختلاف نوع الكائن الميكروبي والظروف البيئية وطبيعة النبات العائل.

وتتم عملية الانتقال أساساً من خلال مسارين؛ الأول هو الانتقال الأفقي من البيئة المحيطة إلى النبات، والثاني هو الانتقال الرأسي من النبات الأم إلى الأجيال اللاحقة، خصوصاً عن طريق البذور. وتؤدي هذه المسارات دوراً في تشكيل المجتمعات الميكروبية خلال مراحل نمو النبات، كما تفسر جانباً من الاختلاف في تركيب الميكروبيوم بين البيئات الزراعية المختلفة (Nelson, 2018).

المبحث الثاني: مناطق استيطان الميكروبيوم النباتي

لا يقتصر وجود الميكروبيوم النباتي على جزء محدد من النبات، بل يتوزع في مناطق متعددة تختلف في خصائصها البيئية والظروف التي تتحكم في استقرار الكائنات الدقيقة ونشاطها. ويؤثر هذا التوزيع في طبيعة العلاقات بين النبات ومجتمعاته الميكروبية، وفي الوظائف التي تؤديها هذه المجتمعات. ويمكن التمييز بين أربع مناطق رئيسية لاستيطان الميكروبيوم النباتي، هي: منطقة الجذور، والأنسجة الداخلية، والأسطح الهوائية، والبذور.

المطلب الأول: ميكروبيوم منطقة الجذور (الرايزوسفير)

تُعد منطقة الجذور، أو الرايزوسفير Rhizosphere، من أكثر البيئات نشاطاً من الناحية الميكروبية، وهي المنطقة المحيطة بالجذور والمتأثرة بإفرازاتها وعملياتها الحيوية. وتوفر الإفرازات الجذرية، التي تشمل السكريات والأحماض العضوية والأحماض الأمينية ومركبات أخرى، مصادر غذائية تسهم في جذب مجموعات ميكروبية محددة وانتقائها.

وتؤدي الكائنات الدقيقة في هذه المنطقة أدواراً متعددة، منها المساهمة في تحويل العناصر الغذائية إلى صور أكثر إتاحة للنبات، وتحفيز نمو الجذور، والمشاركة في الحد من تأثير بعض مسببات الأمراض. غير أن هذه الوظائف لا تتحقق بالدرجة نفسها في جميع الظروف، إذ تتأثر بنوع النبات وخصائص التربة وتركيب المجتمع الميكروبي والتفاعلات بين أفراده.

المطلب الثاني: ميكروبيوم الأنسجة الداخلية (الإندوسفير)

يشير الإندوسفير (Endosphere) إلى المجتمعات الميكروبية التي تستوطن الأنسجة الداخلية للنبات، مثل الجذور والسيقان والأوراق، ولا تقتصر على الكائنات الموجودة على الأسطح الخارجية. وتتميز هذه البيئة بظروف تختلف عن التربة والأسطح النباتية، إذ تخضع الكائنات الدقيقة فيها لانتقاء يرتبط بقدرتها على الدخول إلى الأنسجة والتكيف مع بيئتها الداخلية.

وقد تسهم الميكروبات الداخلية في تنظيم نمو النبات، وتحسين الاستفادة من بعض العناصر الغذائية، وتعزيز القدرة على تحمل الإجهادات البيئية. كما يمكن أن تؤدي بعض هذه الكائنات دوراً في مقاومة مسببات الأمراض من خلال المنافسة أو إنتاج مركبات حيوية مؤثرة. ومع ذلك، فإن وجود الميكروب داخل النسيج لا يعني بالضرورة أنه نافع؛ فقد تختلف آثاره تبعاً لنوع الكائن الدقيق والنبات والظروف المحيطة.

المطلب الثالث: ميكروبيوم الأسطح الهوائية (الفيلوسفير)

يُطلق مصطلح الفيلوسفير (Phyllosphere) على المجتمعات الميكروبية التي تستوطن الأجزاء الهوائية للنبات، وتشمل الأوراق والسيقان والأزهار والثمار. وتُعد الأوراق من أبرز مكونات هذه البيئة، نظراً لاتساع مساحتها وتعرضها المباشر للعوامل الجوية، مثل أشعة الشمس ودرجات الحرارة والرطوبة والجفاف.

وتختلف المجتمعات الميكروبية في الفيلوسفير عن تلك الموجودة في منطقة الجذور؛ إذ تواجه ظروفاً بيئية أكثر تقلباً، الأمر الذي يفرض ضغوطاً انتقائية على الكائنات القادرة على الاستقرار والنمو فوق الأسطح النباتية. وقد تسهم هذه المجتمعات في الحد من استقرار بعض مسببات الأمراض، وتنظيم التفاعلات المرتبطة بصحة الأوراق، إلا أن كفاءتها تتأثر بالتغيرات المناخية والخصائص السطحية للنبات ومرحلة نموه (Sohrabi et al., 2023).

المطلب الرابع: ميكروبيوم البذور ومنطقة الإنبات (السيرموسفير)

يمثل ميكروبيوم البذور (Seed Microbiome) مجموعة الكائنات الدقيقة المرتبطة بسطح البذرة أو الموجودة داخل أنسجتها، بينما يشير مصطلح السيرموسفير (Spermosphere) إلى المنطقة المحيطة بالبذرة أثناء الإنبات والمتأثرة بالإفرازات الناتجة عنها. وتكتسب هذه المنطقة أهمية خاصة لأنها تمثل إحدى المراحل الأولى لتفاعل النبات مع الكائنات الدقيقة خلال دورة حياته.

وقد تسهم الميكروبات المرتبطة بالبذور في تحسين حيوية البذور، والتأثير في عملية الإنبات ونمو البادرات، فضلاً عن إمكانية انتقال بعض الكائنات الدقيقة من النبات الأم إلى الجيل التالي. ومع ذلك، لا تكون جميع الميكروبات المرتبطة بالبذور نافعة؛ إذ قد تضم أيضاً كائنات ممرضة أو عابرة، كما أن مدى استمرار انتقال المجتمعات الميكروبية ووظائفها يختلف باختلاف نوع النبات والظروف البيئية (Kumar et al., 2024).

