

Μοριακή Βιολογία και Γενετική Φυτών

Τμήμα Μοριακής Βιολογίας & Γενετικής

Ακ. Έτος 2025-2026



Μαργαρίτης Τσιφιντάρης, PhD

mtsifintaris@gmail.com / mtsifint@mbg.duth.gr





Journal of Advanced Research

Volume 19, September 2019, Pages 29-37



Review

A review on the plant microbiome: Ecology, functions, and emerging trends in microbial application

Stéphane Compant, Abdul Samad, Hanna Faist, Angela Sessitsch  

AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Center for Health & Bioresources, Bioresources
Unit, Konrad-Lorenz-Straße 24, 3430 Tulln, Austria

Μικροβίωμα και φυτά

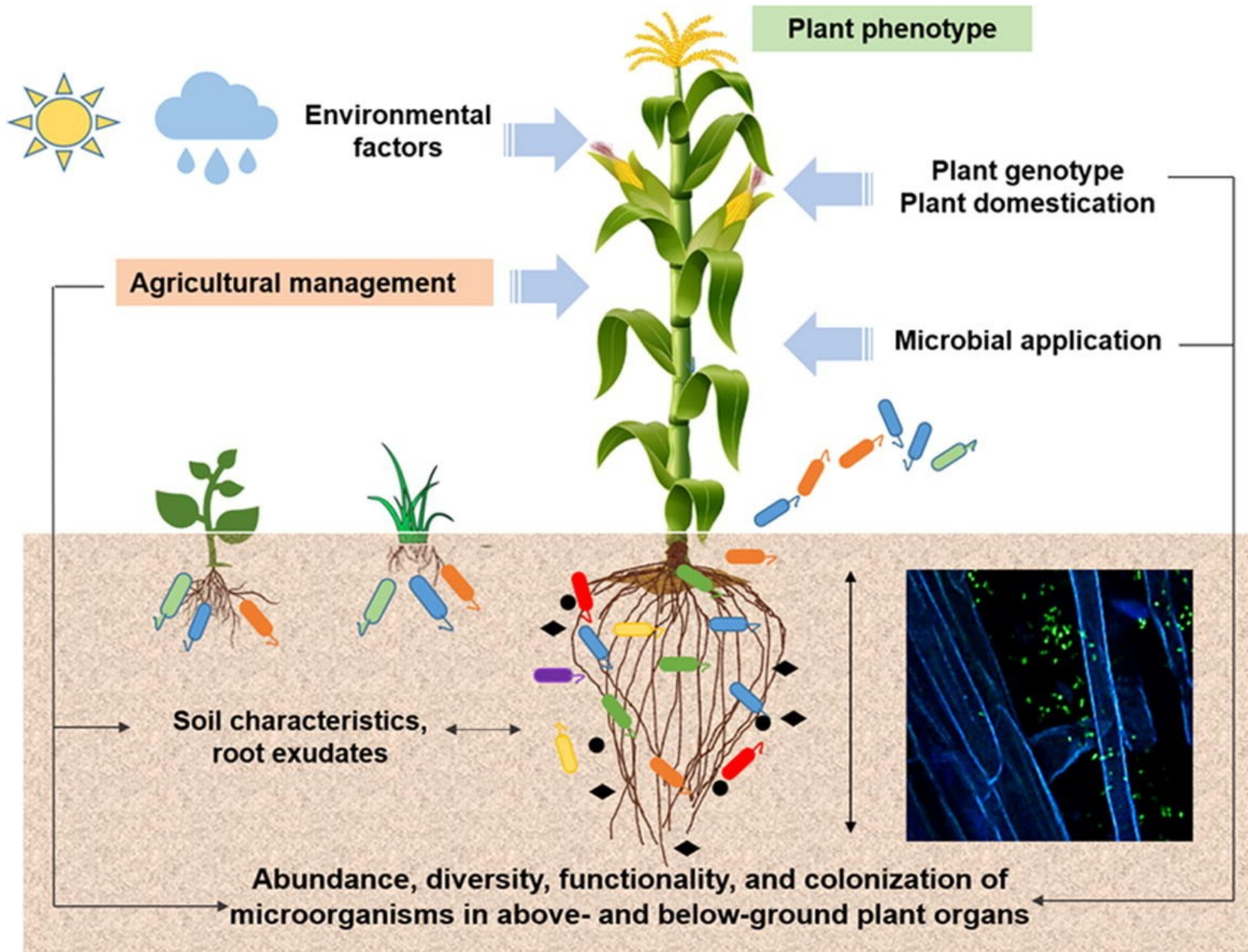
- Η παγκόσμια έρευνα για το μικροβίωμα των φυτών έχει βοηθήσει στην κατανόησή των πολύπλοκων αλληλεπιδράσεων μεταξύ φυτών και μικροοργανισμών.
- Οι μικροβιακές κοινότητες επηρεάζουν την υγεία, την ανάπτυξη και την ανθεκτικότητα των φυτών.
- Γενετικοί, βιοχημικοί και μεταβολικοί παράγοντες καθορίζουν τα ευεργετικά χαρακτηριστικά των μικροοργανισμών που σχετίζονται με τα φυτά.
- Η κατανόηση αυτών των μηχανισμών ανοίγει νέους δρόμους για καινοτόμες εφαρμογές στη γεωργία.



Πώς τα τελευταία ερευνητικά ευρήματα σχετικά με μικροβίωμα των φυτών μπορούν να συνεισφέρουν στην ανάπτυξη νέων ή πιο προηγμένων εφαρμογών.

Τι είναι το Μικροβιώμα ;

- Την τελευταία δεκαετία, πλήθος μελετών αποκάλυψαν πολύπλοκες και ιδιαίτερα διαφοροποιημένες μικροβιακές κοινότητες που συνδέονται με διάφορα είδη φυτών και με ειδικά φυτικά όργανα (ρίζες, φύλλα, βλαστοί, σπόροι).
- Αυτές οι μικροβιακές κοινότητες αποτελούν βασικό τμήμα του φυτικού ολοβιώματος (plant holobiont), δηλαδή του ενιαίου βιολογικού συστήματος που περιλαμβάνει το φυτό και τους συμβιωτικούς του μικροοργανισμούς.
- Το μικροβιακό αυτό σύνολο αναφέρεται επίσης ως:
 - Φυτική μικροβιακή κοινότητα (plant microbiota) → περιλαμβάνει όλους τους μικροοργανισμούς
 - Φυτικό μικροβίωμα (plant microbiome) → περιλαμβάνει όλα τα μικροβιακά γονιδιώματα
- Το μικροβίωμα εγκαθίσταται σε τρεις κύριες ζώνες:
 - Ριζόσφαιρα → περιοχή του εδάφους που επηρεάζεται από τις ρίζες
 - Φυλλόσφαιρα → υπεργεια μέρη του φυτού, κυρίως οι επιφάνειες των φύλλων
 - Ενδόσφαιρα → εσωτερικοί φυτικοί ιστοί



Μικροβίωμα των Φυτών (1)

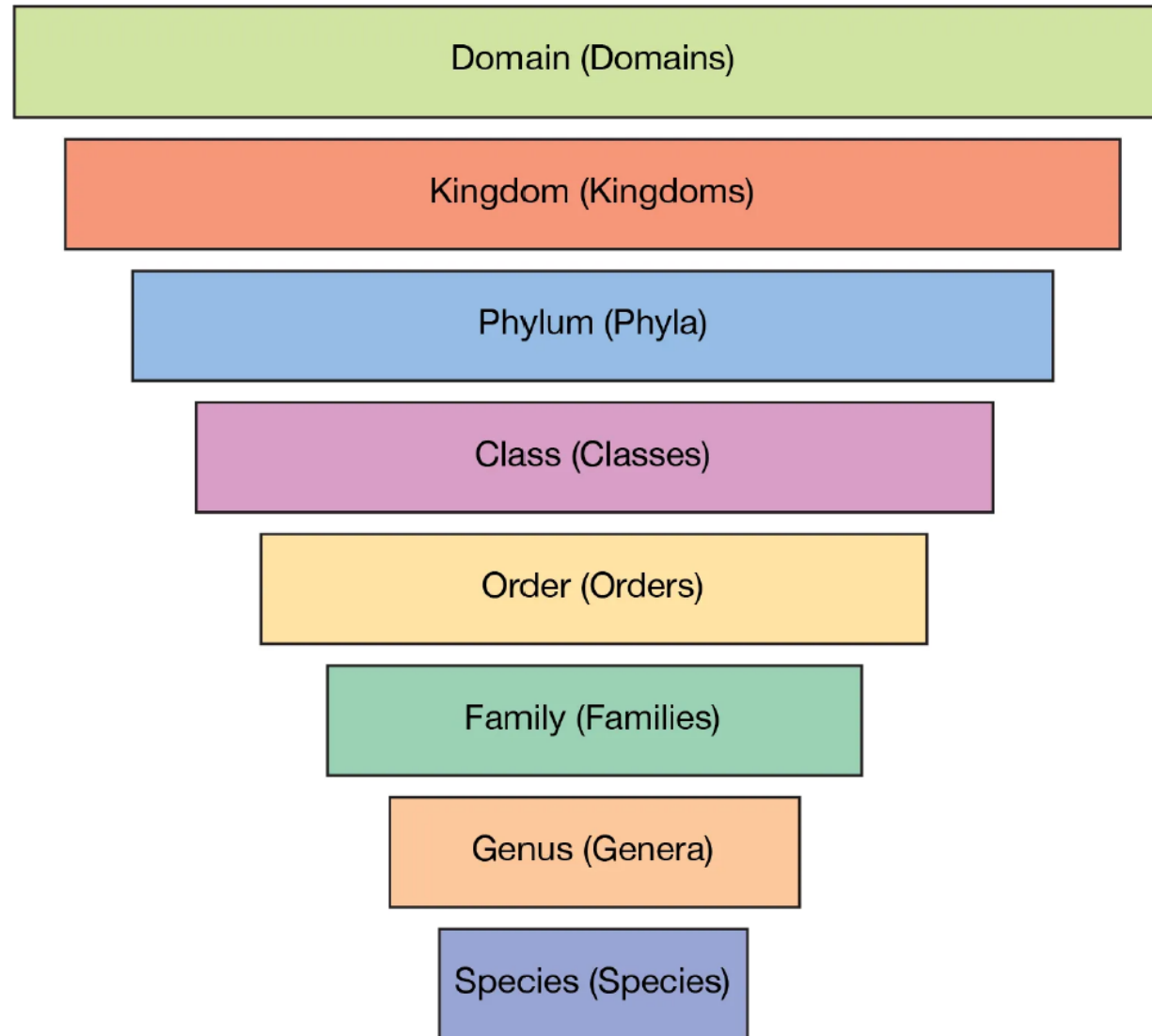
Κύριο μικροβίωμα (Core microbiome)

- Περιλαμβάνει μικροοργανισμούς που συνδέονται σταθερά με ένα συγκεκριμένο είδος ή γονότυπο φυτού, ανεξάρτητα από το έδαφος ή τις περιβαλλοντικές συνθήκες.
- Αποτελείται από “κεντρικά” ή “θεμελιώδη” taxa, τα οποία:
 - έχουν καθοριστική σημασία για τη φυσιολογία και τη γονιμότητα του φυτού,
 - διατηρούνται μέσω εξελικτικών μηχανισμών επιλογής και εμπλουτισμού μικροβίων με γονίδια απαραίτητα για την επιβίωση του μικροβιώματος.

Παραδείγματα:

- Πατάτα (*Solanum tuberosum*): *Bradyrhizobium*, *Sphingobium*, *Microvirga*
- Άμπελη (*Vitis vinifera*): *Pseudomonadaceae*, *Micrococcaceae*, *Hyphomicrobiaceae*
- Ρύζι (*Oryza sativa*): *Deltaproteobacteria*, *Alphaproteobacteria*, *Actinobacteria*

Επίπεδα της ταξινομικής ιεραρχίας – ταξινομικές βαθμίδες (taxon/taxa)



Μικροβίωμα των Φυτών (2)

Δορυφορικό μικροβίωμα (Satellite microbiome)

- Περιλαμβάνει σπάνια ή χαμηλής αφθονίας μικροβιακά taxa που απαντώνται σε περιορισμένες γεωγραφικές ή περιβαλλοντικές ζώνες.

Ορίζονται με βάση:

- Γεωγραφική εξάπλωση,
- Τοπική αφθονία,
- Εξειδίκευση οικοτόπου.

• Αν και λιγότερο άφθονα, αυτά τα taxa:

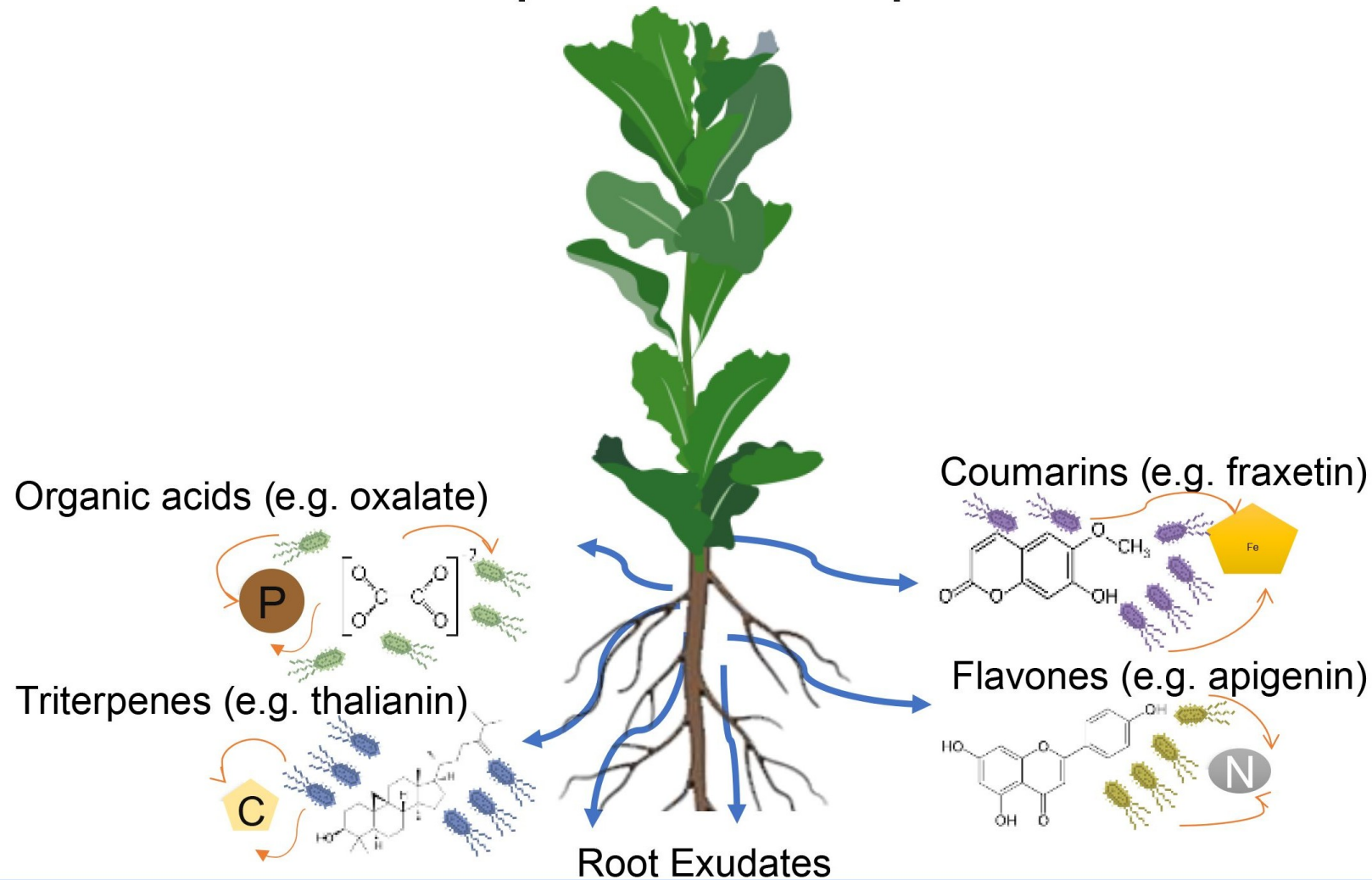
- έχουν κρίσιμο λειτουργικό ρόλο, συχνά δυσανάλογο με την αφθονία τους
- παράγουν αντιμυκητιακές πτητικές ενώσεις που προστατεύουν το φυτό
- αποτρέπουν την εισβολή παθογόνων μικροβίων στο έδαφος
- συμβάλλουν στην ανθεκτικότητα και παραγωγικότητα του φυτού.