المبحث الثالث: آليات التفاعل والوظائف الحيوية للميكروبيوم النباتي

تتحدد أهمية الميكروبيوم النباتي من خلال طبيعة التفاعلات التي تنشأ بين الكائنات الدقيقة والنبات، إذ لا يقتصر دور هذه الكائنات على الوجود داخل البيئات النباتية أو حولها، بل يمتد إلى التأثير في العمليات الحيوية والفسيولوجية للنبات. وتتباين هذه التفاعلات بين علاقات تكافلية وتبادلية وتنافسية، وتخضع لمجموعة من الآليات الكيميائية والحيوية التي تنظم استقرار المجتمعات الميكروبية وتأثيرها في صحة النبات ونموه.

المطلب الأول: التفاعلات الكيميائية والإشارات الجزيئية بين النبات والكائنات الدقيقة

تعتمد العلاقة بين النبات والكائنات الدقيقة على تبادل إشارات كيميائية تسهم في تنظيم عمليات التعرف والتواصل والاستيطان. وتؤدي الإفرازات النباتية، ولا سيما إفرازات الجذور، دوراً مهماً في جذب مجموعات ميكروبية معينة أو التأثير في نشاطها، من خلال مركبات عضوية متنوعة مثل السكريات والأحماض الأمينية والفلافونويدات (Jamil et al., 2022).

وفي المقابل، تنتج الكائنات الدقيقة مركبات وإشارات جزيئية يمكن أن تؤثر في استجابات النبات، بما في ذلك تنظيم النمو وتنشيط بعض مسارات الدفاع. وتوضح هذه العلاقات أن تكوين الميكروبيوم ليس عملية عشوائية بالكامل، بل يتأثر بقدرة النبات على انتقاء شركائه الميكروبيين، وبقدرة هذه الكائنات على التكيف مع الإشارات الصادرة عنه (Li et al., 2023).

المطلب الثاني: التفاعلات التكافلية والتبادلية

تتمثل التفاعلات التكافلية في العلاقات التي تحقق منافع متبادلة للنبات والكائنات الدقيقة، ومن أبرز أمثلتها العلاقة بين النباتات والبكتيريا المثبتة للنيتروجين، وكذلك العلاقة بين الجذور والفطريات الجذرية التكافلية. ففي هذه العلاقات يحصل النبات على عناصر غذائية أو موارد يصعب عليه الحصول عليها بكفاءة منفرداً، بينما تحصل الكائنات الدقيقة على مركبات كربونية ومصادر للطاقة يوفرها النبات.

ولا تقتصر أهمية هذه العلاقات على التغذية، بل قد تمتد إلى تحسين نمو الجذور، وزيادة قدرة النبات على الاستفادة من الموارد المتاحة، وتعزيز التكيف مع بعض الظروف البيئية. ومع ذلك، فإن درجة المنفعة المتبادلة تتأثر بنوع النبات والكائن الدقيق والظروف المحيطة، ولذلك لا يمكن تعميم نتائج علاقة تكافلية معينة على جميع المحاصيل والبيئات (Shi et al., 2024).

المطلب الثالث: التفاعلات التنافسية وتنظيم المجتمعات الميكروبية

تنشأ التفاعلات التنافسية عندما تتزاحم الكائنات الدقيقة على الموارد والمساحات المتاحة للاستيطان، وقد تشمل المنافسة على العناصر الغذائية ومواقع الالتصاق والإفرازات النباتية. وتؤثر هذه المنافسة في تركيب المجتمع الميكروبي، إذ قد تؤدي إلى زيادة انتشار مجموعات معينة وتراجع مجموعات أخرى.

كما يمكن لبعض الكائنات الدقيقة أن تحد من نمو مسببات الأمراض من خلال المنافسة على الغذاء ومواقع الاستيطان، أو عبر إنتاج مركبات تثبط نموها. وتُعد هذه الآليات من الأسس العلمية التي تفسر إمكانية استخدام بعض الميكروبات في المكافحة الحيوية، غير أن نجاحها يرتبط بقدرتها على الاستقرار والتفاعل مع المجتمع الميكروبي الموجود مسبقاً في النبات وبيئته. ((Shi et al., 2024

المطلب الرابع: التأثير في الاستجابات الفسيولوجية والدفاعية للنبات

تستطيع بعض الكائنات الدقيقة التأثير في العمليات الفسيولوجية للنبات من خلال إنتاج أو تنظيم مركبات مرتبطة بالنمو، مثل الهرمونات النباتية أو المركبات المؤثرة في توازنها. وقد ينعكس ذلك على نمو الجذور وتفرعها، وكفاءة امتصاص العناصر الغذائية، وتنظيم بعض العمليات المرتبطة بتطور النبات.

ومن ناحية أخرى، يمكن لبعض الميكروبات النافعة أن تسهم في تنشيط آليات الدفاع النباتي، بما يزيد قدرة النبات على الاستجابة لمسببات الأمراض وبعض أشكال الإجهاد البيئي. وتُعرف بعض هذه الاستجابات بالمقاومة الجهازية المستحثة، حيث يؤدي وجود كائنات دقيقة معينة إلى تهيئة دفاعات النبات وتعزيز استجابته عند التعرض لاحقاً لمسبب مرضي. ومع ذلك، تختلف درجة هذه الاستجابة باختلاف التوافق بين النبات والميكروب وطبيعة الظروف البيئية (Yu et al., 2022).