Ριζικά εξιδρώματα και αλληλεπιδράσεις φυτών-μικροβίων

- Τα εξιδρώματα ριζών (Root exudates) αποτελούν τη χημική γλώσσα επικοινωνίας μεταξύ φυτών και μικροοργανισμών
- Περιλαμβάνουν σακχάρα, αμινοξέα, οργανικά οξέα και δευτερογενείς μεταβολίτες.
- Ρυθμίζουν τη σύσταση και τη συμπεριφορά του μικροβιώματος της ριζόσφαιρας:
 - Προσελκύουν ωφέλιμα μικρόβια
 - Απωθούν τα παθογόνα μέσω αντιμικροβιακών ενώσεων.
- Η χημική τους σύνθεση μεταβάλλεται ανάλογα με το είδος του φυτού, το αναπτυξιακό στάδιο και τις περιβαλλοντικές συνθήκες

Μόρια που εκκρίνονται επιλεκτικά από τις ρίζες (εξιδρώματα ριζών) διαμορφώνουν και ρυθμίζουν τη σύνθεση του μικροβιώματος, προσελκύοντας ή απωθώντας συγκεκριμένους μικροοργανισμούς

Role of Root Exudates on the Recruitment of Rhizosphere Bacteria to Improve Nutrient Acquisition

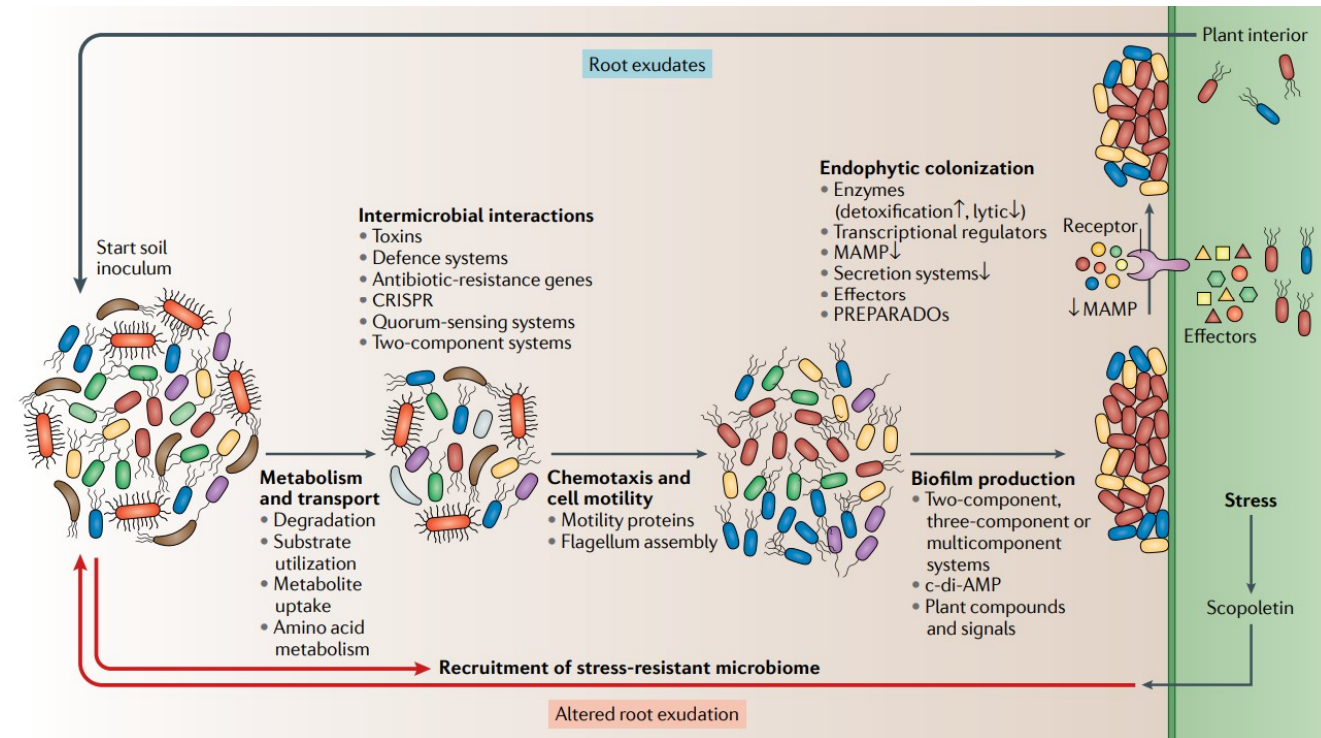


Ριζικά εξιδρώματα και αλληλεπιδράσεις φυτών-μικροβίων

- Σουκρόζη → ενεργοποιεί σηματοδοτικά μονοπάτια για κινητικότητα και σχηματισμό βιομεμβρανών (biofilms)
- Γλυκόζη → προάγει τον βακτηριακό αποικισμό στη ριζόσφαιρα του καλαμποκιού
- Ινοσιτόλη → ενισχύει χημειοταξία, σχηματισμό βιομεμβρανών και παραγωγή σιδηροφόρων, διευκολύνοντας την εγκατάσταση ωφέλιμων μικροβίων.
- Φλαβονοειδή → κρίσιμα για την προσέλκυση βακτηρίων που δεσμεύουν άζωτο (πχ *Gluconacetobacter diazotrophicus*)
- Φαινολικές ενώσεις και κουμαρίνες → Ενισχύουν την άμυνα έναντι παθογόνων και δρουν ως πηγές άνθρακα για ωφέλιμους μικροοργανισμούς
- Πτητικές οργανικές ενώσεις → Ορισμένα τερπένια αναστέλλουν παθογόνα και προσελκύουν ωφέλιμα μικρόβια

Οικολογική σημασία και κύριες λειτουργίες

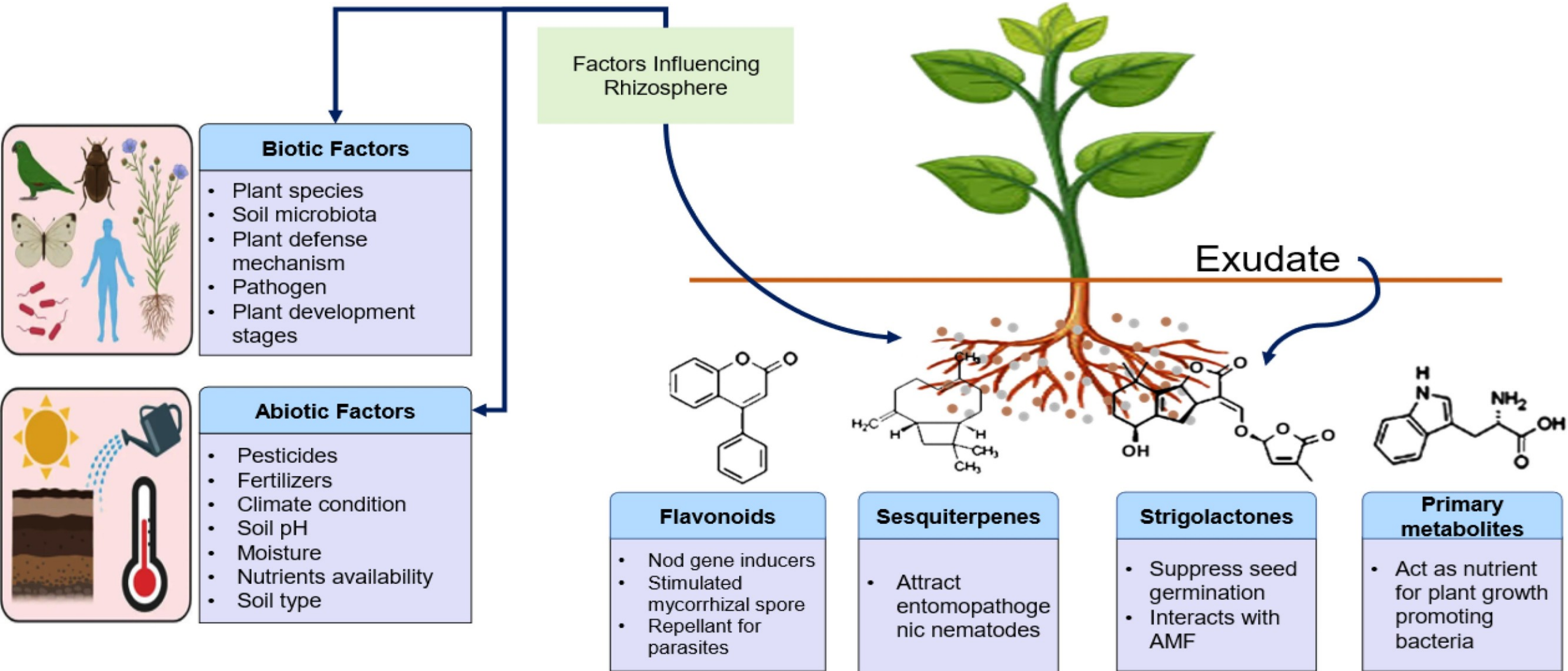
- Τα εξιδρώματα ριζών λειτουργούν ως πηγές ενέργειας και σηματοδοτικά μόρια που επηρεάζουν την μικροβιακή ενεργότητα
- Ανταποκρίνονται δυναμικά στις περιβαλλοντικές συνθήκες:
 - Σε έλλειψη θρεπτικών → έκκριση οργανικών οξέων για κινητοποίηση στοιχείων.
 - Σε ξηρασία ή αλατότητα → παραγωγή ενώσεων που στρατολογούν μικρόβια ανθεκτικά στο στρες