المطلب الخامس: دور الميكروبيوم في تحسين التغذية المعدنية للنبات

تسهم بعض الكائنات الدقيقة المرتبطة بالنبات في تحسين كفاءة حصوله على العناصر المعدنية من خلال مجموعة من العمليات الحيوية، يأتي في مقدمتها تثبيت النيتروجين الجوي وتحويله إلى صور يمكن للنبات الاستفادة منها، فضلًا عن إذابة بعض المركبات الفوسفاتية غير الميسرة وزيادة إتاحتها في التربة. كما تؤدي بعض الميكروبات دورًا في إنتاج الأحماض العضوية والمركبات المخلبية التي تساعد على تحرير العناصر الغذائية وتحسين امتصاصها. ومع ذلك، تختلف كفاءة هذه العمليات باختلاف السلالة الميكروبية وخصائص التربة والنبات والظروف البيئية، وهو ما يجعل أثر الميكروبيوم في التغذية المعدنية مرتبطًا بطبيعة النظام الزراعي وليس بوجود الميكروبات وحده.(Timofeeva et al., 2023; Pang et al., 2024)

المطلب السادس: دور الميكروبيوم في تنظيم نمو النبات

تؤثر الكائنات الدقيقة المرتبطة بالنبات في عمليات النمو والتطور من خلال إنتاج بعض منظمات النمو النباتية أو التأثير في توازنها داخل الأنسجة النباتية. وتشمل هذه المركبات الأوكسينات والسيتوكينينات والجبريلينات، التي ترتبط بتنظيم نمو الجذور وتطور الأجزاء النباتية وانقسام الخلايا واستطالتها. كما يمكن لبعض الميكروبات التأثير في نمو النبات بصورة غير مباشرة من خلال تحسين التغذية المعدنية وتعديل استجابة النبات للظروف البيئية. ولا تتخذ هذه التأثيرات اتجاهًا إيجابيًا ثابتًا في جميع الحالات، إذ تعتمد على نوع الكائن الدقيق وتركيزه وطبيعة التفاعل مع النبات العائل.(Ehinmitan et al., 2024)

المطلب السابع: دور الميكروبيوم في مقاومة الإجهادات الحيوية وغير الحيوية

يؤدي الميكروبيوم النباتي دورًا مهمًا في التأثير في قدرة النبات على مواجهة الإجهادات الحيوية وغير الحيوية، إذ تسهم بعض الكائنات الدقيقة في الحد من تأثير مسببات الأمراض من خلال المنافسة على الموارد ومواقع الاستيطان

وإنتاج المركبات المضادة لها، كما يمكن أن تنشط بعض آليات الدفاع النباتي. وفي مواجهة الإجهادات غير الحيوية، مثل الجفاف والملوحة وارتفاع درجات الحرارة، قد تساعد بعض المجتمعات الميكروبية على تنظيم التوازن الهرموني وتحسين كفاءة امتصاص المياه والعناصر الغذائية. غير أن هذه التأثيرات ليست متساوية بين النباتات والبيئات، كما أن نجاحها يرتبط بقدرة الميكروبات على الاستقرار والمحافظة على وظائفها في ظل الظروف الضاغطة. (Biswas et al., 2024; Muhammad et al., 2024)

المبحث الرابع: التقنيات الحديثة وتطبيقات الميكروبيوم في الإنتاج الزراعي المستدام

أدى التقدم في التقنيات الحيوية والجزيئية إلى تطوير أساليب دراسة الميكروبيوم النباتي، فلم تعد البحوث تقتصر على تحديد أنواع الكائنات الدقيقة، بل امتدت إلى تحليل قدراتها الوظيفية وفهم العلاقات داخل المجتمعات الميكروبية. وقد أسهم هذا التطور في ظهور تطبيقات زراعية تعتمد على توظيف الكائنات الدقيقة ومجتمعاتها في تطوير نظم إنتاج أكثر كفاءة واستدامة.

المطلب الأول: التقنيات الجزيئية وتحليل البيانات الميكروبية

أتاحت تقنيات تسلسل الحمض النووي عالي الإنتاجية إمكانية التعرف على المجتمعات الميكروبية المرتبطة بالنبات، بما في ذلك الكائنات التي يصعب عزلها وتنميتها بالطرق التقليدية. وتُستخدم تقنيات تحليل الجينات الدالة، مثل 16 S rRNA للبكتيريا و ITS للفطريات، لتحديد التركيب التصنيفي للمجتمعات الميكروبية، بينما تسمح تقنية الميتاجينومكس Metagenomics بتحليل المادة الوراثية للمجتمع الميكروبي والكشف عن إمكاناته الوظيفية.

كما أسهمت تقنيات الأوميكس المتكاملة، ومنها الميتاترنسكريبتومكس والميتابروتيومكس والميتابولومكس، في توسيع نطاق التحليل من تحديد الكائنات والجينات إلى دراسة التعبير الجيني والبروتينات والمركبات الأيضية الناتجة عن النشاط الحيوي. ويتيح دمج هذه البيانات تكوين صورة أكثر شمولاً عن وظائف الميكروبيوم، وإن كانت دقة تفسيرها تتطلب توحيد إجراءات جمع العينات والتحليل والمعالجة المعلوماتية (Jain et al., 2024).

المطلب الثاني: هندسة المجتمعات الميكروبية وتطوير المستحضرات الحيوية

انتقلت البحوث الحديثة من الاعتماد على سلالات ميكروبية منفردة إلى دراسة إمكانية تصميم مجتمعات ميكروبية اصطناعية Synthetic Microbial Communities، تتكون من كائنات دقيقة مختارة وفق وظائف متكاملة وقدرتها على التعايش والاستقرار.

ويقوم هذا الاتجاه على انتقاء السلالات ذات الخصائص المرغوبة، ودراسة التوافق بينها، ثم اختبار قدرتها على أداء وظائف مشتركة في البيئة النباتية. كما يتطلب تطوير مستحضرات حيوية مناسبة من حيث التركيب والحفظ والتوصيل إلى النبات، بما يضمن استمرار نشاط الكائنات الدقيقة بعد استخدامها.

وتكمن أهمية هذا التوجه في محاولة الانتقال من الاستخدام العشوائي للميكروبات إلى تصميم مجتمعات محددة الوظائف، إلا أن نجاحها يرتبط بقدرتها على الاستقرار والتفاعل مع المجتمعات الطبيعية الموجودة مسبقاً في البيئة الزراعية (Northen et al., 2024).

المطلب الثالث: التطبيقات الزراعية للمنتجات القائمة على الميكروبيوم

تتعدد التطبيقات الزراعية المرتبطة بالميكروبيوم النباتي، ويمكن تصنيفها وفق طبيعة المنتج والوظيفة المستهدفة إلى ثلاثة اتجاهات رئيسية:

- الأسمدة الحيوية: تعتمد على كائنات دقيقة تسهم في تحسين إتاحة العناصر الغذائية أو تثبيت النيتروجين، بما يدعم كفاءة تغذية النبات.
- المحفزات الحيوية الميكروبية: تستخدم كائنات دقيقة أو نواتجها الحيوية لتحسين بعض العمليات المرتبطة بالنمو والاستفادة من الموارد.
- المبيدات الحيوية: تعتمد على كائنات دقيقة أو منتجاتها في الحد من مسببات الأمراض، ضمن برامج الإدارة المتكاملة للآفات والأمراض.

وتبرز أهمية هذه التطبيقات في إمكانية دمجها ضمن نظم الإدارة الزراعية لتقليل الاعتماد المفرط على بعض المدخلات الكيميائية وتحسين كفاءة استخدام الموارد. ومع ذلك، لا ينبغي النظر إليها باعتبارها بديلاً مطلقاً عن الأسمدة والمبيدات التقليدية، بل أدوات مساندة تتحدد فعاليتها وفق نوع المحصول والبيئة الزراعية وطبيعة المستحضر المستخدم (Alzate Zuluaga et al., 2024؛ Khan et al., 2023).

المطلب الرابع: متطلبات توظيف التقنيات والتطبيقات الميكروبية في الزراعة المستدامة

يتطلب توظيف الميكروبيوم النباتي في الإنتاج الزراعي تجاوز مرحلة إثبات الخصائص الحيوية للكائنات الدقيقة إلى تطوير تطبيقات قابلة للاستخدام الزراعي. ويشمل ذلك تحديد السلالات المناسبة للمحاصيل والبيئات المستهدفة، وتقييم توافقها مع المجتمعات الميكروبية الطبيعية، وضمان جودة المستحضرات الحيوية وثباتها أثناء التخزين والاستخدام.

كما يتطلب الأمر ربط التقنيات الحديثة بالاحتياجات الفعلية للنظم الزراعية، بحيث لا يكون الهدف مجرد تطوير مستحضر ميكروبي جديد، وإنما التحقق من قدرته على تقديم منفعة زراعية قابلة للتكرار والتقييم. ومن ثم، فإن القيمة التطبيقية للميكروبيوم تتحدد بمدى نجاح دمج المعرفة الجزيئية والبيئية والتقنية في منظومة إنتاج متكاملة (Hanif et al., 2024).

المبحث الخامس: التحديات العلمية والتطبيقية والاتجاهات المستقبلية للميكروبيوم النباتي

على الرغم من التطور المتسارع في دراسة الميكروبيوم النباتي، فإن تحويل المعرفة العلمية إلى تطبيقات زراعية موثوقة لا يزال يواجه تحديات تتعلق بتعقيد المجتمعات الميكروبية، وتباين استجابتها للظروف البيئية، وصعوبة التنبؤ بسلوكها في النظم الزراعية الطبيعية. ولا تقتصر هذه التحديات على الجوانب التقنية، بل تمتد إلى القضايا البيئية والمنهجية والاقتصادية التي تؤثر في إمكانية توظيف الميكروبيوم على نطاق زراعي واسع.

المطلب الأول: التحديات المنهجية والمعرفية في دراسة الميكروبيوم النباتي

تواجه دراسة الميكروبيوم النباتي تحديات منهجية ترتبط بتعدد الكائنات الدقيقة واختلاف خصائصها ووظائفها، فضلاً عن صعوبة الكشف عن بعض المجموعات الميكروبية منخفضة الوفرة أو التي لم تحظَ بالقدر الكافي من

الدراسة. كما أن الاعتماد على التحليل التصنيفي وحده لا يوفر فهماً كاملاً للوظائف التي تؤديها الكائنات الدقيقة، إذ قد تختلف الوظائف بين سلالات تنتمي إلى النوع نفسه.

وتظهر مشكلة أخرى في اختلاف طرق جمع العينات وتحليلها ومعالجة بياناتها، الأمر الذي قد يؤدي إلى تفاوت النتائج وصعوبة المقارنة بين الدراسات. ومن ثم، تتطلب البحوث المستقبلية تطوير بروتوكولات موحدة، وتعزيز التكامل بين التحليل الجزيئي والوظيفي، والاهتمام بالمجموعات الميكروبية التي لا تزال أقل تمثيلاً في الدراسات النباتية (Poupin & González, 2024).

المطلب الثاني: التحديات البيئية والتغيرات المناخية المؤثرة في استقرار الميكروبيوم

يتأثر تركيب الميكروبيوم النباتي بالظروف البيئية المتغيرة، مثل ارتفاع درجات الحرارة وتغير أنماط الأمطار وتكرار فترات الجفاف، إضافة إلى خصائص التربة وتوافر المياه والعناصر الغذائية. وقد تؤدي هذه التغيرات إلى إعادة تشكيل المجتمعات الميكروبية وتغيير العلاقات الوظيفية داخلها، بما ينعكس على استقرار ارتباطها بالنبات.

وتزداد أهمية هذه المسألة في ظل التغير المناخي، إذ لا تقتصر آثاره على النبات بصورة مباشرة، بل تمتد إلى الكائنات الدقيقة المرتبطة به، وقد تؤثر في قدرة بعض المجتمعات الميكروبية على المحافظة على وظائفها تحت الظروف الجديدة. ويرى Zeng et al. (2025) أن فهم استجابة الميكروبيوم للعوامل المناخية المختلفة يمثل مجالاً بحثياً مهماً، خاصة فيما يتعلق بتأثير الاحترار والجفاف وارتفاع تركيز ثاني أكسيد الكربون في تكوين المجتمعات الميكروبية وتكيف النبات.