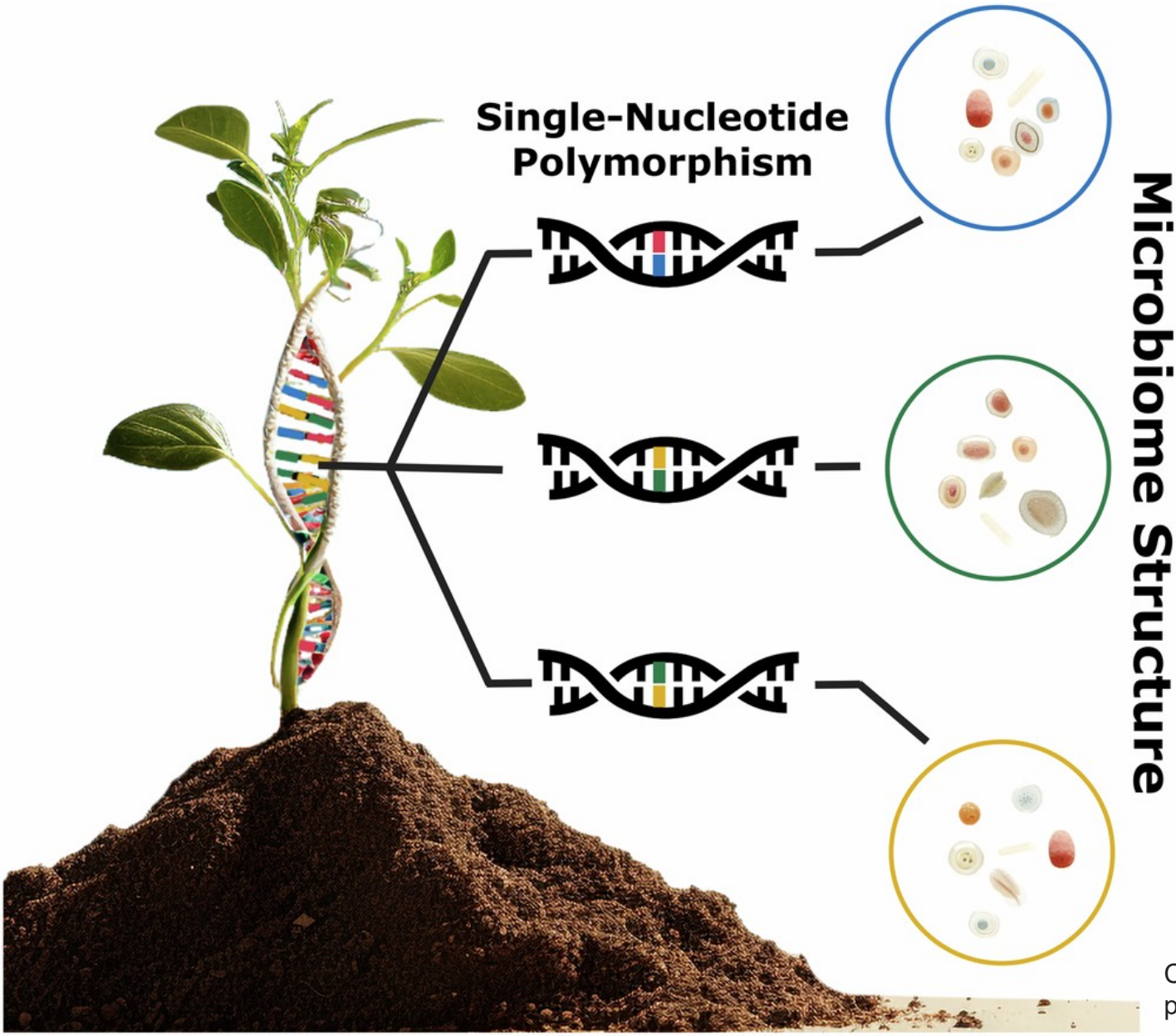
Trivedi, Pankaj et al. "Plant-microbiome interactions: from community assembly to plant health." *Nature reviews. Microbiology* vol. 18,11 (2020): 607-621.

Root-derived metabolite	Examples	Signaling or substrate functions	References
Coumarin	Scopoletin	Iron deficiency, recruitment of iron-reducing bacteria	(Patzner et al., 2020; Stassen et al., 2021)
Isoflavonoids	Daidzein, genistein	Regulation of nodule factors	(Wu et al., 2024)
Benzoxazinoids	Indole-3-glycerol-phosphate	Trigger colonization of plant growth-promoting rhizobacteria	(Zhang et al., 2017)
Phytoalexin	Camalexin	Stimulate plant growth-promoting rhizobacteria	(Eswar et al., 2021)
Flavones	Apigenin, luteolin	Enrich Oxalobacteraceae under nitrogen deprivation	(Kumar and Pandey, 2013; Medina and Kutuzova, 2022)
Triterpenes	Thalainin, thalianyl	Carbon source for bacterial proliferation	(Zhou et al., 2012; Hardoim et al., 2015a)
Fatty acids	2-Methylbutyric, palmitic acid	Enhance bacterial recruitment under salinity stress	(Marín et al., 2021)
Amino acids	Tryptophan, histidine, arginine	Chemotaxis to plant growth-promoting bacteria	(Chen and Liu, 2024)
Sugars	Sucrose, polysaccharides, glucose	Motility, colonization, biofilm formation signals	(Richter et al., 2023)
Sugar alcohols	Inositol	Flagellar development, chemotaxis, biofilm formation	(Peters et al., 2010; Xue et al., 2021)
Volatiles	Terpenes, ketones	Act as nutrients, info-chemicals for chemotaxis	(Lin et al., 2021)
Phenolics	Fraxetin, scopoletin	Selective antimicrobial effects on microbial strains	(Ecevit et al., 2022)

Παράγοντες που επηρεάζουν το μικροβίωμα



Παράγοντες που επηρεάζουν το μικροβιώμα



- **Γενετική ποικιλότητα του φυτού-ξενιστή**
 - Το είδος του φυτού καθορίζει τη σύσταση των μικροβιακών κοινοτήτων.
 - Διαφορετικές ποικιλίες του ίδιου φυτού (π.χ. ρυζιού) φιλοξενούν διαφορετικούς πληθυσμούς βακτηρίων

Παράγοντες που επηρεάζουν το μικροβιώμα

- **Γενετική ποικιλότητα του φυτού-ξενιστή**

- Το είδος του φυτού καθορίζει τη σύσταση των μικροβιακών κοινοτήτων.

- Διαφορετικές ποικιλίες του ίδιου φυτού (π.χ. ρυζιού) φιλοξενούν διαφορετικούς πληθυσμούς βακτηρίων

- **Ηλικία, αναπτυξιακό στάδιο και φυσιολογική κατάσταση**

- Η συσταση του μικροβιώματος μεταβάλλεται δυναμικά καθώς το φυτό αναπτύσσεται ή υφίσταται περιβαλλοντικό στρες.

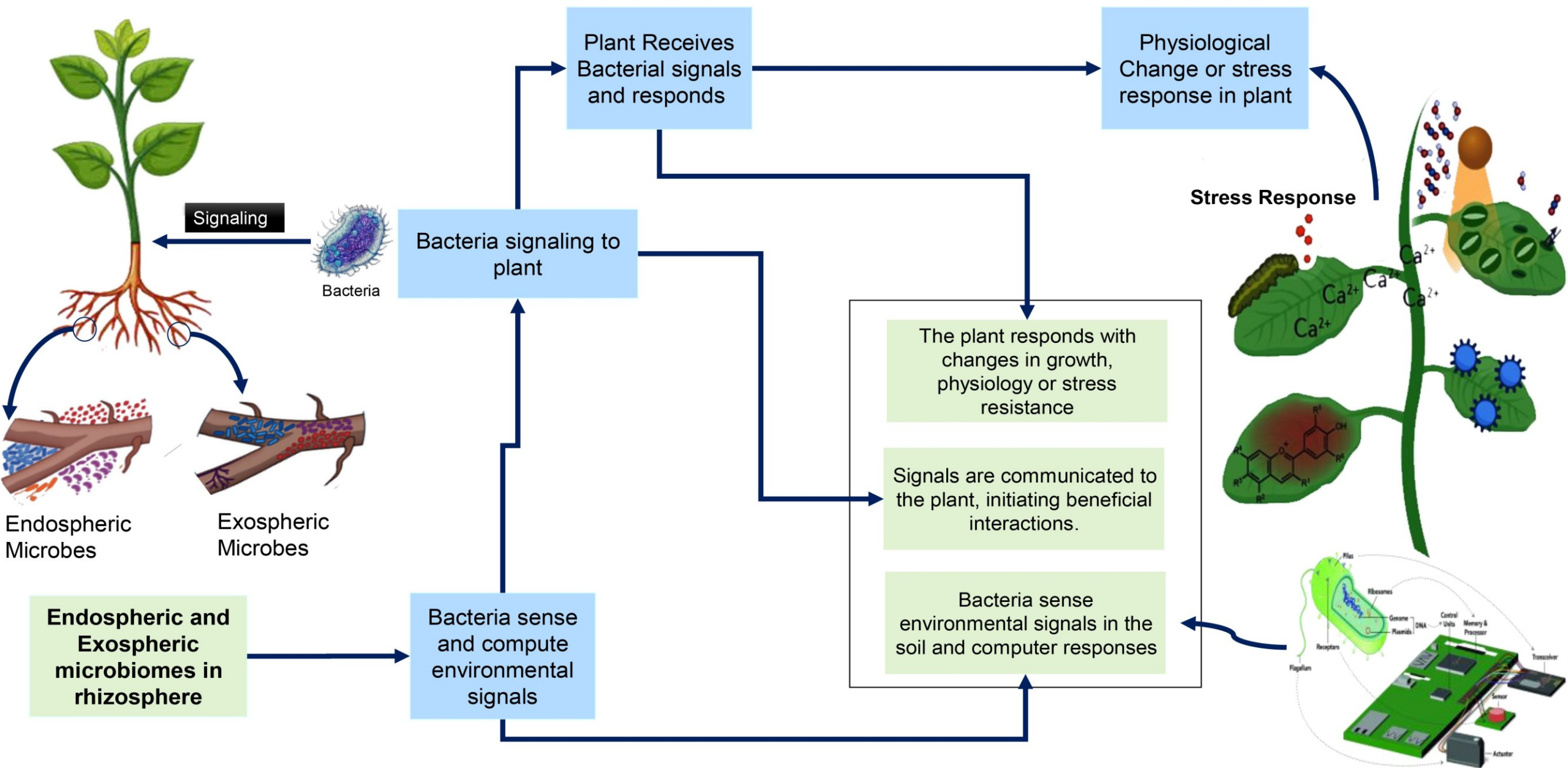
- **Περιβαλλοντικοί (αβιοτικοί) παράγοντες**

- Το έδαφος, το κλίμα, η γεωγραφική θέση και η ποιότητα του εδάφους επηρεάζουν καθοριστικά τη μικροβιακή ποικιλότητα.

- Το στρες (ξηρασία / αλατότητα) μπορεί να ωφελήσει δυνητικά παθογόνα βακτήρια και να αλλάξει τη μικροβιακή ισορροπία.

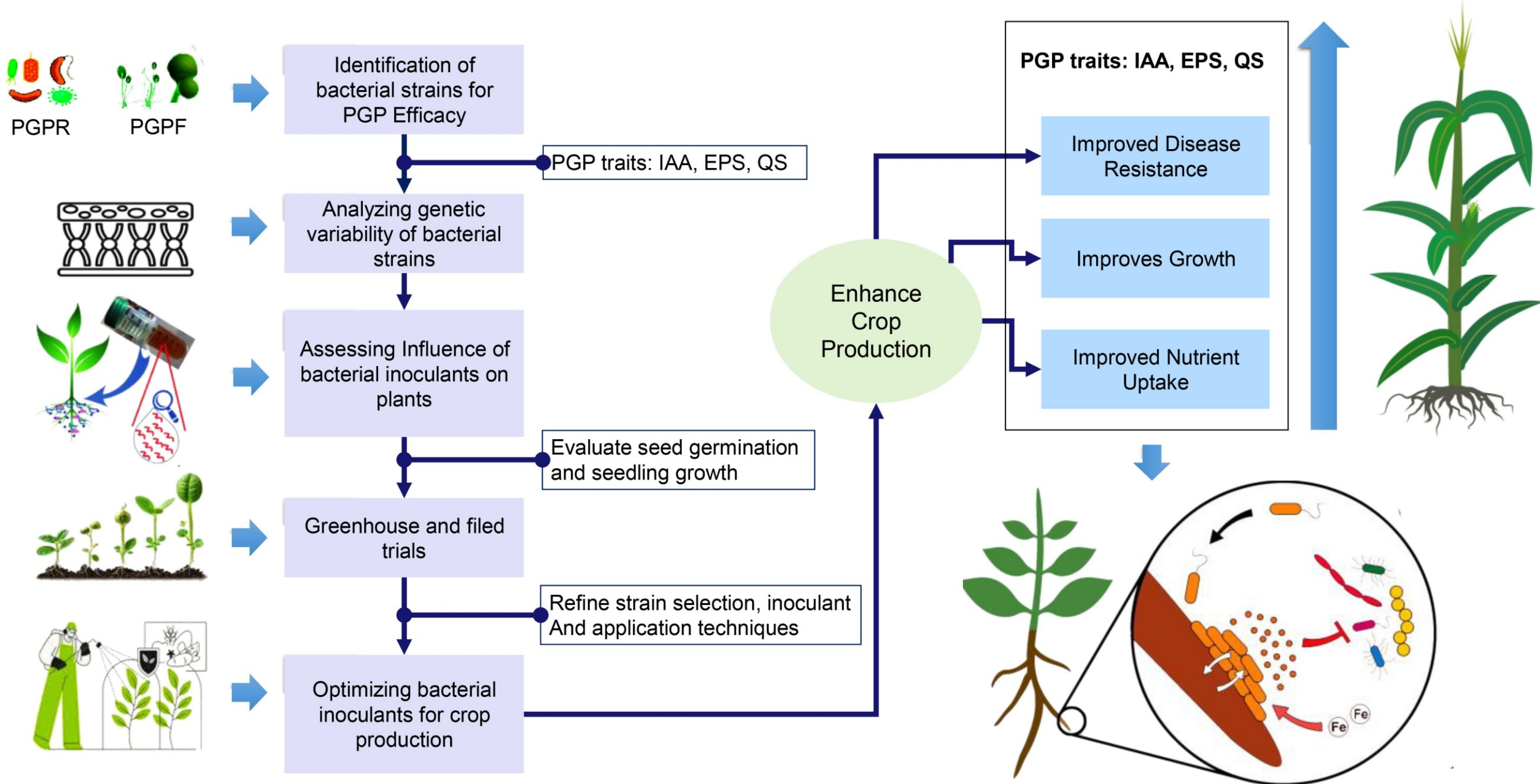
- **Βιοτικοί παράγοντες**

- Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ μικροοργανισμών, παθογόνων, ζώων του εδάφους και ζιζανίων διαμορφώνουν τη μικροβιακή κοινότητα.