ولا ينبغي تقييم المنتجات القائمة على الميكروبيوم من خلال وظائفها الحيوية المعلنة فقط، بل من خلال قدرتها على تحقيق منفعة زراعية قابلة للقياس والتكرار. فالأثر الإيجابي لبعض الأسمدة الحيوية أو المحفزات الميكروبية قد يتراجع عند اختلاف نوع المحصول أو خصائص التربة أو الظروف المناخية، كما أن استخدامها لا يؤدي بالضرورة إلى الاستغناء الكامل عن الأسمدة والمبيدات التقليدية. وتكشف هذه المسألة عن ضرورة التمييز بين الإمكانات البيولوجية للكائنات الدقيقة وبين كفاءتها الزراعية الفعلية؛ إذ قد يمتلك الميكروب خصائص واعدة في المختبر، دون أن يحقق الأثر الاقتصادي أو الإنتاجي المتوقع في الحقل. لذلك، ينبغي النظر إلى التطبيقات الميكروبية بوصفها أدوات مكملة للإدارة الزراعية المتكاملة، لا حلولًا موحدة قابلة للتطبيق في جميع النظم الزراعية (Alzate Zuluaga et al., 2024; Khan et al., 2023).

المطلب الثالث: القيود التطبيقية والاقتصادية والتنظيمية

تتمثل إحدى المشكلات الأساسية في صعوبة ضمان انتقال النتائج البحثية إلى تطبيقات زراعية قابلة للاستخدام الواسع؛ فنجاح أحد المستحضرات الميكروبية في ظروف تجريبية محددة لا يعني بالضرورة نجاحه في بيئات زراعية مختلفة. كما تتطلب التطبيقات التجارية المحافظة على حيوية الكائنات الدقيقة أثناء التصنيع والتخزين والنقل، وضمان ثبات جودة المنتج وكفاءته عند الاستخدام.

وتشمل القيود الأخرى ارتفاع تكاليف بعض تقنيات التحليل والتطوير، والحاجة إلى معايير واضحة لتقييم سلامة المستحضرات الميكروبية وآثارها البيئية، فضلاً عن ضرورة مراعاة المتطلبات التنظيمية ومدى قبول المزارعين لهذه المنتجات. ويشير (Vompe et al;.2026) إلى أن توسيع استخدام الميكروبيوم في الزراعة يتطلب تعزيز الدراسات الحقلية طويلة الأمد، وتطوير أساليب تشخيص وإدارة تراعي اختلاف النظم الزراعية والظروف البيئية.

ومن الناحية النقدية، تكشف القيود التطبيقية عن أن نجاح الميكروبيوم لا يتحدد بالخصائص البيولوجية للكائنات الدقيقة وحدها، بل يرتبط أيضًا بقدرة المنظومة الزراعية على استيعاب هذه التطبيقات. فارتفاع تكاليف تطوير المستحضرات الميكروبية وضمان جودتها، وصعوبة المحافظة على حيويتها أثناء التخزين والنقل، وتفاوت استجابتها بين البيئات الزراعية، قد تحد من انتشارها حتى عندما تثبت بعض الدراسات فعاليتها. كما أن غياب معايير موحدة لتقييم الأداء والسلامة البيئية يصعّب المقارنة بين المنتجات وتحديد مدى جدواها. لذلك، فإن الانتقال إلى الاستخدام الواسع يتطلب الجمع بين الإثبات العلمي للكفاءة، والتقييم الاقتصادي، وضمان السلامة البيئية، وتحديد الظروف التي تكون فيها التطبيقات الميكروبية أكثر ملاءمة (Copeland et al., 2025; Vompe et al., 2026).

المطلب الرابع: الاتجاهات البحثية المستقبلية وآفاق تطوير الميكروبيوم النباتي

تتجه البحوث المستقبلية إلى تجاوز دراسة الميكروبيوم بوصفه مجموعة من الكائنات الدقيقة، نحو التعامل معه باعتباره منظومة حيوية متكاملة يمكن فهم خصائصها والتنبؤ باستجابتها وتوجيه بعض وظائفها. ويبرز في هذا السياق عدد من الاتجاهات البحثية:

- تطوير المجتمعات الميكروبية المصممة: من خلال اختيار مجموعات ميكروبية متوافقة تؤدي وظائف متكاملة وتتمتع بقدرة مناسبة على الاستقرار.
- تعزيز التكامل بين التقنيات الحيوية والمعلوماتية: للاستفادة من البيانات الجزيئية والوظيفية في بناء نماذج أكثر دقة لفهم المجتمعات الميكروبية.
- توسيع البحوث المرتبطة بالتغير المناخي: لفهم استجابة الميكروبيوم للجفاف والحرارة وتغير أنماط الأمطار، وتحديد إمكانات الاستفادة منه في تعزيز التكيف الزراعي.
- تطوير التطبيقات الزراعية الموجهة: من خلال ربط اختيار الكائنات الدقيقة بنوع المحصول وخصائص التربة والظروف البيئية السائدة.
- تعزيز الدراسات الحقلية طويلة الأمد: للتحقق من استقرار التطبيقات الميكروبية وفاعليتها وتقييم آثارها البيئية والاقتصادية.

وتشير هذه الاتجاهات إلى أن مستقبل الميكروبيوم النباتي يرتبط بتطوير حلول علمية تراعي التباين البيئي والوراثي للمحاصيل، وتجمع بين فهم المجتمعات الميكروبية وإمكانية توظيفها ضمن نظم إنتاج زراعي أكثر قدرة على التكيف والاستدامة. (Zeng et al., 2025؛ Vompe et al., 2026).