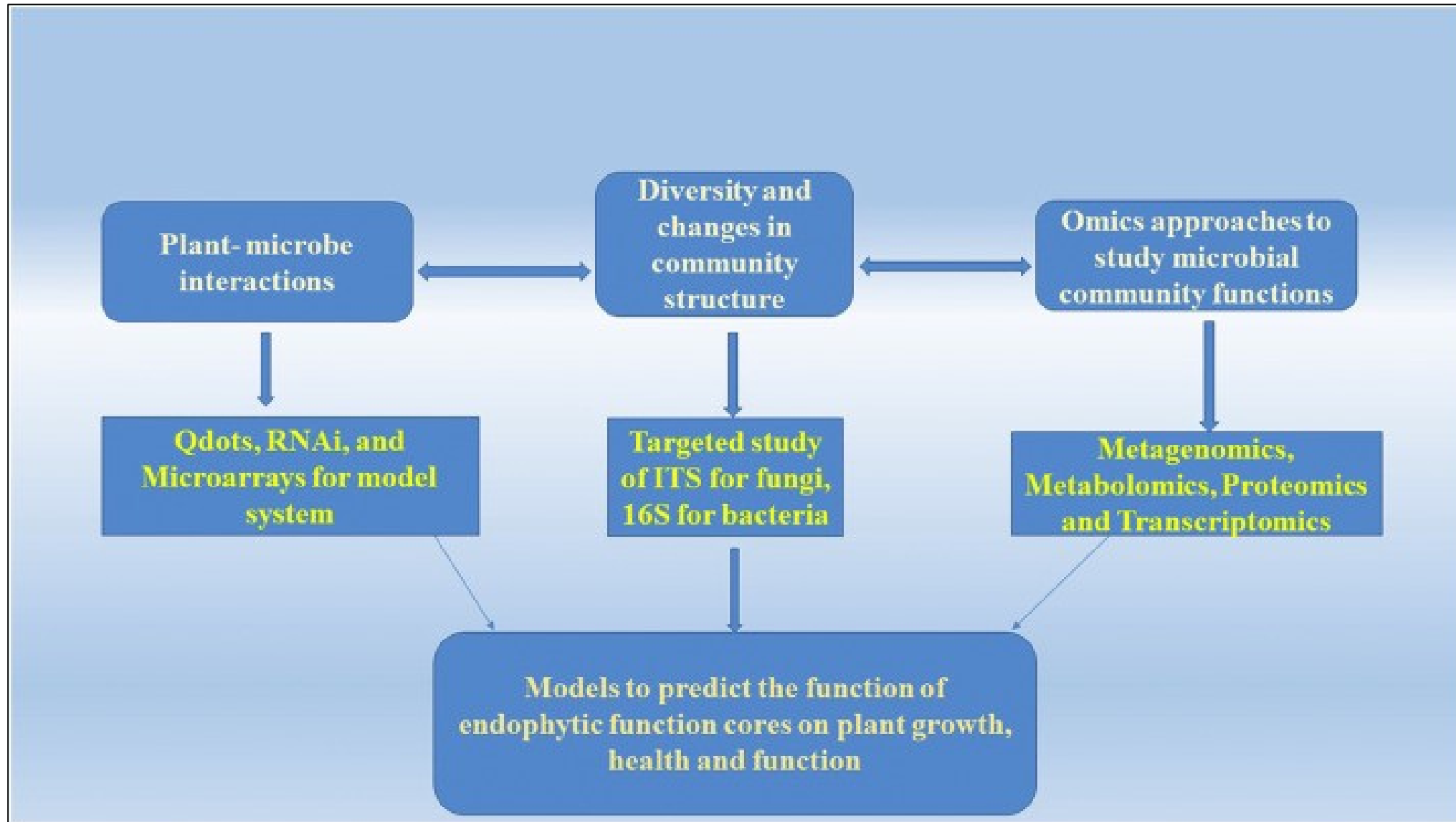
Benefit	Description	Examples	Reference
Abiotic stress tolerance	Microorganisms alleviate stress caused by drought, salinity, and extreme temperatures by producing biopolymers, osmolytes, and antioxidant enzymes.	<i>Bacillus</i> strains improve drought resistance in maize and wheat by stimulating root growth and enhancing water uptake.	(Blagodatskaya and Kuzyakov, 2018; Sabrina et al., 2021; dos Santos et al., 2022)
Nutrient absorption	Microbes enhance the availability and uptake of vital nutrients, including nitrogen, phosphorus, and potassium, through nitrogen fixation and phosphate solubilization.	Rhizobial inoculants improve nitrogen fixation in legumes, reducing dependence on synthetic fertilizers. Phosphate-solubilizing bacteria increase phosphorus availability in crops like wheat.	(Singh and Siddiqui, 2010; Zhang et al., 2017)
Induced systemic resistance (ISR)	Beneficial microorganisms trigger ISR, priming plants' immune systems to defend against pathogens through enzymatic and secondary metabolite production.	<i>Trichoderma</i> species manage fungal infections in tomato and wheat, reducing reliance on fungicides.	(Singh and Siddiqui, 2010)
Biological fertilizers	Microbial inoculants with nitrogen-fixing, phosphate-solubilizing, or potassium-mobilizing capabilities act as natural fertilizers, improving crop productivity.	<i>Rhizobium</i> in soybean and <i>Azospirillum</i> in cereals significantly enhance yields while reducing fertilizer input.	(Yang et al., 2024)
Disease suppression	Beneficial microbes suppress soil-borne pathogens by producing antibiotics, lytic enzymes, and competing for space and nutrients.	<i>Pseudomonas fluorescens</i> suppresses <i>Fusarium</i> in wheat; <i>Bacillus subtilis</i> inhibits <i>Rhizoctonia solani</i> in rice.	(De Vleeschauwer et al., 2008; Hu et al., 2014)
Improved soil fertility	Microorganisms enhance soil organic matter decomposition and nutrient cycling, improving soil structure and fertility.	Mycorrhizal fungi enhance phosphorus cycling in maize; <i>Bacillus</i> species improve organic matter decomposition in soils.	(Rousk and Bååth, 2011; Allard et al., 2017; Jin et al., 2024)
Agronomic practices	Agronomic interventions, such as soil amendments, cover cropping, and crop rotations, optimize the rhizosphere for beneficial microbes.	Cover cropping with legumes promotes nitrogen-fixing bacteria; compost amendments improve microbial diversity in degraded soils.	(El-Saadony et al., 2024)
Biocontrol of pathogens	Beneficial microorganisms outcompete pathogens or produce antifungal and antibacterial compounds that suppress plant diseases.	<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> produces lipopeptides to suppress <i>Fusarium oxysporum</i> in tomatoes.	(Dudenhöffer et al., 2016; Fan et al., 2017)

Development of SynComs to optimize plant–microbe interactions for enhanced crop production



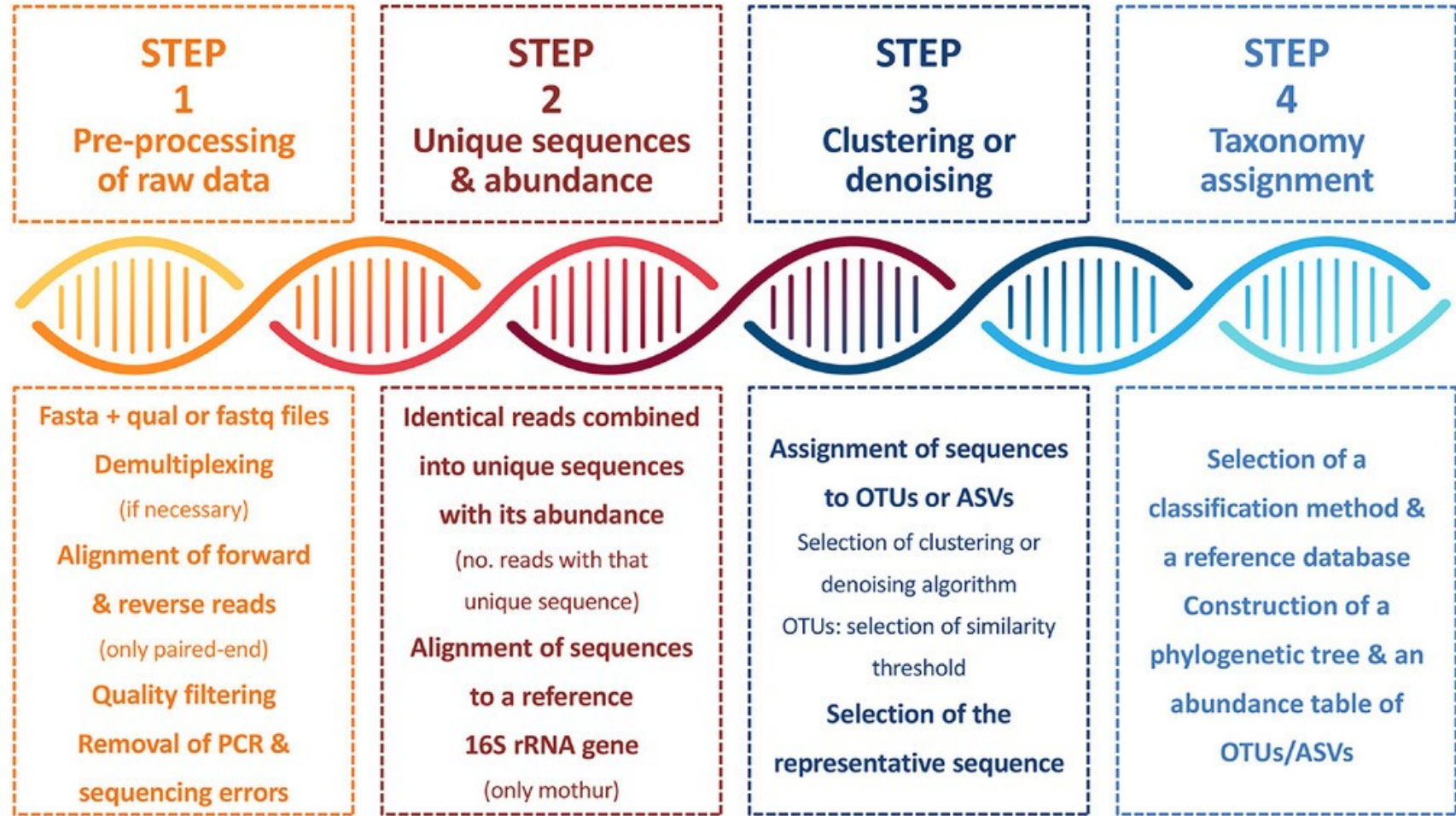
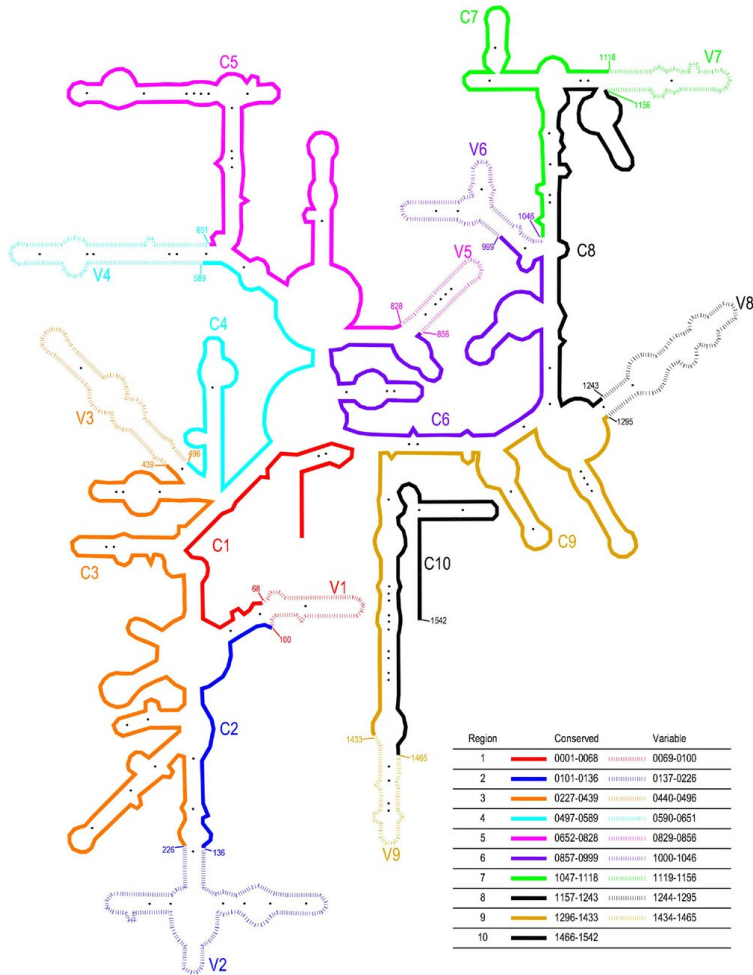
PGP: plant growth-promoting, IAA: indole acetic acid, EPS: Exopolysaccharides