وبناءً على ما سبق، فإن مستقبل البحث في الميكروبيوم النباتي لا يرتبط بمجرد اكتشاف أنواع جديدة من الكائنات الدقيقة أو تطوير مستحضرات حيوية متعددة، بل يتطلب معالجة الفجوة بين المعرفة الجزيئية والأداء الزراعي الفعلي. ويستدعي ذلك توجيه البحوث نحو تحديد الوظائف الميكروبية المؤكدة، وفهم التفاعلات بين مكونات المجتمعات الميكروبية، وتقييم استقرارها في البيئات الزراعية المختلفة. كما تبرز أهمية تطوير تطبيقات متخصصة تراعي الاختلافات بين المحاصيل والتربة والظروف المناخية، مع عدم افتراض وجود تركيبة ميكروبية واحدة تصلح لجميع النظم الزراعية. ومن ثم، فإن الاتجاه الأكثر أهمية يتمثل في الانتقال من توظيف الميكروبات على أساس خصائصها الفردية إلى إدارة مجتمعات ميكروبية متكاملة، يتم تقييمها وفق كفاءتها الزراعية واستقرارها وسلامتها البيئية وجدواها الاقتصادية.

قراءة تحليلية نقدية للتطورات والتطبيقات الحديثة للميكروبيوم النباتي

يتضح من تحليل التطورات العلمية والتطبيقات الزراعية أن الميكروبيوم النباتي يمتلك إمكانات واعدة في دعم استدامة الإنتاج الزراعي، إلا أن تحويل هذه الإمكانات إلى نتائج زراعية مستقرة لا يزال مرتبطًا بمجموعة من الشروط العلمية والبيئية والتقنية. فالتنوع الميكروبي ووظائف الكائنات الدقيقة يتأثران بخصائص التربة ورطوبتها ودرجة حرارتها وتوافر العناصر الغذائية، الأمر الذي يجعل كفاءة الميكروبات مرتبطة بطبيعة البيئة التي تعيش فيها، ولا يسمح بتعميم نتائج تطبيق معين على مختلف النظم الزراعية (جميل، د.ت؛ الشرابي، 2002).

كما أن امتلاك بعض الكائنات الدقيقة خصائص محفزة لنمو النبات لا يعني بالضرورة تحقق التأثير نفسه في جميع الظروف؛ إذ أظهرت دراسة بن محمود وفرجاني (2018) أن أعداد بكتيريا Azotobacter في الأراضي الزراعية بمنطقة طرابلس تتأثر بدرجة حموضة التربة وبعض خصائصها الكيميائية، وهو ما يبرز أهمية الظروف المحلية في تحديد كفاءة المجتمعات الميكروبية. ويؤكد ذلك أن نجاح التطبيقات الميكروبية لا يتوقف على اختيار الكائن الدقيق ذي الخصائص المرغوبة فحسب، بل يرتبط أيضاً بمدى توافقه مع خصائص التربة والنبات والظروف البيئية المحيطة.

ومن جانب آخر، فإن التوسع في استخدام المستحضرات الحيوية والمجتمعات الميكروبية المصممة لا ينبغي أن يُفهم باعتباره بديلاً شاملاً للمدخلات الزراعية التقليدية؛ إذ يتطلب توظيفها ضمان حيوية الكائنات الدقيقة واستقرارها أثناء التخزين والنقل والاستخدام، فضلاً عن التحقق من قدرتها على الاستمرار وأداء وظائفها بعد إضافتها إلى البيئة الزراعية (الشرابي، 2002؛ بن محمود وفرجاني، 2018).

وبناءً على ذلك، تكشف الدراسة عن فجوة بين الإمكانات البيولوجية للميكروبيوم النباتي وبين قدرته على تقديم نتائج زراعية مستقرة وقابلة للتكرار في ظروف الاستخدام الفعلي. ولا تعني هذه الفجوة محدودية أهمية الميكروبيوم، بل تعكس تعقيد العلاقات المتبادلة بين النبات والكائنات الدقيقة والبيئة المحيطة. ومن ثم، فإن القيمة الحقيقية للميكروبيوم لا تكمن في اعتباره حلًا مستقلًا لمشكلات الإنتاج الزراعي، وإنما في إمكانية دمجه ضمن منظومة الإدارة الزراعية المتكاملة، وفقًا لخصائص المحصول والتربة والظروف المناخية، وبما يحقق التوازن بين الكفاءة الإنتاجية والاستدامة البيئية.

نتائج البحث

في ضوء التحليل النظري والنقدي للأدبيات العلمية المتعلقة بالميكروبيوم النباتي، توصلت الدراسة إلى مجموعة من النتائج، يمكن عرضها فيما يأتي:

1. أظهر التحليل أن مفهوم الميكروبيوم النباتي تجاوز حصر الكائنات الدقيقة إلى دراسة وظائفها وتفاعلاتها ضمن منظومة بيئية متكاملة.
2. تتوزع المجتمعات الميكروبية في مناطق نباتية متعددة، ويؤدي اختلاف خصائص هذه المناطق إلى تباين تركيبها ووظائفها.
3. تتسم التفاعلات بين النبات والكائنات الدقيقة بالتعقيد؛ إذ تتداخل العلاقات التكافلية والتنافسية وتتغير باختلاف النبات والبيئة.

4. يسهم بعض مكونات الميكروبيوم في تحسين التغذية المعدنية وتنظيم النمو وتنشيط الدفاعات النباتية، لكن هذه الوظائف ليست ثابتة في جميع الظروف.
5. أتاحت التقنيات الجزيئية وتقنيات الأوميكس فهماً أوسع للتركيب والوظائف الميكروبية، إلا أن تفسير النتائج يتطلب الجمع بين البيانات التصنيفية والوظيفية.
6. تتمثل إحدى أبرز العقبات في الفجوة بين النتائج المختبرية والأداء الحقلي، بسبب اختلاف الظروف البيئية وصعوبة ضمان استقرار المجتمعات الميكروبية.
7. يرتبط إسهام الميكروبيوم في استدامة الإنتاج بتطوير تطبيقات موجهة ومختبرة، ودمجها ضمن الإدارة الزراعية المتكاملة بدلاً من التعامل معها بوصفها حلولاً موحدة أو بدائل مطلقة.