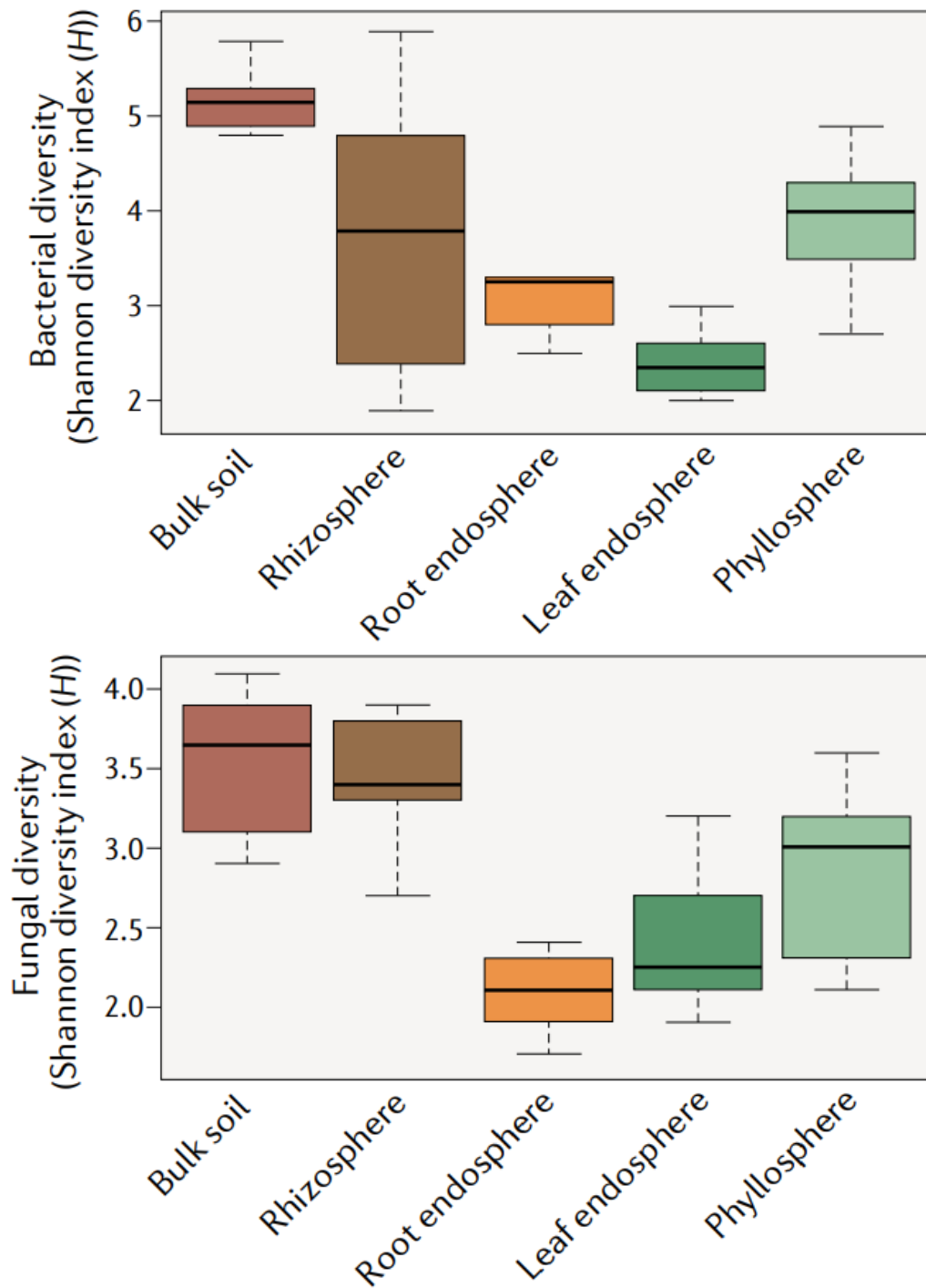
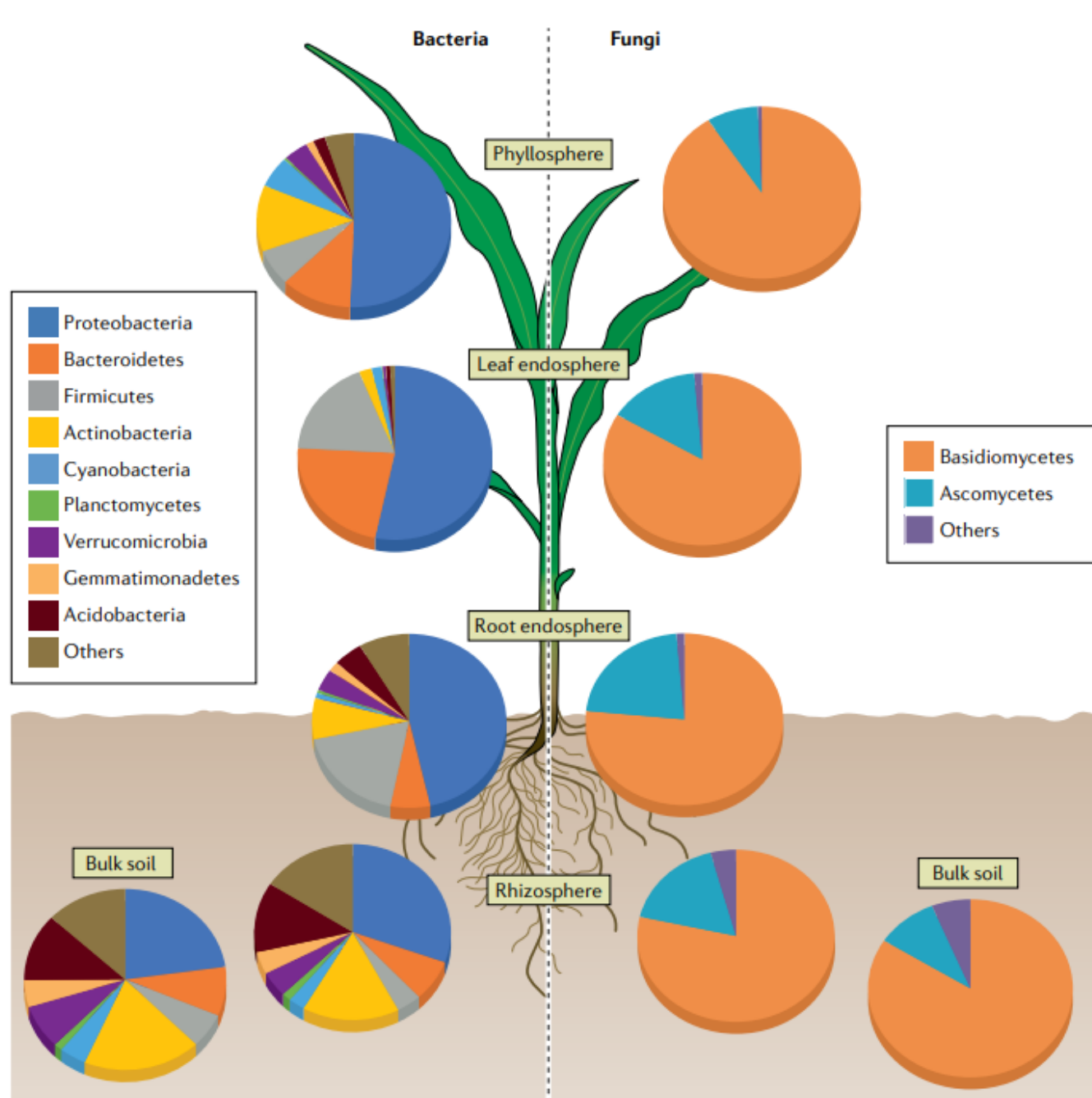
Προσεγγίσεις για τη μελέτη των αλληλεπιδράσεων φυτών - μικροβίων



Ροή εργασίας για μελέτη μικροβιακών κοινοτήτων μέσω 16S rRNA

16s rRNA Gene Regions





Trivedi, Pankaj et al. "Plant-microbiome interactions: from community assembly to plant health." *Nature reviews. Microbiology* vol. 18,11 (2020): 607-621.