ملاحظة منهجية: هذه النتائج استنتاجات تحليلية مستخلصة من مراجعة الأدبيات، وليست نتائج تجارب أو قياسات ميدانية أجرتها الدراسة.

التوصيات

في ضوء النتائج التي توصلت إليها الدراسة، يمكن تقديم التوصيات الآتية لتعزيز الاستفادة من الميكروبيوم النباتي في تطوير الإنتاج الزراعي المستدام:

1. تعزيز البحث العلمي في تنوع المجتمعات الميكروبية ووظائفها وعلاقاتها بالنباتات الزراعية، مع مراعاة الاختلافات البيئية والمناخية بين المناطق.
2. تطوير تطبيقات حيوية موجهة للمحاصيل والبيئات المستهدفة، واختيار السلالات والتجمعات القادرة على التكيف مع خصائص التربة والظروف المناخية المختلفة.
3. تحسين جودة الأسمدة الحيوية والملقحات الميكروبية من خلال ضبط معايير الإنتاج والحفظ والتخزين وضمان الحيوية، وتقييم الكفاءة قبل التوسع في استخدامها.
4. دمج التطبيقات الميكروبية في الإدارة الزراعية المتكاملة بوصفها أدوات مساندة لبرامج التسميد والري ومكافحة الآفات وإدارة التربة.
5. توسيع استخدام تقنيات التسلسل الجيني والتحليلات متعددة الأوميكس، وتعزيز التعاون بين علوم النبات والأحياء الدقيقة والتربة والتقنيات الحيوية.
6. تطوير معايير لتقييم السلامة الحيوية والأثر البيئي والجدوى الاقتصادية، ودعم الدراسات الحقلية طويلة الأمد للتحقق من استقرار المنتجات وفاعليتها قبل اعتمادها تجارياً.

خاتمة البحث

خلصت الدراسة إلى أن الميكروبيوم النباتي يمثل أحد الاتجاهات العلمية الواعدة في تطوير الإنتاج الزراعي المستدام، لما تؤديه المجتمعات الميكروبية من أدوار في تحسين تغذية النبات، وتعزيز نموه، وزيادة قدرته على مواجهة الظروف البيئية غير الملائمة. كما أسهمت التقنيات الجزيئية والحيوية الحديثة في توسيع فهم هذه المجتمعات وإمكانات توظيفها زراعيًا.

ومع ذلك، فإن الاستفادة من هذه الإمكانات لا تزال مرتبطة بتجاوز تحديات علمية وبيئية، أبرزها تعقيد التفاعلات الميكروبية واختلاف استجابتها باختلاف النباتات والبيئات الزراعية. وبناءً على ذلك، فإن توظيف الميكروبيوم النباتي يتطلب مواصلة البحث العلمي وتطوير تطبيقات حيوية ملائمة للظروف الزراعية المختلفة، بما يدعم الانتقال نحو نظم إنتاج أكثر كفاءة واستدامة.

المراجع

1. بن محمود، ميرفت طاهر، وفرجاني، إيمان علي. (2018). دراسة مدى تأثير حموضة التربة pH على مستعمرات بكتيريا Azotobacter باستخدام الخصائص الميكروبيولوجية كمقياس حيوي في الأراضي الزراعية بمنطقة طرابلس شمال غرب ليبيا. مجلة المختار للعلوم، 33(2)، 139–148.
2. جميل، زهراء جعفر. (د.ت). علم الأحياء المجهرية في التربة والمياه. محاضرات علمية، كلية العلوم، جامعة ديالى، العراق.
3. الشرابي، نجم الدين. (2002). التربة (الأحياء الدقيقة في). الموسوعة العربية، المجلد السادس، دمشق، ص 254.
4. Alzate Zuluaga, M. Y., Fattorini, R., Cesco, S., & Pii, Y. (2024). Plant-microbe interactions in the rhizosphere for smarter and more sustainable crop fertilization: The case of PGPR-based biofertilizers. Frontiers in Microbiology, 15, 1440978.
5. Berg, G., & Cernava, T. (2022). The plant microbiota signature of the Anthropocene as a challenge for microbiome research. Microbiome, 10, 54.
6. Biswas, D., Chakraborty, A. K., Srivastava, V., & Mandal, A. (2024). Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR): Reports on Their Colonization, Beneficial Activities, and Use as Bioinoculant. Advances in Agriculture, 2024, Article ID 8173024.
7. Compant, S., Cassan, F., Kostić, T., Johnson, L., Brader, G., Trognitz, F., & Sessitsch, A. (2025). Harnessing the plant microbiome for sustainable crop production. Nature Reviews Microbiology, 23, 9–23.
8. Copeland, C., Schulze-Lefert, P., & Ma, K. W. (2025). Potential and challenges for application of microbiomes in agriculture. The Plant Cell, 37(8), koaf185.
9. Dubey, A., Malla, M. A., Vimal, S. R., Kumar, A., Prasad, S. M., & Khan, M. L. (2025). Plant-microbiome engineering: Synergistic microbial partners for crop health and sustainability. Plant Growth Regulation, 105, 1825–1839.
10. Ehinmitan, E., Losenge, T., Mamati, E., Ngumi, V., Juma, P., & Siamalube, B. (2024). BioSolutions for Green Agriculture: Unveiling the Diverse Roles of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria. International Journal of Microbiology, 2024, Article ID 6181491.
11. Fadiji, A. E., Adeniji, A., Lanrewaju, A. A., Adedayo, A. A., Chukwuneme, C. F., Nwachukwu, B. C., Aderibigbe, J., & Omomowo, I. O. (2025). Key challenges in plant microbiome research in the next decade. Microorganisms, 13(11), 2546.
12. Fitzpatrick, C. R., Salas-González, I., Conway, J. M., Finkel, O. M., Gilbert, S., Russ, D., et al. (2020). The plant microbiome: From ecology to reductionism and beyond. Annual Review of Microbiology, 74, 81–100.