Στρατηγική για τη βελτιστοποίηση βακτηριακών στελεχών στη γεωργία

- Πολυεπίπεδη διαδικασία που συνδυάζει γονιδιωματικές, μεταγονιδιωματικές και μοριακές προσεγγίσεις για την επιλογή, τροποποίηση και αξιολόγηση ωφέλιμων βακτηρίων με σκοπό τη βελτίωση της ανάπτυξης και της ανθεκτικότητας.

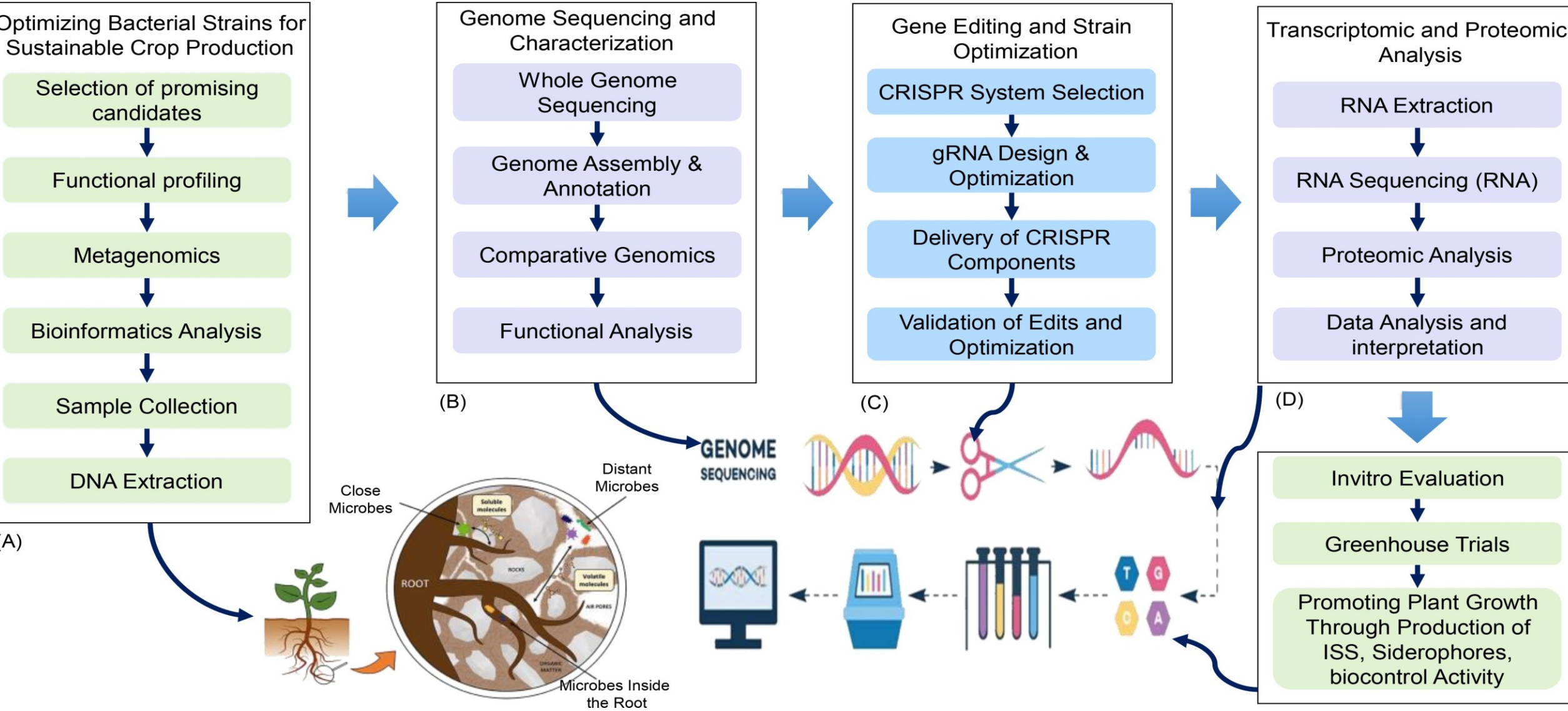
Απομόνωση και αρχική ανάλυση βακτηριακών στελεχών

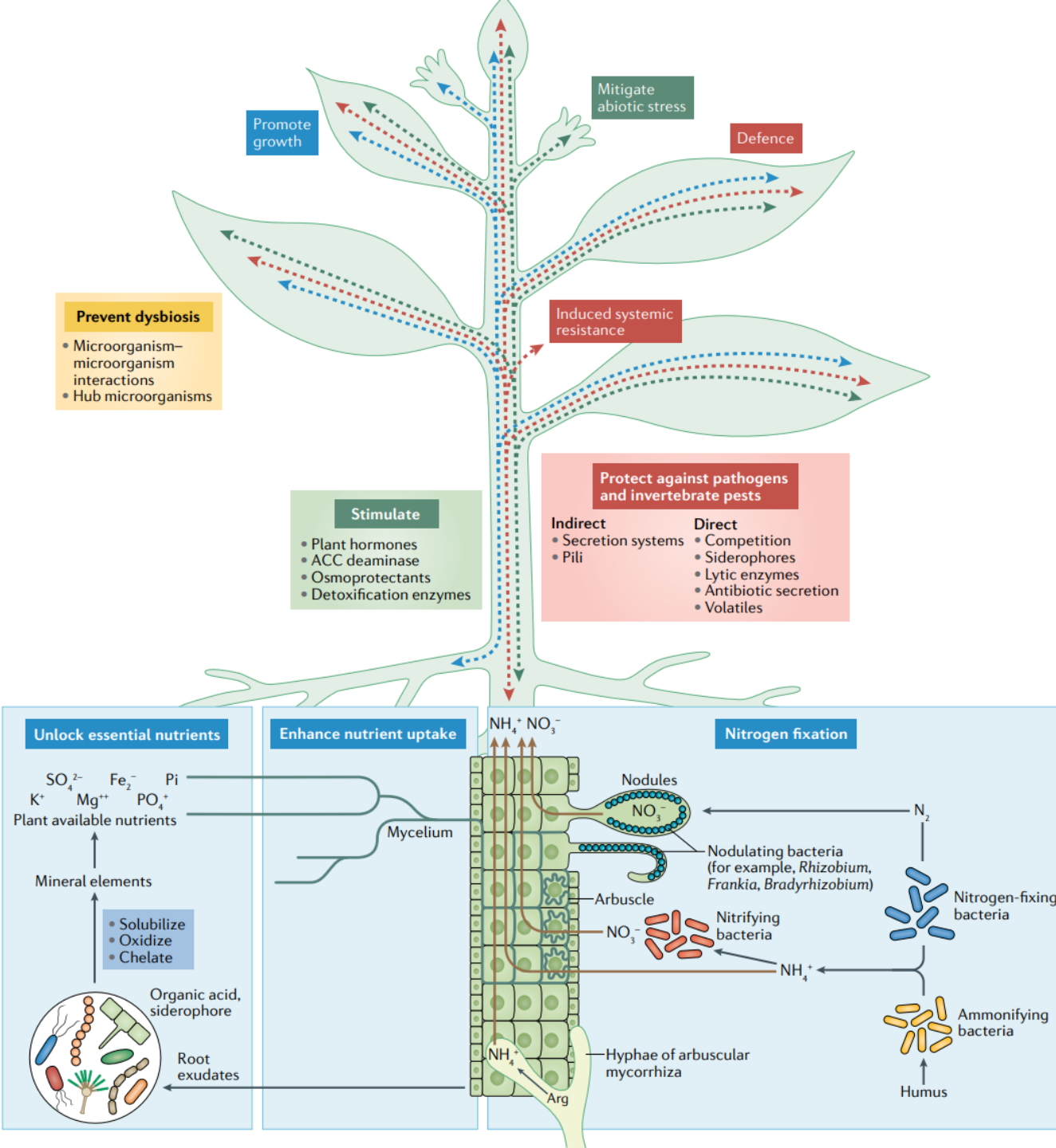
Γονιδιωματική ανάλυση και χαρακτηρισμός

Γονιδιακή τροποποίηση και βελτιστοποίηση στελεχών (CRISPR)

Μεταγραφωμική και πρωτεωμική ανάλυση

Από την ανακάλυψη και γενετική χαρτογράφηση έως τη γονιδιακή τροποποίηση και λειτουργική αξιολόγηση βακτηριακών στελεχών





Το μικροβίωμα των φυτών ενισχύει την ανάπτυξη, την ανθεκτικότητα στο στρες και την άμυνα μέσω άμεσων και έμμεσων μηχανισμών.

Trivedi, Pankaj et al. "Plant-microbiome interactions: from community assembly to plant health." *Nature reviews. Microbiology* vol. 18,11 (2020): 607-621.