13. Gupta, R., Anand, G., Gaur, R., & Yadav, D. (2021). Plant-microbiome interactions for sustainable agriculture: A review. Physiology and Molecular Biology of Plants, 27(1), 165–179
14. Hanif, M. S., Tayyab, M., Baillo, E. H., Islam, M. M., Islam, W., & Li, X. (2024). Plant microbiome technology for sustainable agriculture. Frontiers in Microbiology, 15, 1500260.
15. Jain, A., Sarsaiya, S., Singh, R., Gong, Q., Wu, Q., & Shi, J. (2024). Omics approaches in understanding the benefits of plant-microbe interactions. Frontiers in Microbiology, 15, 1391059.
16. Jamil, F., Mukhtar, H., Fouillaud, M., & Dufossé, L. (2022). Rhizosphere signaling: Insights into plant–rhizomicrobiome interactions for sustainable agronomy. Microorganisms, 10(5), 899.
17. Khan, A. K., Singh, A. V., Gautam, S. S., & Agarwal, A. (2023). Microbial bioformulation: A microbial assisted biostimulating fertilization technique for sustainable agriculture. Frontiers in Plant Science, 14, 1270039.
18. Kumar, A., Solanki, M. K., Wang, Z., Solanki, A. C., Singh, V. K., & Divvela, P. K. (2024). Revealing the seed microbiome: Navigating sequencing tools, microbial assembly, and functions to amplify plant fitness. Microbiological Research, 279, 127549.
19. Lemanceau, P., Blouin, M., Muller, D., & Moënne-Loccoz, Y. (2017). Let the core microbiota be functional. Trends in Plant Science, 22(7), 583–595.
    Trivedi, P., Leach, J. E., Tringe, S. G., Sa, T., & Singh, B. K. (2020). Plant–microbiome interactions: From community assembly to plant health. Nature Reviews Microbiology, 18, 607–621.
20. Li, J. H., Aslam, M. M., Gao, Y. Y., Dai, L., Hao, G. F., Wei, Z., Chen, M. X., & Dini-Andreote, F. (2023). Microbiome-mediated signal transduction within the plant holobiont. Trends in Microbiology, 31(6), 616–628.
21. Muhammad, A., Kong, X., Zheng, S., Bai, N., Li, L., Khan, M. H. U., Fiaz, S., & Zhang, Z. (2024). Exploring plant-microbe interactions in adapting to abiotic stress under climate change: A review. Frontiers in Plant Science, 15, 1482739.
22. Nelson, E. B. (2018). The seed microbiome: Origins, interactions, and impacts. Plant and Soil, 422, 7–34.
23. Northen, T. R., Kleiner, M., Torres, M., Kovács, Á. T., Nicolaisen, M. H., Krzyżanowska, D. M., et al. (2024). Community standards and future opportunities for synthetic communities in plant–microbiota research. Nature Microbiology, 9, 2774–2784.
24. Pang, F., Li, Q., Solanki, M. K., Wang, Z., Xing, Y. X., & Dong, D. F. (2024). Soil phosphorus transformation and plant uptake driven by phosphate-solubilizing microorganisms. Frontiers in Microbiology, 15, 1383813.
25. Pantigoso, H. A., Newberger, D., & Vivanco, J. M. (2022). The rhizosphere microbiome: Plant–microbial interactions for resource acquisition. Journal of Applied Microbiology, 133(5), 2864–2876.
26. Poupin, M. J., & González, B. (2024). Embracing complexity in plant–microbiome systems. Environmental Microbiology Reports, 16(4), e70000.
27. Rabari, A., Ruparelia, J., Jha, C. K., Sayyed, R. Z., Mitra, D., Priyadarshini, A., Senapati, A., Panneerselvam, P., & Das Mohapatra, P. K. (2023). Articulating

beneficial rhizobacteria-mediated plant defenses through induced systemic resistance: A review. Pedosphere, 33(4), 556–566.

28. Santoyo, G. (2022). How plants recruit their microbiome? New insights into beneficial interactions. Journal of Advanced Research, 40, 45–58.
29. Shi, X., Zhao, Y., Xu, M., Ma, L., Adams, J. M., & Shi, Y. (2024). Insights into plant–microbe interactions in the rhizosphere to promote sustainable agriculture in the new crops era. New Crops.

    Sohrabi, R., Paasch, B. C., Liber, J. A., & He, S. Y. (2023). Phyllosphere microbiome. Annual Review of Plant Biology, 74, 539–568.
30. Timofeeva, A. M., Galyamova, M. R., & Sedykh, S. E. (2023). Plant Growth-Promoting Soil Bacteria: Nitrogen Fixation, Phosphate Solubilization, Siderophore Production, and Other Biological Activities. Plants, 12(24), 4074.
31. Trivedi, P., Batista, B. D., Bazany, K. E., & Singh, B. K. (2022). Plant–microbiome interactions under a changing world: Responses, consequences and perspectives. New Phytologist, 234(6), 1951–1959.
32. Trivedi, P., Mattupalli, C., Eversole, K., & Leach, J. E. (2021). Enabling sustainable agriculture through understanding and enhancement of microbiomes. New Phytologist, 230(6), 2129–2147.
33. Vompe, A. D., Hamidizade, M., Medina López, M., O'Connor, E., Kaur, L., Hockett, K. L., & Bull, C. T. (2026). Translational microbiomes in agriculture: Microbial communities as tools to effect host and system health for improved crop production. Applied and Environmental Microbiology.
34. Yu, Y., Gui, Y., Li, Z., Jiang, C., Guo, J., & Niu, D. (2022). Induced systemic resistance for improving plant immunity by beneficial microbes. Plants, 11(3), 386.
35. Zeng, Q., Hu, H. W., Ge, A. H., Xiong, C., Zhai, C. C., Duan, G. L., Han, L. L., Huang, S. Y., & Zhang, L. M. (2025). Plant–microbiome interactions and their impacts on plant adaptation to climate change. Journal of Integrative Plant Biology, 67(3), 826–844.